ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ СССР
ПО ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИИ И КОНТРОЛЮ
ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ

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

Выпуск

430

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 193196, Малоохтенский пр., 98

ЛЕНИНГРАД ГИДРОМЕТЕОИЗДАТ 1979

УДК 551.521+551.501.81(061.6)

Содержатся результаты теоретических и экспериментальных исследований метеорологических характеристик облаков и связанных с ними опасных явлений погоды методами активной и пассивной радиолокации. Ряд статей посвящается вопросам автоматизации радиолокационных метеорологических исследований.

Излагаются методические работы по совершенствованию способов радиолокационных наблюдений гидрометеорных образований на сети МРЛ. Рассматриваются вопросы построения радиофизической аппаратуры.

Рассчитывается на научных работников и инженеров, занимающихся вопросами физики атмосферы, радиофизики, радиотехники. Рекомендуется также аспирантам и студентам старших курсов соответствующих специальностей.

The publication contains the results of theoretical and experimental studies of cloud meteorological characteristics and related hazardous weather phenomena using methods of active and passive radiolocation. Some articles deal with the problems of automation of radar meteorological studies.

Methodical works are described on improving the methods of radar observations of hydrometeor formations at the network of meteorological radar stations. The problems of constructing radiophysical equipment are considered.

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

М $\frac{20807\text{-}200}{069(02)\text{-}79}$ 33-79(2) 1903040000

© Главная геофизическая обсерватория им. А. И. Воейкова (ГГО), 1979 г.

В. Н. Стасенко, С. М. Гальперин, В. Н. Егоров, А. Ф. Гончар

СОВМЕСТНОЕ ОБНАРУЖЕНИЕ МОЛНИЙ С ПОМОЩЬЮ РЛС МЕТРОВОГО И ДЕЦИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНОВ РАДИОВОЛН

Расширение круга радиотехнических средств, использующихся для обнаружения сильноточных атмосферных разрядов (АР) — молний, ставит задачу проведения сравнительной оценки информативности этих устройств. В последнее время наряду с РЛС метрового диапазона (типа П-12) для этих целей используется РЛС длинноволнового участка дециметрового диапазона радиоволн типа радиолокатора самолетной посадки (РСП). Проведем анализ данных совместной работы указанных РЛС по обнаружению АР в соответствии с методикой, изложенной в [1].

Известно, что надежность обнаружения молниевых разрядов с помощью РЛС типа П-12 характеризуется длительностью существования ($\tau_{э_{мв}}$) эхо-сигналов и величиной эффективной отражающей поверхности ($\sigma_{м_{мв}}$) ионизированных каналов АР. Величина $\tau_{э_{мв}}$ зависит от числа ($n_р$) повторных разрядов во вспышке. В Ленинградской области в 80 % случаев $n_р \leqslant 4$, а $\tau_{э_{мв}}$ на выходе РЛС типа П-12 $\leqslant 600$ мс. В метровом диапазоне радиоволн АР имеют $\sigma_м$ порядка 10^2—10^4 м^2, т. е. отношение сигнал/шум на выходе приемника РЛС может составлять 30—40 дБ. Несмотря на сильно флюктуирующий характер, величины $\sigma_м = f(t)$ и фиксируемая $\tau_{э_{мв}}$ обеспечивают уверенное обнаружение АР в этом диапазоне радиоволн. За время $\tau_{э_{мв}}$ РЛС типа П-12 успевает принять 100—200 эхо-сигналов АР. Данная станция имеет ширину диаграммы направленности в горизонтальной плоскости $\theta_г = 12°$ и длительность зондирующего импульса $\tau_и = 6$ мкс.

Точность определения координат АР может быть увеличена при использовании РЛС типа РСП, имеющей $\theta_г = 4°$ и $\tau_и = 1$ мкс. Приведем полученные нами данные регистрации АР станцией РСП. Интегральное распределение $\tau_{э_{дмв}}$ показывает, что в 80 % случаев $\tau_{э_{дмв}} \leqslant 0{,}4$—$0{,}45$ с (рис. 1 *б*). Порядок величины $\sigma_{м_{дмв}}$

соответствует порядку $\sigma_{м_{мв}}$; за время $\tau_{э_{дмв}}$ эта РЛС регистрирует в среднем 200—250 эхо-сигналов АР. Последнее связано с тем, что частота следования зондирующих импульсов у РСП в 1,5 раза

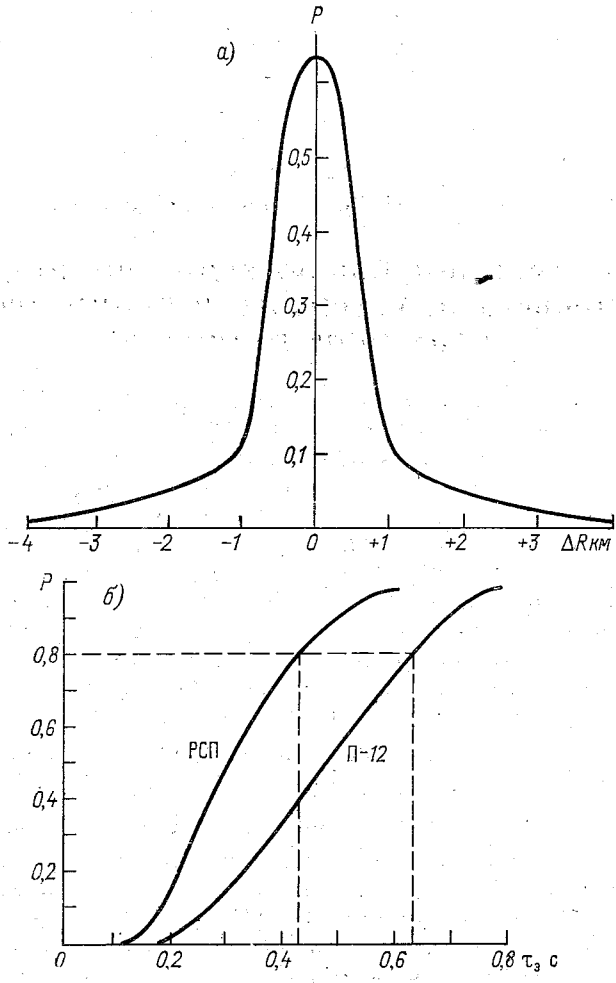


Рис. 1. Повторяемость ошибок (ΔR) определения удалений АР станциями РСП и П-12 (*а*) и интегральное распределение $\tau_{э_{мв}}$ и $\tau_{э_{дмв}}$ (*б*).

больше, чем у П-12. Следовательно, станция типа РСП также может успешно использоваться для обнаружения АР.

Пример одновременного обнаружения АР станциями П-12 и РСП, специально работающими от одного запуска, приведен на рис. 2. Здесь N_1 и N_2 показывают количество АР, обнаруженных П-12 и РСП соответственно, а $N_р$ — совместное обнаружение АР

тими станциями. Под совместным обнаружением понимается не сумма N_1+N_2, а дополнение показаний одной РЛС другой, приводящее к увеличению общего числа зафиксированных разрядов. Так, за 2 мин с 16 ч 36 мин РЛС П-12 обнаружила четыре АР, а РСП — три. Одновременно станции зарегистрировали по два АР и оставшиеся три раздельно, следовательно, $N_р=5$. Числа разрядов N_1 и N_2 могут отличаться. Было установлено, что на $R \geqslant 100$ км преимущественно $N_2>N_1$, а в зоне до 100 км обычно $N_1>N_2$. В общем количестве N_1 и N_2 во многом зависит от про-

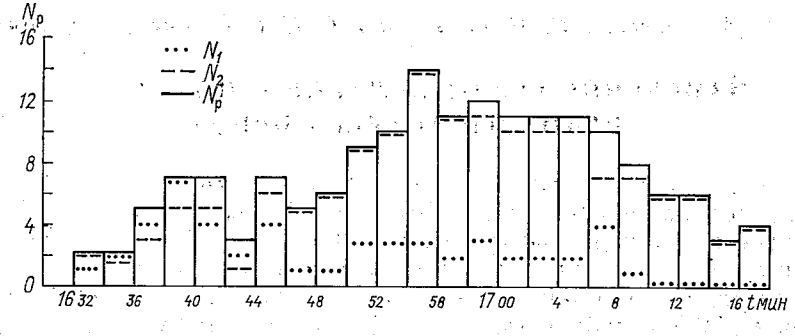


Рис. 2. Синхронная регистрация АР станциями РСП и П-12.

филя и характера местности, где устанавливаются РЛС. Кроме того, на обнаружении АР станцией РСП сказывается маскирующий эффект метеоцелей, имеющих отражаемость 10^2 мм^6/м^3 и более.

Большой интерес представляет определение разности ΔR в показаниях двух станций при измерении удаления радиоэхо АР $\Delta R = |R_{П\text{-}12} - R_{РСП}|$). Повторяемость ошибок ΔR приведена на рис. 1 *а*. Видно, что в 85 % случаев ΔR не превышает ± 1 км и только в 3 % случаев имели место ошибки более ± 3 км.

Проведенный анализ совместной работы РЛС типа П-12 и типа РСП показывает, что последняя может успешно использоваться для обнаружения молниевых разрядов. Более узкая диаграмма направленности в горизонтальной плоскости РСП может позволить осуществить контроль грозовой активности в отдельных ячейках облака.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Методика исследования гроз радиотехническими средствами/С. М. Гальперин, В. Д. Степаненко, В. Н. Егоров и др.— В кн.: Труды I Всесоюзного симпозиума по атмосферному электричеству. Л.: Гидрометеоиздат, 1976, с. 161—169.

В. А. Алексеев, С. М. Гальперин, В. Н. Стасенко, А. М. Тряхо

ИЗМЕРЕНИЕ ВЫСОТ ОБЛАКОВ С ПОМОЩЬЮ РАДИОВЫСОТОМЕРА ПРВ-10

Измерения высот Cb летом в Ленинградской обл. с помощью приводного радиовысотомера ПРВ-10 показали, что радиоэхо облаков простирается до высоты $H_в = 16 \div 18$ км и более. Такие значения $H_в$ в этих широтах маловероятны. Они имели место над теми зонами радиоэхо облаков, где в слое от земли до $H = 3 \div 7$ км по данным МРЛ-1 наблюдалась $Z_{max} \geqslant 10^3 \div 10^4$ мм^6/м^3. Рассмотрим причины, которые могут привести к такому завышению верхней границы чаще всего грозовых облаков.

Если обозначить коэффициент усиления главного лепестка антенны РЛС через $G_{гл}$, а бокового лепестка через $G_{бок}$, то их отношение, выраженное в децибелах, можно представить в виде

$$A = 10 \lg \left(\frac{G_{бок}}{G_{гл}} \right). \quad (1)$$

Обычно для параболических антенн $A = -20$ дБ, а для усеченных параболоидов $A = -10 \div (-15)$ дБ.

Так как в уравнение радиолокации величина коэффициента усиления антенны входит в квадрате, то при

$$A_1 = -20 \text{ дБ}, \quad G^2_{1\,бок} = 10^{-4} G^2_{гл};$$

$$A_2 = -15 \text{ дБ}, \quad G^2_{1\,бок} = 9 \cdot 10^{-4} G^2_{гл};$$

$$A_3 = -10 \text{ дБ}, \quad G^2_{1\,бок} = 10^{-2} G^2_{гл}.$$

Для большинства параболических антенн ширина бокового лепестка в 2 раза меньше ширины главного лепестка диаграммы направленности. Из этого следует, что объем, облучаемый боковым лепестком $V_{бл}$, также будет меньше объема $V_{гл}$ и составит

$$V_{бок} = 0{,}25 V_{гл}. \quad (2)$$

Подставив в уравнение радиолокации объемной цели [2]

$$P_r = 3{,}5 \cdot 10^3 \frac{P_t G^2 \theta_г \theta_в \tau}{\lambda^2 R^2} Z \varkappa K K_з \quad (3)$$

параметры ПРВ-10 $G_{бок}$ и $V_{бл}$ при облучении метеоцели первым боковым лепестком и решив уравнение относительно Z, получим в зависимости от коэффициента A следующие выражения (здесь Z в мм⁶/м³, а R в км):

$$A_1 = -20 \text{ дБ}, \quad Z_1 = 62 \cdot 10^{0,1n} R^2;$$

$$A_2 = -15 \text{ дБ}, \quad Z_2 = 5{,}5 \cdot 10^{0,1n} R^2;$$

$$A_3 = -10 \text{ дБ}, \quad Z_3 = 0{,}62 \cdot 10^{0,1n} R^2,$$

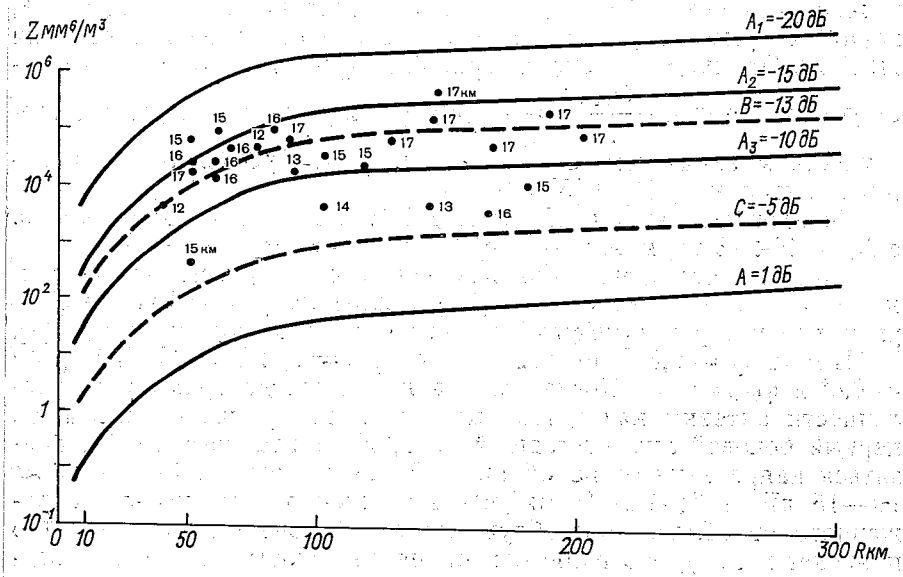


Рис. 1. Зависимость $Z_{бок.\,min} = f(R)$ и примеры завышения высоты облаков РЛС типа ПРВ-10 ($C = A = 5$ дБ, $A = 1$ дБ — обнаружение главным лепестком).

где n — затухание в дБ, вносимое в приемный тракт РЛС при проведении измерений $P_г$.

Если принять $n = 0$ и определить зависимости $Z_i = \psi(R)$, то можно построить кривые, характеризующие ту Z_{min}, которую можно обнаружить как главным, так и первым боковым лепестком при различных значениях A в зависимости от удаления метеоцели (рис. 1).

Видно, что для обнаружения метеоцели первым боковым лепестком на $R = 50$ км необходимо выполнение следующих условий:

$$Z_{1\,min} \geqslant 1{,}6 \cdot 10^5 \text{ мм}^6/\text{м}^3, \quad A_1 = -20 \text{ дБ};$$

$$Z_{2\,min} \geqslant 1{,}8 \cdot 10^4 \text{ мм}^6/\text{м}^3, \quad A_2 = -15 \text{ дБ};$$

$$Z_{3\,min} \geqslant 1{,}6 \cdot 10^3 \text{ мм}^6/\text{м}^3, \quad A_3 = -10 \text{ дБ}.$$

Таким образом, даже при $A = -20$ дБ возможно обнаружение облаков Cb первым боковым лепестком, если $R < 50$ км. При $A = -10$ дБ такое обнаружение часто может наблюдаться и при $R > 50$ км.

На рис. 1 точками показаны случаи, когда на экране ПРВ-10 облака имели $H_в \geqslant 12$ км на различных удалениях от станции. По оси ординат можно определить Z_{max}, которая по данным МРЛ-1 соответствовала каждому случаю.

Если считать, что приведенные данные с большими значениями $H_в$ обусловлены обнаружением первым боковым лепестком, то можно установить более достоверное значение коэффициента A, характеризующего уровень первого бокового лепестка станции ПРВ-10. Это иллюстрируется кривой B (рис. 1), которая соответствует отношению $\frac{G_{бок}}{G_{гл}} \approx -13$ дБ, что хорошо согласуется с теоретическим значением этого отношения для усеченного параболоида антенны ПРВ-10 [3].

Появление на экране ИДВ ПРВ-10 радиоэха грозовых облаков с $H_в = 16 \div 18$ км можно объяснить следующим образом.

Известно, что первый боковой лепесток диаграммы направленности отстоит от главного (по углу места) на $\varphi_{бок} = 4\varphi_0$, где φ_0 — угол, при котором выигрыш антенны падает до половины $G_{гл}$ [1]. У ПРВ-10 $\varphi_0 = 0{,}58°$, следовательно, $\varphi_{бл} = 2{,}32°$. У МРЛ-1 $\varphi_0 = 0{,}4°$ и $\varphi_{бок} = 1{,}6°$. Когда ось главного луча диаграммы направленности антенны находится выше верхней границы облака, то первый боковой луч, отстоящий на 2,32° от главного, может оказаться направленным на облако. В таком случае (если $A \approx -15$ дБ, а $Z > 1{,}8 \cdot 10^4$ мм^6/м^3) возможен прием сигнала, отраженного от облака при облучении его боковым лепестком. Это приведет к тому, что радиоэхо, принятое боковым лепестком, воспроизведется на развертке ИДВ, угловое положение которой соответствует главному лепестку.

До тех пор пока боковой луч при своем сканировании в вертикальной плоскости будет облучать зону облака с $Z \geqslant 1{,}8 \times 10^4$ мм^6/м^3, можно наблюдать радиоэхо, расположенное выше H_1 на $\Delta H = \varphi(R)$. Расчетные значения $\Delta H = \varphi(R)$ для ПРВ-10 и МРЛ-1 приведены в табл. 1. Так, если зона облака с $Z = 1{,}8 \times 10^4$ мм^6/м^3 простирается до 8 км, а удаление ее составляет

Таблица 1

Расчетные значения $\Delta H = \varphi(R)$ для ПРВ-10 и МРЛ-1 (км)

R км	ПРВ-10	МРЛ-1	R км	ПРВ-10	МРЛ-1
50	2,1	1,1	150	6,2	4,0
100	4,1	2,6	200	8,3	5,5

50 км, тогда $\Delta H = 6{,}2$ км и, следовательно, радиоэхо такого облака должно быть заметно до высоты $8+6{,}2=14{,}2$ км. Количественные измерения эхо-сигналов ПРВ-10 не производит, однако в случаях когда $H_в \geqslant 14 \div 15$ км, по зависимости $Z_{1\,min} = \psi(R)$ (кривая *В* на рис. 1) возможно установить примерное значение отражаемости облака.

Аналогичное явление, вероятно, присутствует при проведении наблюдений на МРЛ-1. Теоретические расчеты показывают, что

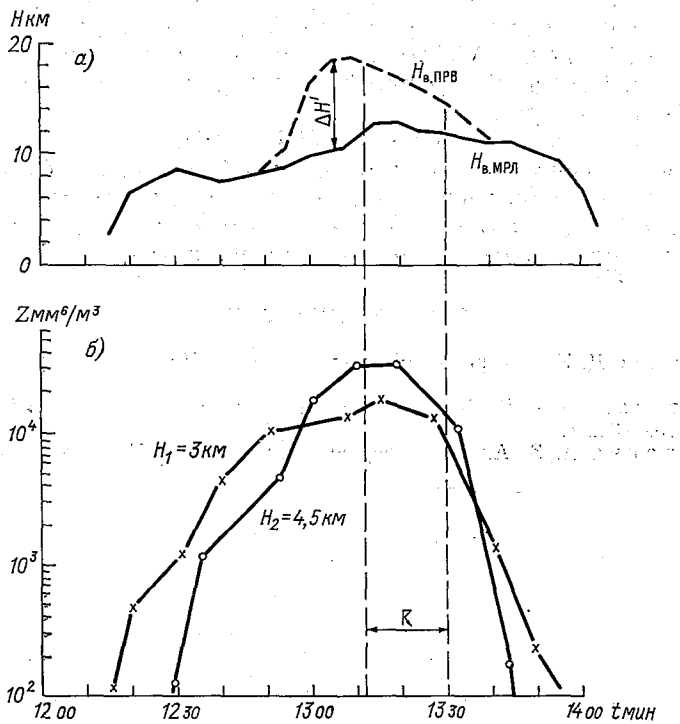


Рис. 2. Эволюция параметров радиоэха высоты $H_в$ (*а*) и отражаемости Z_{max} (*б*) грозового облака по данным ПРВ-10 и МРЛ-1.

для обнаружения метеоцели на $R = 50$ км первым боковым лепестком МРЛ-1 отражаемость $Z_{1\,min}$ (при $A_1 = -20$ дБ) должна быть не менее $5 \cdot 10^3$ мм⁶/м³. В этом случае имеет место ослабление радиоволн на 3—5 дБ при протяженности зоны с Z_{max}, равной 10—15 км. Однако и здесь возможно обнаружение цели первым боковым лепестком, так как в грозовых облаках нередко $Z \geqslant 10^4$ мм⁶/м³. Проверка этого требует постановки эксперимента измерений $H_в$ МРЛ совместно с самолетом.

Определим взаимосвязь между значениями изменений параметров радио-эха облака Cb на уровнях 3 и 4,5 км по данным МРЛ-1

и значениями высот, устанавливаемых ПРВ-10, на примере наблюдений 26 VII 1975 г. (рис. 2). Обозначим расхождение в определении высоты облака с помощью МРЛ-1 и ПРВ-10 через $\Delta H'$. Радиоэхо внутримассового очага появилось в 12 ч 11 мин на $R = 90$ км. С 13 ч 12 мин до 13 ч 30 мин радиолокатором П-12 в нем регистрировались атмосферные разряды.

Видно, что с 12 ч 45 мин ПРВ-10 начала показывать завышенные значения высоты облака, когда Z_{max} достигала 10^4 мм^6/м^3 на уровне 3 км. На дальнейшем увеличении $\Delta H'$ сказывается изменение положения по вертикали зоны с Z_{max} в процессе эволюции облака. Ход изменения $\Delta H'$ аналогичен ходу изменения Z_{max} на высоте 4,5 км. В 13 ч 40 мин при $Z_{max} < 10^4$ мм^6/м^3 разница в показаниях высоты исчезает.

Следовательно, появление на ИДВ ПРВ-10 «столбов» радиоэха является свидетельством того, что облако имеет большую отражаемость и принадлежит к грозовым. Согласно рекомендации, приведенной в [1], высоту радиоэха таких облаков можно ограничить основанием завышающего столба радиоэха.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Атлас Д. Успехи радарной метеорологии.— Л.: Гидрометеоиздат, 1967.— 193 с.
2. Степаненко В. Д. Радиолокация в метеорологии.— Л.: Гидрометеоиздат, 1973.— 342 с.
3. Фрадин А. З. Антенны сверхвысоких частот.— М.: Сов. радио, 1957.— 352 с.

Г. Б. Брылев, А. В. Рыжков

ОШИБКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГРАНИЦ ОБЛАКОВ РАДИОЛОКАЦИОННЫМ МЕТОДОМ

Точность измерения радиолокационных характеристик метеорологических объектов при дистанционном радиолокационном зондировании атмосферы определяется главным образом условиями атмосферной рефракции, разрешающей способностью радиолокатора и его метеорологическим потенциалом. В данной работе проводится анализ ошибок при радиолокационном измерении такой важной в практике штормоповещения и обслуживания авиации характеристики, как верхняя граница облаков.

В литературе имеется несколько работ (например, [1—3]), в которых этот вопрос рассматривается с разной степенью строгости. Однако в практике оперативной работы воспользоваться результатами данных исследований не представляется возможным.

В [2] упрощенно рассматривалась ошибка определения высоты верхней границы облака Δh, обусловленная конечностью ширины луча и потенциала МРЛ, на основании весьма грубых оценок коэффициента заполнения радиолокационного объема облачной средой. Фактически предполагалось, что диаграмма направленности антенны имеет вид прямоугольника, а облако обладает резкой границей в виде уступа. Хотя исследование в [2] проводилось с учетом метеорологического потенциала станции $\Pi_м$ и реальных величин отражаемости на границах облака, в конце концов авторы пришли к выводу, что указанная ошибка определяется соотношением $\Delta h = -{}^1/_2 R\theta_0$ (R — дальность, θ_0 — ширина антенного луча), т. е. имеет место занижение действительной высоты облака на половину ширины луча антенны. Сопоставление расчетных данных с самолетными измерениями в [2] показало, что данные теории и эксперимента совершенно не согласуются (это отчасти можно отнести за счет несовершенства методики эксперимента).

Автор [3] при анализе учитывал высотную зависимость отражаемости $Z(h)$ в облаке и форму диаграммы направленности МРЛС вместе с боковыми лепестками. Были получены осредненные МРЛС профили отражаемости в облаке $Z_{эф}(h)$ для некоторых идеализированных моделей облаков с параметрами, типичными

для «американских» гроз. Из полученных профилей следовало, что ошибки Δh могут быть существенными [1]. Тем не менее эта работа в целом носит чисто иллюстративный характер.

Целью нашего исследования было провести более строгий и всесторонний анализ величины Δh и выяснить, как влияют на точность определения верхней границы облака на различных дальностях параметры радиолокатора: метеопотенциал станции $\Pi_м$, длина волны λ и связанная с ней ширина главного лепестка диаграммы направленности, уровень боковых лепестков и параметры облака Z_{max}, градиент отражаемости dZ/dh на границе. Предполагалось получить достаточно простые формулы расчета ошибки Δh, по которым можно рассчитать таблицы поправок, пригодные для использования в оперативной работе.

Вследствие конечной ширины диаграммы направленности МРЛС фиксирует некое усредненное распределение отражаемости $Z_{эф}(x, y)$ в вертикальном сечении xy на фиксированном удалении облака от РЛС, которое связано с действительным распределением отражаемости $Z(x, y)$ в облаке соотношением

$$Z_{эф}(x, y)=\frac{\iint\limits_{-\infty}^{\infty} I^2(x-x', y-y')\, Z(x', y')\, dx'dy'}{\iint\limits_{-\infty}^{\infty} I^2(x', y')\, dx'\, dy'}. \qquad (1)$$

В (2) I^2 характеризует распределение квадрата интенсивности поля, излучаемого антенной в сечении xy, которое можно для достаточно больших дальностей считать радиально симметричным:

$$I^2=I^2_{гл}+I^2_{бок}, \qquad (2)$$

где

$$I^2_{гл}=e^{-\frac{r^2}{r_0^2}}, \qquad I^2_{бок}=Ae^{-\frac{(r-a)^2}{r_a^2}},$$

$$r=[(x-x')^2+(y-y')^2]^{1/2}.$$

Выражение (2) соответствует осесимметричной диаграмме направленности, квадрат которой с учетом основного и первого бокового лепестков имеет следующий вид:

$$\frac{G^2(\theta)}{G^2(0)}=e^{-5{,}6\left(\frac{\theta}{\theta_0}\right)^2}+Ae^{-22{,}4\left(\frac{\theta-2\theta_0}{\theta_0}\right)^2}, \qquad (3)$$

где θ_0 — ширина главного лепестка по уровню половинной мощности, а A характеризует уровень первого бокового лепестка. Соответственно в формуле (2)

$$r_0=\frac{R\theta_0}{2{,}4}, \quad a=2R\theta_0, \quad r_a=\frac{r_0}{2}=\frac{R\theta_0}{4{,}8}. \qquad (4)$$

Характерные размеры r_0, a и r_a для МРЛ-2 на различных расстояниях приведены в табл. 1. Строго говоря, формула (2) спра-

Таблица 1

Размеры сечения луча антенны на различных удалениях (км)

R	50	100	150	200	250	300
r_0	0,27	0,55	0,82	1,10	1,38	1,65
a	1,3	2,6	3,9	5,2	6,5	7,8
r_a	0,14	0,27	0,41	0,55	0,69	0,83

ведлива, если луч радиолокатора не касается поверхности земли, что ограничивает наше рассмотрение метеообъектами, расположенными достаточно высоко над поверхностью земли. Высота их превышает значение

$$h=\left(\frac{R}{\sqrt{2a_{эф}}}-\sqrt{h_0}\right)^2+\frac{R\theta_0}{2}, \tag{5}$$

где $a_{эф}=8500$ км — величина эффективного радиуса земли для случая стандартной рефракции, h_0 — высота расположения антенны РЛС. При $\theta_0=44'$, $h_0=70$ м, $a_{эф}=8500$ км, $R=300$ км из (5) $h\approx 6{,}1$ км.

В силу того, что I^2 представляется суммой $I^2_{гл}$ и $I^2_{бок}$ $Z_{эф}(x, y)$ также выражается суммой вкладов главного $Z_{эф.\,гл}$ и бокового $Z_{эф.\,бок}$ лепестков.

Оценим аналитически

$$Z_{эф.\,гл}(x, y)=\frac{\iint\limits_{-\infty}^{\infty} I^2_{гл}(x-x', y-y')\,Z(x', y')\,dx'\,dy'}{\iint\limits_{-\infty}^{\infty} I^2(x', y')\,dx'\,dy'}. \tag{6}$$

Нетрудно показать, что

$$\iint\limits_{-\infty}^{\infty} I^2\,dx\,dy\approx\iint\limits_{-\infty}^{\infty} I^2_{гл}\,dx\,dy=\pi r_0^2.$$

При вычислении интеграла в числителе (6) будем считать облако однородным по горизонтальной координате y. Вертикальный профиль действительной отражаемости в облаке $Z(x)$ зададим функцией следующего вида (рис. 1):

$$Z=\begin{cases} Z_{max} & \text{при } x<0, \\ Z_{max}\exp\left(-\frac{x^2}{\rho^2}\right) & \text{при } x>0. \end{cases} \tag{7}$$

Анализ значений $Z(h)$ реальных облаков, полученных в различных экспериментах, показывает, что подавляющее большинство облаков имеет сравнительно плоскую вершину и убывание отражаемости вблизи верхней границы, близкое к гауссову (а не к линейному и не экспоненциальному), что и учтено при выборе аппроксимации (7).

Подстановка (2) и (7) в (6) дает

$$Z_{\text{эф. гл}}(x)=\frac{Z_{\max}}{2}\left\{1-\Phi\left(\frac{x}{r_0}\right)+\frac{e^{-\frac{x^2}{\rho^2}\frac{1}{1+\tau^2}}}{\sqrt{1+\tau^2}}\left[1+\Phi\left(\frac{x}{r_0\sqrt{1+\tau^2}}\right)\right]\right\}, \tag{8}$$

где

$$\tau=\frac{r_0}{\rho}, \qquad \Phi(\xi)=\frac{2}{\sqrt{\pi}}\int_0^{\xi}e^{-t^2}\,dt.$$

Функция $\Phi(\xi)$ изменяется от 0 до 1 при увеличении ξ от 0 до ∞ и имеет асимптотическое представление

$$\Phi(\xi)=1-\frac{1}{\sqrt{\pi}}\frac{e^{-\xi^2}}{\xi}+\frac{1}{2\sqrt{\pi}}\frac{e^{-\xi^2}}{\xi^3}+\ldots \tag{9}$$

при больших ξ.

При $x=0$

$$Z_{\text{эф. гл}}(0)=\frac{Z_{\max}}{2}\left(1+\frac{1}{\sqrt{1+\tau^2}}\right), \tag{10}$$

а при $x\to\infty$

$$Z_{\text{эф. гл}}(x)\approx Z_{\max}\frac{1}{\sqrt{1+\tau^2}}e^{-\frac{x^2}{\rho^2}\frac{1}{1+\tau^2}}. \tag{11}$$

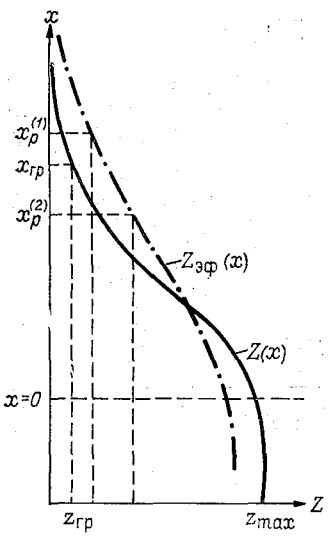


Рис. 1. Действительный $Z(x)$ и усредненный МРЛ $Z_{эф}(x)$ профили отражаемости в облаке.

Очевидно, что усредненный МРЛ профиль $Z_{эф}(x)$ отличается от истинного $Z(x)$ большей сглаженностью и расплывчатостью границы облака (рис. 1). При этом искажение формы профиля, обусловленное конечной шириной луча, возрастает с увеличением дальности R.

Пусть $x_{гр}$ — действительная граница облака, соответствующая условно выбранному уровню $Z_{гр}$, тогда из (7) следует, что

$$x_{гр}=\rho\left[\ln\frac{Z_{\max}}{Z_{гр}}\right]^{1/2}. \tag{12}$$

Границы облака $x_р$, фиксируемая МРЛ на удалении R, определяется как ордината пересечения профиля $Z_{эф}(R)$ с прямой $Z=Z_{\min\,обн}(\Pi_м, R)=\frac{R^2}{\Pi_м}$ и в зависимости от R и $\Pi_м$ может быть как больше $x_{гр}$ ($x_р^{(1)}$ на рис. 1), так и меньше $x_{гр}$ ($x_р^{(2)}$ на рис. 1). Знак ошибки радиолокационного измерения границы облака $\Delta x=$

$= x_р - x_{гр}$ зависит от того, какой из эффектов превалирует: эффект конечной ширины луча, приводящий к систематическому завышению $x_р$, или эффект потери чувствительности радиолокатора на больших расстояниях, приводящий к занижению $x_р$ по сравнению с истинной границей $x_{гр}$. В общем случае величина Δx является весьма сложной функцией R, $П_м$, ρ, Z_{max}, $Z_{гр}$ и $\theta_0(\lambda)$.

Для нахождения Δx необходимо определить $x_р$ из трансцендентного уравнения

$$Z_{эф.\ гл}(x_р) = Z_{min\ обн}(R,\ П_м). \tag{13}$$

При $\rho \to 0$ $(\tau \to \infty)$, когда облако имеет очень резко очерченную границу,

$$Z_{эф.\ гл}(x) \approx \frac{Z_{max}}{2}\left[1 - \Phi\left(\frac{x}{r_0}\right)\right]. \tag{14}$$

В этом случае уравнение (13) следует решать графически.

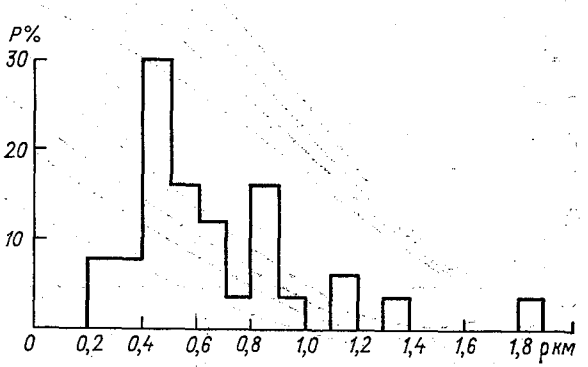


Рис. 2. Гистограмма частоты повторяемости значений ρ для облаков, наблюдаемых в Ленинградской обл. (число случаев $N=60$).

В противоположной ситуации, когда τ мало, можно приближенно считать, что при $x > r_0$ $Z_{эф.\ гл}(x)$ дается формулой (11) и для корня (13) имеем выражение

$$x_р = \rho\sqrt{1+\tau^2}\left[\ln\frac{Z_{max}}{Z_{min\ обн}(R,\ П_м)\sqrt{1+\tau^2}}\right]^{1/2}. \tag{15}$$

При $\tau \approx 2 \div 4$, когда выражение (8) не поддается упрощению, уравнение (13) решается только численно или графически.

На основании формул (8), (12) и (15) в работе были рассчитаны таблицы $\Delta x(R)$ для широкого диапазона изменений параметров МРЛ и облачности. При расчете $\Delta x = x_р - x_{гр}$ значения метеорологического потенциала станции изменялись в пределах от 47 до 57 дБ, характерных для МРЛ-2; значения θ_0 принимались равными 13′ и 44′. Для определения области изменения параметров

облаков Z_{max} и ρ был произведен анализ данных радиолокационных наблюдений облачности в ближней зоне в Ленинградской обл. (пос. Воейково) за 1976—1977 гг. Значение ρ оценивалось по значению градиентов отражаемости на верхней границе облака: $\rho \approx \approx Z_{max} \Big/ \frac{dz}{dh}$. Гистограммы повторяемости различных значений ρ приведены на рис. 2, из которых следует, что для Ленинградской обл. ρ изменяется от 0,2 до 2,5 км. При расчетах предполагалось,

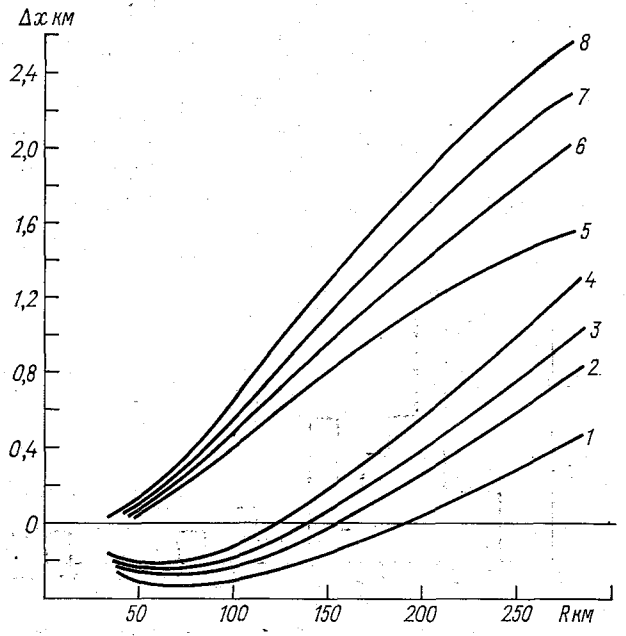


Рис. 3. Зависимости ошибки Δx от расстояния R для различных ρ, $\lg Z_{max}$ и $П_м$.

Кривая	1	2	3	4	5	6	7	8
ρ км	1	1	1	1	0,4	0,4	0,4	0,4
$\lg Z_{max}$	2	2	3	3	2	2	3	3
$П_м$ дБ	50	56	50	56	50	56	50	56

что $\lg Z_{max}$ изменяется от 1 до 3, R — от 30 до 300 км, а под $Z_{гр}$ подразумевалось значение $Z_{min\ обн}$ ($П_м$, $R = 15$ км).

Для $\tau = \frac{r_0}{\rho} < 3$ расчет Δx производился по формуле

$$\Delta x = 1{,}52\rho \left\{ \sqrt{1+\tau^2} \left[\lg Z_{max} - \lg Z_{min\ обн}(R,\ П_м) - \lg \sqrt{1+\tau^2} \right]^{1/2} - \right.$$
$$\left. - \left[\lg Z_{max} - \lg Z_{min\ обн}(П_м,\ R = 15\ км) \right]^{1/2} \right\}, \qquad (16)$$

вытекающей из соотношений (12) и (15).

Условие $\tau < 3$ выполняется при $\theta_0 = 13'$ практически на всех расстояниях вплоть до 300 км. Для МРЛ-2 неравенство $\tau < 3$, как следует из табл. 1, имеет место для $\rho = 0{,}2$ км лишь при $R <$

<100 км, для $\rho = 0{,}4$ км при $R<200$ км. На расстояниях, превышающих указанные для заданных ρ, значение $x_р$ находилась графически из соотношений (8) и (13).

На рис. 3 изображены типичные кривые $\Delta x = \Delta x(R)$, из которых следует, что величина Δx определяется главным образом параметром ρ. С увеличением ρ алгебраическая величина Δx уменьшается. Поскольку, как было указано выше, параметр ρ обратно пропорционален градиенту отражаемости $\frac{dZ}{dh}$ на верхней границе облака, то при бо́льших градиентах происходит большее завышение верхней границы облака МРЛ. Величины Z_{max} и $П_м$ влияют на Δx в гораздо меньшей степени. С увеличением Z_{max} и $П_м$ величина Δx растет.

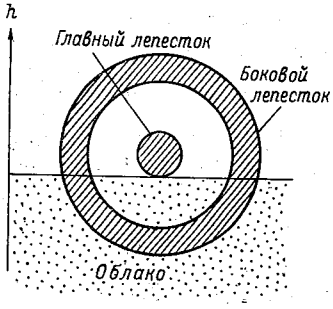


Рис. 4. К оценке влияния бокового лепестка на измерение Δx.

Оценим влияние бокового лепестка. Аналитические расчеты здесь провести практически невозможно, так как $Z_{эф.\ бок}$ существенным образом зависит от формы облака и распределения отражаемости в нем. Кроме того, на достаточно больших расстояниях необходимо учитывать отражения от земли по боковому лепестку. На основе грубых допущений можно дать лишь верхнюю оценку $Z_{эф.\ бок}$. Действительно, можно условно считать это влияние вклада бокового лепестка на точность измерения верхней границы облака максимально при взаимном расположении границы облака и сечения диаграммы направленности, указанном на рис. 4. В этом положении главный лепесток дает уже пренебрежимо малый вклад в отраженный радиолокационный сигнал.

При оценке значения $Z_{эф.\ бок}$ для простоты предположим, что $Z(x<0,\ y) = Z_{max} = \text{const}$. Тогда с учетом (2), (4)

$$Z_{эф.\ бок} \leqslant \frac{A}{2} Z_{max} \frac{\int\limits_0^\infty I^2_{бок}(r)\, r\, dr}{\int\limits_0^\infty I^2_{гл}(r)\, r\, dr} = \sqrt{\pi}\, \frac{a r_a}{r_0^2} A Z_{max} \approx 4{,}25 A Z_{max}. \quad (17)$$

Следовательно, влияние бокового лепестка можно не учитывать, если

$$4{,}25 A Z_{max} < Z_{min\ обн}(R,\ П_м). \quad (18)$$

При мощности излучения в боковом лепестке от -17 до -25 дБ относительно максимума в главном лепестке величина A изменяется от 10^{-5} до $4\cdot10^{-4}$. Для $A = 4\cdot10^{-4}$, $\lg Z_{max} = 2$, $П_м = 47$ дБ неравенство выполняется при $R \geqslant 100$ км.

На основании таблиц и графиков, рассчитанных по формулам и приведенным в данной работе, оператор МРЛ имеет

Ленинградский
Гидрометеорологический ин-т
БИБЛИОТЕКА

возможность оценивать поправку Δx на любых дальностях до 300 км по известным значениям $\Pi_м$, Z_{max} и ρ.

Величины Z_{max} и ρ наиболее удобно определять по контурам изоэха на экране ИДВ. Величину Z_{max} следует выбирать равной значению максимальной отражаемости Z в самом верхнем из максимумов, если их несколько. Если система многоконтурного изоэха представлена контурами, соответствующими изменению отражаемости на 6 дБ (что имеет место в МРЛ-2), то значение ρ может быть вычислено следующим образом:

1) по ИДВ оценивается разность высот H верхней точки контура максимального радиоэха Z_{max} и верхней точки третьего контура, отсчитываемого от контура максимальной отражаемости (соответствующего падению Z на 18 дБ);

2) находится значение $\rho_{эф} \approx \frac{\Delta H}{2}$;

3) величина ρ выражается через величины $\rho_{эф}$ и r_0 (рассчитанную по R и 0_0 (4)) по формуле

$$\rho = \sqrt{\rho_{эф}^2 - r_0^2}. \qquad (19)$$

Исходя из полученных значений Z_{max} и ρ, можно оценить наиболее вероятные погрешности измерения Δx по рис. 3 и расчетным таблицам, которые будут опубликованы в методическом письме.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Атлас Д. Успехи радарной метеорологии.— Л.: Гидрометеоиздат, 1967.
2. Петрушевский В. А., Сальман Е. М. Определение высоты кучево-дождевых облаков радиолокационным методом.— Труды ГГО, 1964, вып. 159, с. 48.
3. Donaldson R. J. Jr. Resolution of radar antenna for distributed targets.— J. Appl. Met., 1964, vol. 3, N 5, p. 611—623.

Л. П. Бобылев, И. А. Тарабукин, Г. Г. Щукин

ХАРАКТЕРИСТИКИ РАДИОТЕПЛОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ И ПОГЛОЩЕНИЯ ОБЛАЧНОЙ АТМОСФЕРЫ

1. Применение статистических методов для решения задачи радиотеплолокационного определения влагосодержания облачной атмосферы предполагает привлечение априорной информации о метеопараметрах атмосферы и характеристиках ее поглощения и излучения в радиодиапазоне ($\lambda = 0{,}2 \div 3$ см) [3]. При этом, если априорную информацию о метеопараметрах атмосферы и облаков можно получить с помощью статистической обработки данных аэрологического и самолетного зондирования, то получить аналогичную информацию о характеристиках поглощения и излучения с помощью экспериментальных измерений достаточно сложно. Это связано с отсутствием радиотенлолокационной аппаратуры, перекрывающей весь интересующий нас спектральный диапазон, и с трудностями организации длительных многоволновых радиометрических наблюдений. Однако эту информацию можно получить путем модельных расчетов на основании априорных статистических метеорологических данных. Некоторые результаты подобных расчетов и приводятся в предлагаемой работе. При этом адекватность модельных статистических оценок характеристик поглощения и излучения облачной атмосферы их реальным значениям может быть проверена с помощью проведения экспериментальных измерений на нескольких выбранных длинах волн, что может явиться, по мнению авторов, продолжением настоящей работы.

2. Модельные расчеты характеристик радиотеплового излучения выполнены для двух существенно различных классов облаков — слоистообразных и конвективных (кучевых). Для первого класса облаков использованы статистические модели облачной атмосферы, изложенные в [4]. Эти модели являются эмпирическими и представляют собой совокупность средних климатических значений и средних квадратических отклонений (СКО) вертикальных профилей давления, температуры и влажности, высоты нижней границы облаков (ВНГО), их мощности и водности. В связи со значительной горизонтальной протяженностью и достаточной однородностью, а также сравнительно большим временем существования слоистообразных облаков создание таких моделей для

использования их при разработке радиотеплолокационных методов определения влагосодержания атмосферы является обоснованным и целесообразным. К тому же для этого класса облаков накоплен сравнительно большой экспериментальный материал об их параметрах [4, 8].

Исходным материалом для составления указанных моделей послужили данные радиозондирования в пос. Воейково (Ленинградская обл.) за период 1959—1974 гг., данные самолетного зондирования для районов Ленинградской обл. и Риги за период 1959—1966 гг. и данные, приведенные в обзоре [4]. За основу систематизации исходного материала принята обычная морфологическая классификация облаков по формам. Кроме этого, модели классифицированы по сезонам и относятся к дневной половине суток. В данной работе рассмотрены только два сезона: лето и осень. Водность слоистообразных облаков при модельных расчетах считается не зависящей от высоты.

Рассмотренные в [3] методы оценивания интегральных параметров влагосодержания облачной атмосферы применимы к облакам, не дающим осадков. Однако расчеты характеристик радиотеплового излучения выполнены и для слоисто-дождевых облаков Ns. Это вызвано двумя причинами: 1) необходимостью проведения оценки возможностей рассматриваемых методов при зондировании облаков с существенным водозапасом, каким обладают Ns; 2) целесообразностью получения данных об излучении и поглощении этих облаков в связи с разработкой в дальнейшем активно-пассивных радиолокационных методов исследования влагосодержания атмосферы при наличии облачности, дающей осадки.

Данные по водности слоистообразных облаков заимствованы из работы [8]. В этой работе представлены результаты районирования величин водности для территории СССР. При составлении рассматриваемых моделей использованы данные по I району, к которому относится Карелия, Ленинградская обл., Прибалтика и Белоруссия. Для оценки СКО водности были использованы подробные исследования горизонтальной неоднородности водности слоистообразных облаков, выполненные В. Е. Мииервиным [12]. Для каждой из 18 групп измерений (всего измерений 161) определены групповые средние значения и СКО водности. При подсчете общей дисперсии водности как суммы внутригрупповой и межгрупповой дисперсий [7] оказалось, что отношение общего СКО к общей средней водности равно примерно 0,8. Это отношение ($\sigma_w \approx \approx 0{,}8\overline{w}$) и использовано при расчете СКО водности для различных моделей слоистообразных облаков. Эту оценку, разумеется, нужно считать приближенной.

Средние климатические значения и СКО ВНГО и мощности облаков для теплого полугодия были получены в результате статистической обработки данных самолетного зондирования.

Кучевые облака, как правило, являются элементами облачных полей, занимающих площади от десятков до сотен тысяч квадрат-

ных километров [16]. Такие важные для рассматриваемой задачи параметры, как водность, горизонтальные и вертикальные размеры, являются существенно различными для разных облаков конкретного облачного поля. К тому же кучевые облака — динамичные системы; их время жизни составляет от 10—20 мин для Cu hum до 40—60 мин для крупных Cu cong [16, 11]. Все это заставляет отказаться от попыток создания аналогичных статистических моделей для конвективной облачности, а для расчета характеристик радиотеплового излучения использовать подходящие гидродинамические модели облачной конвекции. В данной работе использована стационарная струйная модель [9]. В настоящее время струйные модели с использованием гипотезы Тейлора широко развиваются как в СССР, так и за рубежом. Модели этого типа приняты в качестве рабочих в программах модификации облачности во Флориде и Пенсильвании (США) [9].

Исходными данными для расчета струи являются: 1) вертикальные профили температуры, давления и влажности; 2) значение ВНГО; 3) диаметр струи и начальные значения вертикальной скорости и перегрева на нижней границе. Использование в качестве вертикальных профилей метеопараметров средних климатических профилей для июля, соответствующих ситуациям, когда наблюдались кучевые (Cu hum и Cu med) и кучево-дождевые (Cu cong) облака [4], позволило рассчитать с помощью стационарной струйной модели наиболее вероятные значения характеристик всех трех типов Cu.

Наиболее вероятные значения ВНГО ($\tilde{z}_н$ в м) оценены по формуле из [16]:

$$\tilde{z}_н = -A \lg \overline{f}_0 + B, \qquad (1)$$

где $\overline{f}_0$ — среднее климатическое значение относительной влажности у поверхности земли, выраженное в долях единицы. Согласно работе [14] для Ленинградской обл. $A = 4000$ м и $B = 200$ м.

В соответствии с общепринятой классификацией Cu [11] считается, что горизонтальные размеры равны: 0,5—1 км для Cu hum, 1—2 км для Cu med и 2—5 км для Cu cong. Это позволяет оценить наиболее вероятные значения диаметров облаков на нижней границе: 0,75 км для Cu hum, 1,5 км для Cu med и 3,5 км для Cu cong. Исходя из этого, а также из того обстоятельства, что горизонтальные размеры и мощность Cu в среднем близки друг к другу [11], для наиболее вероятных значений мощности кучевых облаков можно взять те же оценки, что и для их диаметров.

Для оценки пределов изменения водозапаса Cu использована эмпирическая формула для средней водности ($\overline{w}$ в г/м^3) кучевых облаков в зависимости от их мощности (Δz в км) [5, 15]:

$$\overline{w} \approx 0{,}34 \Delta z. \qquad (2)$$

Эти пределы равны: 0,03—0,34 кг/м^2 для Cu hum, 0,34—1,36 кг/м^2 для Cu med и 1,36—8,50 кг/м^2 для Cu cong.

Вертикальные профили водности, рассчитанные по струйной модели, дают завышенные, по сравнению с наблюдаемыми, значения. В работе [1] отмечается, что если для слоистообразных облаков влияние профиля водности на значение радиояркостной температуры пренебрежимо мало, то для Cu cong оно может быть существенным. Поэтому для расчетов характеристик радиотеплового излучения Cu были взяты экспериментальные профили водности [5].

Наиболее вероятные значения водозапаса Cu, рассчитанные по струйной модели с учетом всего изложенного, оказались равными: 0,17 кг/м² для Cu hum, 0,86 кг/м² для Cu med и 4,8 кг/м² для Cu cong. Эти значения очень хорошо совпадают со средними значениями водозапаса, оцененными с помощью формулы (2).

При разработке радиотеплолокационных методов зондирования облачной атмосферы [3] требуется знание СКО водозапаса Cu (σ_W). Экспериментальных данных для определения этой величины в настоящее время недостаточно. Однако зная пределы изменения водозапаса (ΔW) и предполагая выполнение для него нормального закона распределения, можно приближенно оценить, что $\tilde{\sigma}_W \approx \Delta W/4$ [7]. Такие оценки дают 0,08 кг/м² для Cu hum, 0,26 кг/м² для Cu med и 1,78 кг/м² для Cu cong.

В табл. 1 и 2 представлены статистические характеристики метеопараметров для различных моделей облачной атмосферы. При этом использованы следующие обозначения: w — водность, W — водозапас, $z_н$ — высота НГО, Δz — мощность облаков, $T_{э.\,обл}$ — эффективная температура облаков (см. ниже), Q — интегральное содержание водяного пара в атмосфере. Всюду черта над символом означает среднее климатическое значение, волнистая линия — наиболее вероятное значение, σ — СКО.

3. Для Cu в соответствии с вышеизложенным рассчитаны лишь наиболее вероятные значения характеристик радиотеплового излучения. Существование же больших выборок данных радиозондирования и самолетного зондирования для слоистообразных облаков позволяет вычислить для них уже не только средние климатические значения аналогичных характеристик, но и их СКО. С этой целью расчеты производились по полным массивам указанных выборок (каждой модели соответствует своя выборка) с последующим осреднением результатов. При этом каждому элементу массива (конкретной совокупности вертикальных профилей метеопараметров) сопоставлялись случайным образом значения параметров облачности по формулам:

$$w_{ij} = \bar{w}_j + s_{1ij}\sigma_{w_j}, \tag{3}$$

$$z_{нij} = \bar{z}_{нj} + s_{2ij}\sigma_{z_{нj}}, \tag{4}$$

$$\Delta z_{ij} = \Delta\bar{z}_j + s_{3ij}\sigma_{\Delta z_j}, \tag{5}$$

где s_1, s_2 и s_3 — квазислучайные числа, распределенные по нормальному закону; j — номер модели; i — номер зонда.

Таблица 1

Статистические характеристики слоистообразных облаков

Модель	$\bar{z}_н$	$\sigma_{z_н}$	$\bar{\Delta z}$	$\sigma_{\Delta z}$	$\bar{w}$	σ_w	$\bar{W}$	σ_W	$\bar{Q}$	σ_Q	$\bar{T}_{э.\ обл}$	$\sigma_{Tэ.\ обл}$
	км				г/м³		кг/м²				К	
Sc (лето)	0,95	0,52	0,46	0,30	0,18	0,14	0,13	0,08	23,8	6,6	279,6	4,3
Sc (осень)	0,95	0,52	0,46	0,30	0,19	0,15	0,14	0,09	14,8	6,2	271,6	5,8
St (осень)	0,17	0,14	0,34	0,27	0,18	0,14	0,10	0,07	15,2	6,7	276,2	6,0
Ac (лето)	3,00	0,77	0,48	0,34	0,14	0,11	0,11	0,07	25,6	7,3	271,0	4,5
Ac (осень)	3,00	0,77	0,48	0,34	0,10	0,08	0,09	0,05	10,9	7,4	258,0	9,1
Ns (осень)	0,88	0,72	2,00	1,07	0,19	0,15	0,58	0,34	18,0	6,4	268,6	5,8

Таблица 2

Статистические характеристики безоблачной атмосферы и кучевых облаков

Модель	$\tilde{z}_н$	$\tilde{\Delta z}$	Пределы изменения W	$\tilde{W}$	$\tilde{\sigma}_W$	$\bar{Q}$	σ_Q	$\tilde{T}_{э.\ обл.}$
	км		кг/м²					К
Безоблачно (лето)	—	—	—	—	—	19,5	6,7	—
Cu hum	1,15	0,75	0,03—0,34	0,17	0,08	28,9	—	277
Cu med	1,15	1,5	0,34—1,36	0,86	0,26	28,9	—	274
Cu cong	0,63	3,5	1,36—8,50	4,86	1,78	29,1	—	267

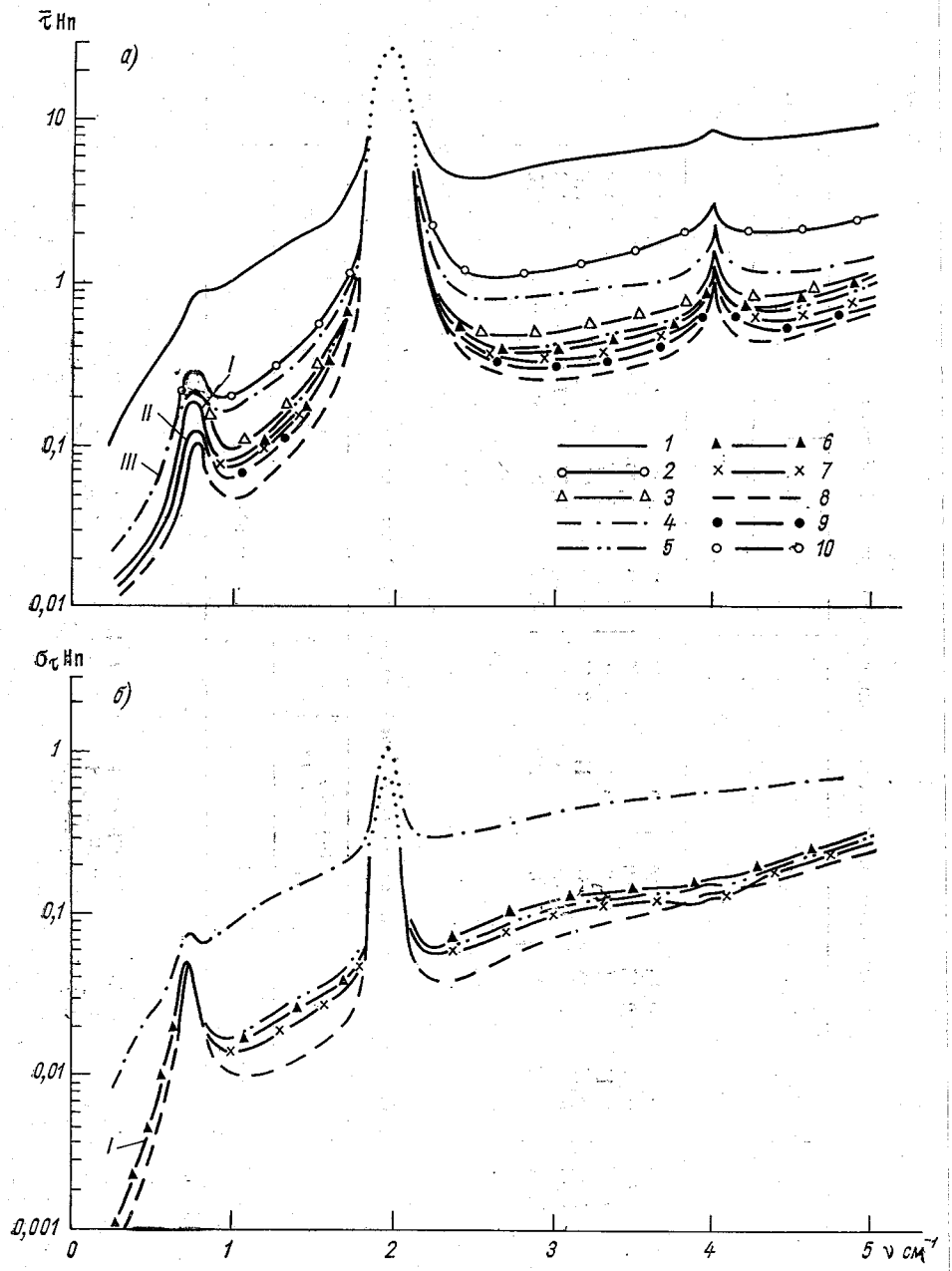
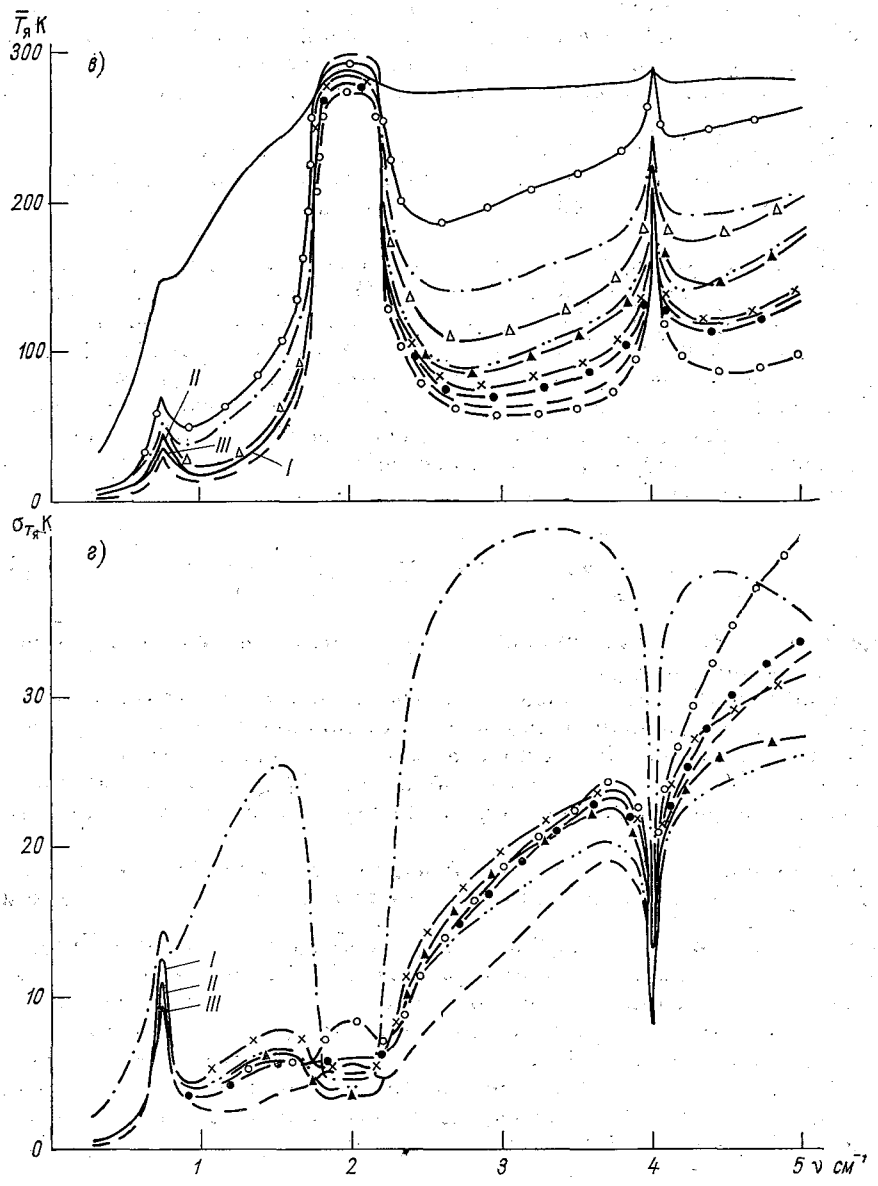


Рис. 1. Спектральные зависимости средних климатических значений оптической

Кривая	1	2	3	4
Облака	Cu cong	Cu med	Cu hum	Ns (осень)



толщины (*а*), радиояркостной температуры (*в*) и их СКО (*б* и *г*) для $\theta=0°$.

5	*6*	*7*	*8*	*9*	*10*
Ac (лето)	Sc (лето)	Sc (осень)	б/о	St (осень)	Ac (осень)

Вычисление радиояркостной температуры, оптической толщины, эффективной температуры излучения атмосферы, поправок на неизотермичность и других характеристик радиотеплового излучения выполнялось по известным формулам [2] в диапазоне длин волн $\lambda = 0{,}2 \div 3$ см и зенитных углов $\theta = 0 \div 85°$. Влияние сферичности атмосферы и рефракции радиоволн не учитывалось, так как в данном диапазоне углов оно пренебрежимо мало [6].

Интегрирование по высоте при расчетах характеристик излучения осуществлялось до 12 км в соответствии с выводами работы [13] о том, что этот слой дает основной вклад в поглощение и излучение.

Объемный коэффициент поглощения H_2O вычислялся по инженерной методике Зражевского [10], а O_2 — по полной квантовомеханической формуле [19] с формой линии по кинетическому уравнению и полушириной по Картеру—Митчеллу—Реберу [18] до значений квантового числа $N = 49$. Поглощение каплями воды в облаках рассчитывалось в приближении релеевского рассеяния [1] по методике, изложенной в [17]. Оптическая толщина жидкокапельной влаги облаков (τ_W) существенно зависит от их температуры T и имеет вид:

$$\tau_W = \int_{z_н}^{z_в} \psi\,[T(z)]\, w(z)\, dz = \psi\,(T_{э.\,обл})\, W, \qquad (6)$$

где $z_н$ и $z_в$ — границы облачности; ψ — удельный коэффициент поглощения капель воды.

Формула (6) дает определение эффективной температуры облаков $T_{э.\,обл}$. Эта величина характеризует полное поглощение радиоизлучения в облаке и, как показали расчеты, практически не зависит от длины волны. Таким образом, $T_{э.\,обл}$ является интегральным параметром, характеризующим атмосферу так же, как W и Q.

4. На рис. 1 представлены спектральные зависимости средних климатических (для Cu наиболее вероятных) значений оптической толщины $\bar{\tau}$ и радиояркостной температуры $\bar{T}_я$, а также их СКО для $\theta = 0°$.* Наблюдается большое различие в значениях этих характеристик для разных типов облачности; причем наиболее выделяются Cu cong. Их оптическая толщина для $\lambda \leqslant 0{,}6$ см в несколько раз больше 1 Нп, т. е. Cu cong на этих длинах волн близки к «черному телу». Оптическая толщина слоистообразных облаков и Cu hum практически не превышает, за исключением линий поглощения O_2, 1 Нп. Cu med занимают промежуточное положение.

---

* Тонкая структура спектра $\bar{\tau}$ и σ_τ в области резонансного поглощения O_2, центрированной на $\lambda \approx 5$ мм, не вычислялась. На рис. 1 *а, б* точками показана огибающая «оснований» линий.

Из рис. 1, *в* видно, что на длинах волн короче 0,6 см радиояркостная температура Cu cong достигает насыщения. Для других типов облаков этого не происходит во всем диапазоне длин волн, кроме линий кислорода. Различия в значениях $\overline{T}_я$ для разных моделей существенные, особенно в окнах прозрачности. Так, в диапазоне 0,3—1,7 см$^{-1}$ разность равна примерно 200 К на $\lambda \approx 0{,}67$ см,

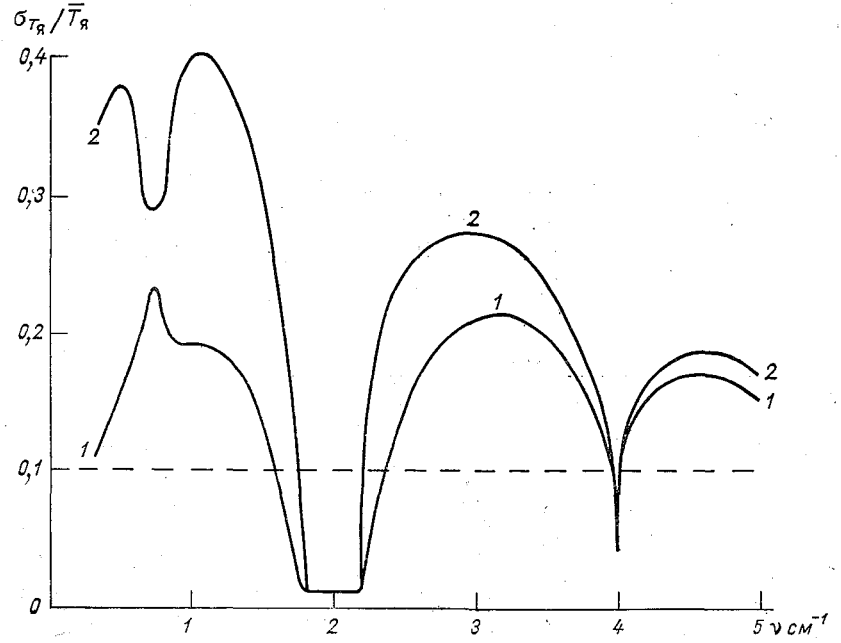


Рис. 2. Коэффициент вариации радиояркостной температуры для Sc (лето) (*1*) и Ns (осень) (*2*) для $\theta = 0°$.

в диапазоне 2,3—3,9 см$^{-1}$ разность равна примерно 220 К на $\lambda \approx$ $\approx 0{,}3$ см и в диапазоне 4,1—5 см$^{-1}$ разность равна примерно 190 К на $\lambda \approx 0{,}22$ см.

Абсолютные вариации $T_я$ в пределах отдельных моделей также велики (рис. 1 *г*). Особенно велики эти вариации для Ns в диапазонах 1—1,6; 2,4—3,8 и 4,2—5 см$^{-1}$. На $\lambda \approx 3$ мм СКО этих вариаций достигает 43 К.

Однако бóльший интерес представляют относительные вариации $T_я$, которые можно охарактеризовать величиной $\sigma_{T_я}/\overline{T}_я$. Графики зависимости этой величины от частоты для $\theta = 0°$ и двух моделей с существенно разным водозапасом Sc (лето) и Ns (осень) приведены на рис. 2. Для Sc величина $\sigma_{T_я}/\overline{T}_я$ практически не превышает 20 % во всем спектральном диапазоне. Для Ns эта величина существенно больше и достигает 40 % на $\lambda \approx 0{,}9$ см. На рис. 2

пунктиром показан 10 %-ный уровень относительной средней квадратической ошибки измерения $T_я$. Рассматривая этот уровень как «шум», а величину $\sigma_{T_я}/\overline{T}_я$ как полезный «сигнал», можно отметить, что условие эффективного измерения сигнала — отношение

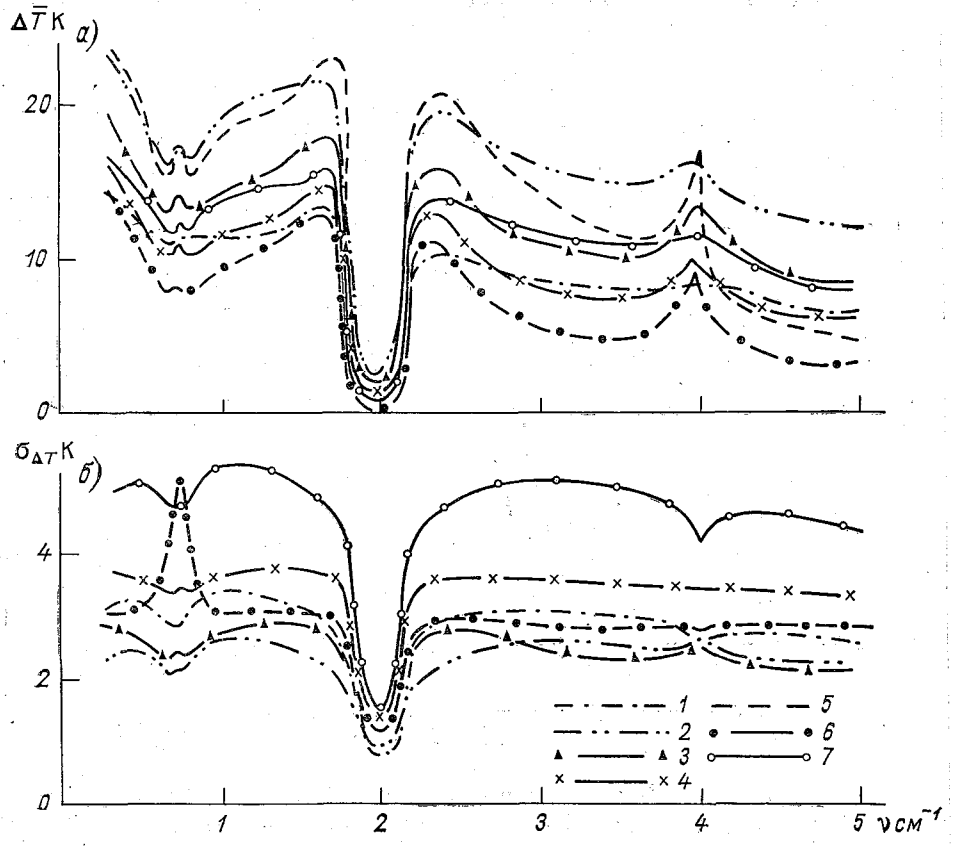


Рис. 3. Спектральные зависимости средних климатических значений поправки на неизотермичность (*а*) и ее СКО (*б*) для $\theta=\theta°$.

Кривая	1	2	3	4	5	6	7
Облака	Ns (осень)	Ac (лето)	Sc (лето)	Sc (осень)	б/о (лето)	St (осень)	Ac (осень)

сигнал/шум $\gg 1$ — в целом не выполняется при 10 %-ном уровне шума. Для уверенного измерения сигнала нужно, чтобы уровень шума, т. е. относительная средняя квадратическая ошибка радиометрического измерения $T_я$, был меньше 10 %. Только в этом случае можно получить дополнительную к средней климатической (априорной) информацию о метеопараметрах атмосферы.

При решении многих задач радиотеплолокационного зондирования облачной атмосферы требуется знание эффективной температуры $T_э$ или поправки на неизотермичность ΔT [2]. На рис. 3 представлены спектральные зависимости $\overline{\Delta T}$ и ее СКО $\sigma_{\Delta T}$ для различных моделей для $\theta = 0°$. Наблюдается существенная зависимость $\overline{\Delta T}$ и $\sigma_{\Delta T}$ от длины волны. Например, для St (осень) отношение $\overline{\Delta T}$ на длинах волн $\lambda = 3$ см и $\lambda = 0{,}2$ см равно 4,4. Существенно изменяются значения $\overline{\Delta T}$ также при переходе от модели к модели. Так, $\overline{\Delta T}$ для St (осень) и Ac (лето) различаются примерно в 4 раза на $\lambda = 0{,}2$ см и в 1,5 раза на $\lambda = 3$ см.

В окрестности линии поглощения H_2O $\lambda = 1{,}35$ см наблюдается уменьшение $\overline{\Delta T}$. Это обусловлено тем, что значительный вклад в излучение здесь дает водяной пар, сконцентрированный, как известно, в нижних слоях атмосферы. В центре линии значение ΔT немного растет, что объясняется возрастанием вклада в излучение водяного пара, находящегося на бо́льших высотах.

Угловая зависимость $\overline{T}_я$ и $\overline{\Delta T}$, а также их СКО, приведена на рис. 4 для Sc (лето) для нескольких длин волн. Угловой ход $\sigma_{T_я}$ (рис. 4 *б*) оказывается более сложным, чем ход $\overline{T}_я$. В областях с сильным поглощением (λ равно 0,2 и 0,25 см) значение $\sigma_{T_я}$ уменьшается с увеличением зенитного угла, что связано с уменьшением длины пути формирования излучения и приближением к условиям насыщения $T_я$. Обратная картина наблюдается на длинах волн с небольшим поглощением (λ равно 0,8 и 2,5 см). В данном случае путь формирования излучения растет с увеличением θ, что приводит к росту вариаций $T_я$. На $\lambda = 0{,}35$ см и $\lambda = 1{,}35$ см вариации $T_я$ вначале растут с увеличением θ до некоторого значения $\theta_н$, а затем уменьшаются. $\theta_н$ можно определить как угол, начиная с которого сказывается насыщение $T_я$.

На рис. 4 *в* показана угловая зависимость функции $\xi_\lambda(\theta)$, которая характеризует изменение поправки на неизотермичность атмосферы с изменением зенитного угла:

$$\overline{\Delta T}_\lambda(\theta) = \overline{\Delta T}_\lambda(0)\,\xi_\lambda(\theta), \tag{7}$$

а на рис. 4 *г* угловая зависимость функции $\zeta_\lambda(\theta)$ для СКО поправки на неизотермичность:

$$\sigma_{\Delta T}(\lambda, \theta) = \sigma_{\Delta T}(\lambda, 0)\,\zeta_\lambda(\theta). \tag{8}$$

Как поправка на неизотермичность, так и ее СКО монотонно уменьшаются с увеличением θ; причем тем быстрее, чем больше поглощение.

5. Важной характеристикой радиотеплового излучения облаков является их радиояркостный контраст, который представляет

собой вклад облаков в общее излучение атмосферы, приведенный к уровню поверхности земли. Можно показать, что среднее значе-

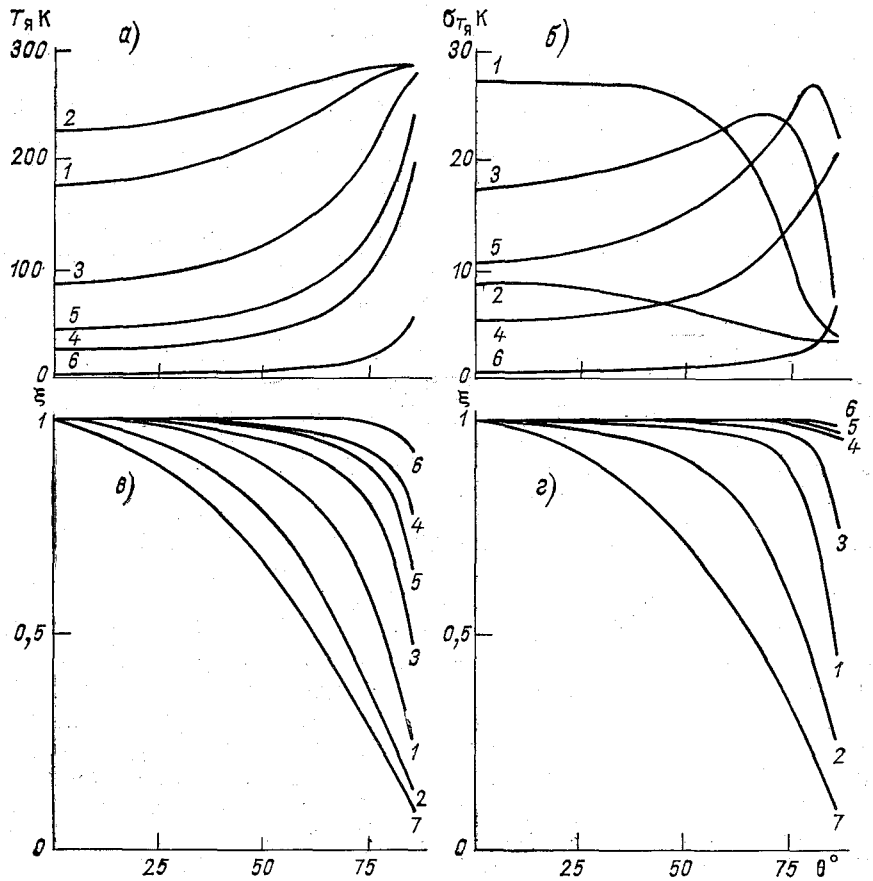


Рис. 4. Угловая зависимость характеристик излучения для Sc (лето).

Кривая	1	2	3	4	5	6	7
λ см	0,2	0,25	0,35	0,8	1,35	2,5	0,5

ние этого контраста для конкретной модели облачной атмосферы имеет вид

$$\overline{\delta T}_я \approx \overline{T}_э e^{-\sec\theta\left(\overline{\tau}_Q+\overline{\tau}_K\right)}\left(1-e^{-\sec\theta\overline{\tau}_W}\right), \qquad (9)$$

где $\overline{\tau}_Q$, $\overline{\tau}_K$ и $\overline{\tau}_W$ — средние климатические значения оптической толщины H_2O, O_2 и жидкокапельной влаги облаков. На рис. 5 представлены рассчитанные по формуле (9) значения радиояркостного контраста для различных моделей в зависимости от частоты. Контрасты слоистых облаков и Cu hum примерно одинаковы, что ука-

зывает на сложности идентификации этих типов облаков по их радиотепловому излучению. Контрасты Cu cong, Cu med и Ns существенно больше и достаточно различаются между собой. Для определения водозапаса облаков по их контрасту для слоистой облачности наиболее подходящими с учетом насыщения $T_я$ (см. ниже)

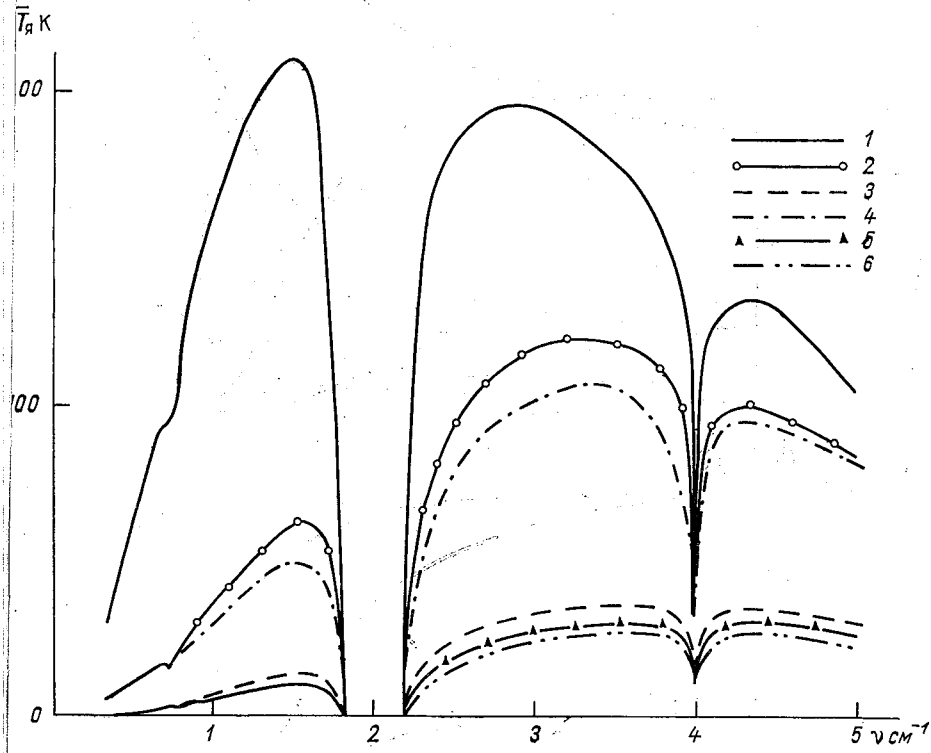


Рис. 5. Спектральная зависимость радиояркостного контраста для $\theta=0°$.

Кривая	1	2	3	4	5	6
Облака	Cu cong	Cu med	Cu hum	Ns (осень)	Sc (лето)	Ac (лето)

являются длины волн в диапазоне 3 мм, а для Cu cong и Cu med в диапазоне 0,8—3 см.

На рис. 6 показана угловая зависимость радиояркостного контраста облаков Sc (лето) и Cu cong для нескольких длин волн.

Особенности зависимости $\delta\overline{T}_я = \delta\overline{T}_я(\theta)$ определяются совокупными действиями двух факторов: увеличением радиояркостной температуры облаков и увеличением ослабления атмосферы при увеличении θ. Для Sc на длинах волн λ, равных 0,8 и 2,5 см, преобладает первый фактор и контраст растет с увеличением θ. На λ, равных 0,2 и 0,25 см, за счет сильного поглощения в H_2O и O_2

преобладает второй фактор, который уменьшает контраст при возрастании θ. Наконец, на λ, равных 0,35 и 1,35 см, кривые $\delta\overline{T}_я =$

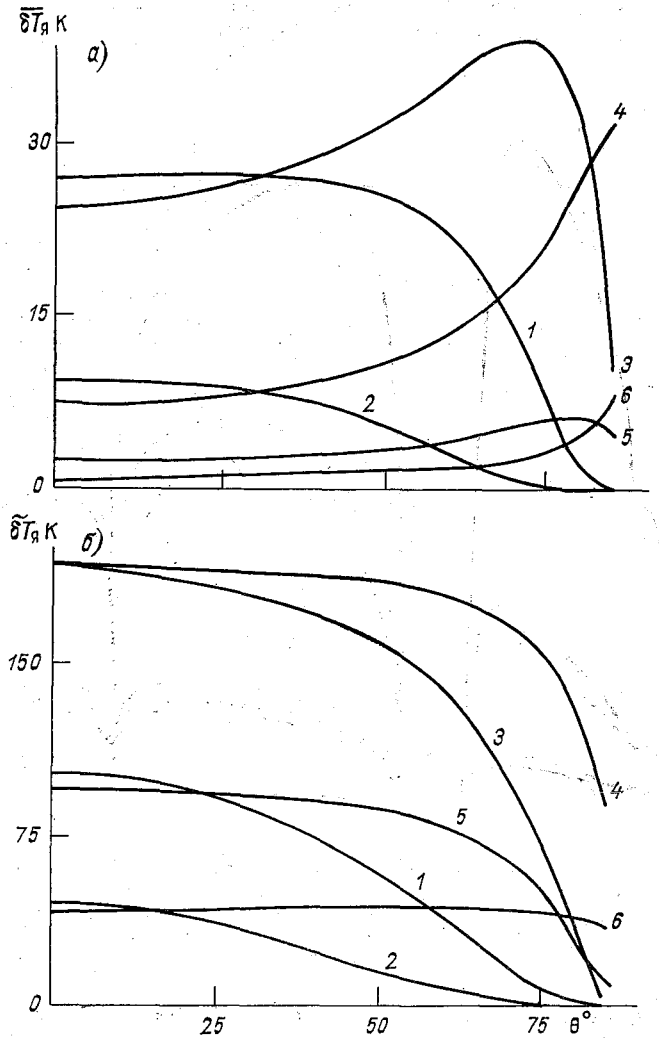


Рис. 6. Угловая зависимость радиояркостного контраста для Sc (лето) (*а*) и Cu cong (*б*).

Кривая	1	2	3	4	5	6
λ см	0,2	0,25	0,35	0,8	1,35	2,5

$= \delta\overline{T}_я(\theta)$ имеют максимум при $\theta = \theta_н$; для $\theta < \theta_н$ преобладает первый фактор, а для $\theta > \theta_н$ — второй.

Для Cu cong на всех длинах волн контраст уменьшается с увеличением угла. Это связано с тем, что Cu cong являются компакт-

ным объектом и их оптическая толщина при всех углах визирования θ практически постоянна. Поэтому влияние первого фактора не изменяется с увеличением θ, а $\delta T_я$ уменьшается за счет увеличения влияния второго фактора — поглощения атмосферы.

6. Для оценки возможностей радиотеплолокационных наблюдений с точки зрения насыщения $T_я$ были вычислены значения углов $\theta_н$, на которых это насыщение наступает. В качестве критерия насыщения взято условие $T_я = 0{,}9T_э$. Это условие приводит к формуле для угла насыщения, которая имеет вид

$$\theta_н = \begin{cases} \arccos\left[0{,}43\left(\psi W + \bar{\tau}_K + \bar{\tau}_Q\right)\right] & \text{— слоистые облака} \\ \arccos\dfrac{\bar{\tau}_Q + \bar{\tau}_K}{2{,}3 - \psi W} & \text{— Cu} \end{cases} \qquad (10)$$

(для ψ см. формулу (6)). Формула (10) имеет различный вид для слоистых облаков и Cu в соответствии с высказанным ранее предположением о независимости оптической толщины $\bar{\tau}_W$ Cu от угла их визирования.

Значения $\theta_н$ для разных типов облаков и длин волн приведены в табл. 3 (см. примечание к этой таблице). Как следует из таб-

Таблица 3

Значения зенитного угла $\theta_н$, при которых происходит «насыщение» радиояркостной температуры

λ см	0,2	0,25	0,3	0,4	0,45	0,6	0,8
Слоистые облака	59	28	74	77	39	77	85 *
Слоисто-дождевые облака	—	—	43	57	—	67	80
Cu hum	68	29	82	82	40	80	85 *
Cu med	—	—	68	77	—	77	85 *
Cu cong	—	—	—	—	—	—	51

λ см	0,9	1,2	1,35	1,5	2	3
Слоистые облака	85*	85*	85	85*	85*	85*
Слоисто-дождевые облака	83	85*	83	85*	85*	85*
Cu hum	85*	85*	85*	85*	85*	85*
Cu med	85*	85*	85*	85*	85*	85*
Cu cong	85*	85*	84	85*	85*	85*

Примечание. Тире означает, что «насыщение» радиояркостной температуры возможно во всем диапазоне зенитных углов; звездочка — «насыщение» не наступает, вероятно, и на больших углах, но для них расчеты не выполнены.

лицы, слоистые облака и Cu hum можно наблюдать практически во всем рассматриваемом диапазоне спектра. Наблюдать же

эффективно Cu cong можно лишь на $\lambda \geqslant 0{,}8$ см. Для активно-пассивных радиолокационных устройств, которые работают, как правило, при больших θ, рабочие длины волн должны быть больше 9 мм.

В заключение можно отметить следующее.

1. В работе представлен обширный материал по статистическим характеристикам радиотеплового излучения для различных моделей облачной атмосферы.

2. Выполнен анализ полученных результатов и указаны наиболее подходящие для радиотеплолокационного определения влагосодержания облачной атмосферы диапазоны спектра.

3. Показано, что для получения метеоинформации из радиотеплового излучения облачной атмосферы требуется в общем высокая точность измерения радиояркостной температуры (ошибки не должны превышать 10 %).

4. Проанализированы ограничения, накладываемые на возможные рабочие диапазоны длин волн и углов эффектами насыщения $T_я$.

5. Полученные результаты предназначены в первую очередь для использования их при разработке методов радиотеплолокационного определения влагосодержания облачной атмосферы и для оценки условий распространения радиоволн в тропосфере.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аквилонова А. Б., Кутуза Б. Г. Радиотепловое излучение облаков.— Радиотехника и электроника, 1978, т. XXIII, вып. 9, с. 1792—1806.

2. Башаринов А. Е., Гурвич А. С., Егоров С. Т. Радиоизлучение Земли как планеты.— М.: Наука, 1974.— 188 с.

3. Бобылев Л. П., Щукин Г. Г. Об использовании методов оптимальных статистических решений в задаче радиотеплолокационного определения влагосодержания облачной атмосферы.— См. наст. сб.

4. Васищева М. А., Щукин Г. Г. Экспериментальные исследования водности облаков. Статистические модели атмосферы.— Обнинск, 1977.— 94 с.

5. Войт Ф. Я., Мазин И. П. Водность кучевых облаков.— Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана, т. 8, № 11, 1972, с. 1166—1176.

6. Гайкович К. П., Наумов А. П. О влиянии сферичности Земли и рефракции радиоволн на радиоизлучение атмосферы в микроволновом диапазоне.— Радиотехника и электроника, 1979, т. XXIV, вып. 1, с. 168—171.

7. Гмурман В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика.— М.: Высшая школа, 1977.— 480 с.

8. Дубровина Л. С. Некоторые характеристики водности облаков над территорией СССР.— Труды НИИАК, 1967, вып. 44, с. 39—54.

9. Зинченко А. В. Струйные модели облачной конвекции и параметризации вовлечения.— Труды ГГО, 1974, вып. 290, с. 51—67.

10. Зражевский А. Ю. Методика расчета поглощения в атмосферных парах воды в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах.— Радиотехника и электроника, т. XXI, вып. 5, 1976, с. 951—957.

11. Кучевые облака и связанная с ними деформация полей метеоэлементов/Под ред. И. П. Мазина и С. М. Шметера.— Труды ЦАО, 1977, вып. 134.— 128 с.

12. Минервин В. Е. Флуктуации водности в облаках слоистых форм.— Труды ЦАО, 1966, вып. 72, с. 92—111.

13. Наумов А. П. К интерпретации радиоизлучения атмосферы в области спектра 5 мм.— Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана, т. 9, № 7, 1973, с. 699—707.

14. Селезнева Е. С. О границах и вертикальной мощности конвективных облаков.— Труды ГГО, 1959, вып. 93, с. 3—20.
15. Скацкий В. И. Исследование водности кучевых облаков.— Труды ИПГ, 1969, вып. 13, с. 92—96.
16. Шметер С. М. Физика конвективных облаков.— Л.: Гидрометеоиздат, 1972.— 232 с.
17. Щукин Г. Г., Бобылев Л. П. К вопросу определения влагосодержания облачной атмосферы по радиотепловому излучению.— В кн.: Труды Всесоюзного симпозиума по радиофизическим исследованиям атмосферы. Л.: Гидрометеоиздат, 1977, с. 170—181.
18. Carter C. J., Mitchell R. Z., Reber E. E. Oxygen absorption measurments in the lower atmosphere.— J. Geophys. Res., 1968, vol. 73, N 10, p. 3113—3120.
19. Van Vleck J. H. The absorption of microwaves by oxygen.— Phys. Rev., 1947, vol. 71, N 7, p. 413—424.

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

ФЛУКТУАЦИИ УРОВНЯ СИГНАЛА МИЛЛИМЕТРОВОГО И СУБМИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА ВОЛН ПРИ РАСПРОСТРАНЕНИИ В ТУРБУЛЕНТНОЙ ПОГЛОЩАЮЩЕЙ АТМОСФЕРЕ

Развитие методов дистанционного зондирования атмосферы с целью исследования ее параметров, внедрение систем активной локации и разработка систем связи в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах длин волн делают актуальным вопрос о влиянии разделяющей среды на характер и параметры принимаемого радиоизлучения. Другой не менее важной задачей является изучение статистических характеристик принимаемых сигналов с целью оптимизации радиометеорологических комплексов, выбора размеров антенных систем и рабочего диапазона длин волн. С этой точки зрения одной из первых и наиболее важных характеристик является дисперсия флуктуаций уровней принимаемых сигналов.

К настоящему времени имеется большое количество как теоретических, так и экспериментальных работ, посвященных данному вопросу, которые достаточно полно упомянуты в обзоре [8]. Однако в большинстве этих работ среда считается абсолютно прозрачной.

При переходе к области миллиметровых и субмиллиметровых радиоволн становится существенным молекулярное поглощение в атмосферных газах, в силу чего среду уже нельзя считать абсолютно прозрачной, а в диэлектрической проницаемости ε необходимо учитывать не только показатель преломления n, но и мнимую часть, обусловленную показателем поглощения α. Будем в дальнейшем считать, что

$$\sqrt{\varepsilon}=n+i\alpha. \tag{1}$$

Влияние поглощения на флуктуационные характеристики сигнала при распространении плоской монохроматической волны рассматривалось в работах [2, 3, 6, 11]. В этих работах отмечалось, что наличие поглощения может приводить к существенным

отличиям статистических характеристик принимаемого излучения по сравнению с распространением в абсолютно прозрачной среде.

Практически первым исследованием, в котором была поставлена задача о распространении пространственно-ограниченного пучка в турбулентной поглощающей атмосфере, является работа [1]. К сожалению, в этой работе отсутствуют конечные соотношения с учетом поглощения, которые можно было бы довести до численных результатов, а количественные оценки сделаны при пренебрежении поглощением.

Таким образом, остается открытым вопрос о влиянии поглощения на статистические характеристики сигнала при распространении пространственно-ограниченного излучения в турбулентной атмосфере.

1. Решение волнового уравнения для среды с поглощением. При решении задачи будем исходить из скалярного волнового уравнения, поскольку при $\lambda_0 \gg \lambda$ поляризационные поправки малы. Считаем, что излучение монохроматическое, а зависимость от времени определяется множителем $\exp(-i\omega t)$. В этом случае волновое уравнение имеет вид

$$\Delta\psi + k^2\varepsilon\psi = 0, \tag{2}$$

где $\varepsilon = \varepsilon_0 + \varepsilon'$, ε_0 — среднее значение диэлектрической проницаемости ($\sqrt{\varepsilon_0} = n_0 + i\alpha_0$), а ε' — ее флуктуирующая часть ($\varepsilon' \simeq \simeq 2(n' + i\alpha')$), $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ — волновое число.

Применяя метод плавных возмущений и ограничиваясь первым приближением [10], можно показать, что решение уравнения (2) имеет вид

$$\Phi_1(\mathbf{r}) = \frac{k^2}{4\pi} \int \frac{e^{ik\sqrt{\varepsilon_0}|\mathbf{r}-\mathbf{r}'|}}{|\mathbf{r}-\mathbf{r}'|} \frac{\psi_0(\mathbf{r}')}{\psi_0(\mathbf{r})} \varepsilon'(\mathbf{r}')\, d^3\mathbf{r}', \tag{3}$$

где $\Phi = \ln\psi$, а ψ_0 является решением уравнения (2) для случая среды без флуктуаций.

Решение уравнения (2) существенно зависит от вида распределения поля по раскрыву передающей апертуры. Предположим, как и в работе [1], что начальное поле распространяется вдоль оси X и при $X = 0$ представляет собой одномодовый гауссовый волновой пучок, описываемый выражением

$$\psi_0(0, \rho) = A_0 \exp\left(-\rho^2/2\rho_f^2\right), \tag{4}$$

где

$$\frac{1}{\rho_f^2} = \frac{1}{\rho_e^2} - \frac{ik\sqrt{\varepsilon_0}}{f},$$

ρ_e — поперечный размер пучка в плоскости передающей апертуры YOZ, определяемый по уменьшению в e раз мощности излучения

(при круглой апертуре радиуса ρ_0 $\rho_e = 0{,}8\rho_0$), f — радиус кривизны волнового фронта пучка в его центре.

Геометрическое истолкование решаемой задачи представлено на рис. 1, где L — расстояние по оси X до плоскости приема $Y'LZ'$, $\boldsymbol{\rho}$ — поперечный радиус-вектор с началом на оси пучка, ϑ — угол, характеризующий направление распространения пучка.

Невозмущенная волна, отвечающая волновому уравнению (2) и граничному условию (4), может быть найдена по формуле Грина [7]

$$\psi_0(\mathbf{r}) = -\frac{1}{2\pi}\int d\boldsymbol{\rho}'\psi_0(0,\ \boldsymbol{\rho}')\frac{\partial}{\partial x}\left\{\frac{e^{ik\sqrt{\varepsilon_0}\sqrt{x^2+(\rho-\rho')^2}}}{\sqrt{x^2+(\rho-\rho')^2}}\right\}. \qquad (5)$$

В приближении френелевской дифракции и при условии, что $x \gg$

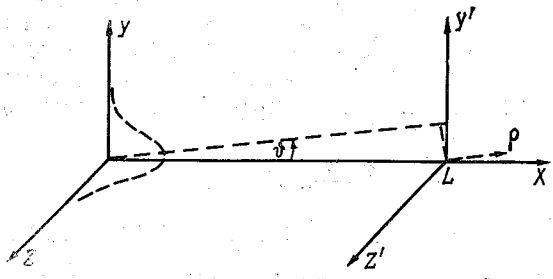


Рис. 1. Геометрия задачи.

$\gg |\boldsymbol{\rho} - \boldsymbol{\rho}'|$, а $\psi_0(0, \boldsymbol{\rho}')$ определяется граничным условием (4), для невозмущенной волны получаем

$$\psi_0(\mathbf{r}) = \frac{A_0}{1+iP_f(x)}\exp\left\{ik\sqrt{\varepsilon_0}\left[x + i\frac{\rho^2 P_f(x)}{2x\,[1+iP_f(x)]}\right]\right\}, \qquad (6)$$

где

$$P_f(x) = \frac{x}{k\sqrt{\varepsilon_0}P_f^2}. \qquad (7)$$

Подставляя (6) в (3) для значений координат $r = (L,\ Y,\ Z)$ и $r' = (X',\ Y',\ Z')$ при условии $kx \gg 1$, получаем следующее выражение для комплексной фазы сигнала:

$$\Phi_1(\mathbf{r}) = \frac{k^2}{4\pi}\int\frac{dx'}{(L-x')P_*}\int\int dy'\,dz'\varepsilon'(r')\times$$
$$\times\exp\left\{\frac{ik\sqrt{\varepsilon_0}}{2(L-x')P_*}[(y'-P_*y)^2+(z'-P_*z)^2]\right\}, \qquad (8)$$

где

$$P_* = P_1 - iP_2 = \frac{1+iP_f(x')}{1+iP_f(L)}. \qquad (9)$$

2. Корреляция флуктуаций уровня. Предположим существование корреляционных функций флуктуаций комплексной диэлектрической проницаемости $\varepsilon'(\mathbf{r})$:

$$\left.\begin{aligned}\langle\varepsilon'(\mathbf{r}_1)\,\varepsilon'(\mathbf{r}_2)\rangle&=R_n(\mathbf{r}_1-\mathbf{r}_2)-R_\alpha(\mathbf{r}_1-\mathbf{r}_2)+i\,2R_{n\alpha}(\mathbf{r}_1-\mathbf{r}_2),\\ \langle\varepsilon'(\mathbf{r}_1)\,\varepsilon'^*(\mathbf{r}_2)\rangle&=R_n(\mathbf{r}_1-\mathbf{r}_2)+R_\alpha(\mathbf{r}_1-\mathbf{r}_2),\end{aligned}\right\}\qquad(10)$$

где R_n и R_α — функции корреляции флуктуаций соответственно показателя преломления и показателя поглощения, $R_{n\alpha}$ — функция их взаимной корреляции.

В соответствии с (10) можно также ввести трехмерные спектры флуктуаций $\varepsilon'(r)$:

$$\left.\begin{aligned}\Phi_{1\varepsilon}(\varkappa_1,\varkappa_2,\varkappa_3)&=\frac{1}{8\pi}\int\int\int\langle\varepsilon'(x_1,y_1,z_1)\,\varepsilon'(x_2,y_2,z_2)\rangle\times\\ &\times\exp\{-i[\varkappa_1(x_1-x_2)+\varkappa_2(y_1-y_2)+\varkappa_3(z_1-z_2)]\}\,dx\,dy\,dz,\\ \Phi_{2\varepsilon}(\varkappa_1,\varkappa_2,\varkappa_3)&=\frac{1}{8\pi}\int\int\int\langle\varepsilon'(x_1,y_1,z_1)\,\varepsilon'^*(x_2,y_2,z_2)\rangle\times\\ &\times\exp\{-i[\varkappa_1(x_1-x_2)+\varkappa_2(y_1-y_2)+\varkappa_3(z_1-z_2)]\}\,dx\,dy\,dz.\end{aligned}\right\}\qquad(11)$$

В случае сферической изотропии

$$\Phi_\varepsilon(\varkappa_1,\varkappa_2,\varkappa_3)=\Phi_\varepsilon\sqrt{\varkappa_1^2+\varkappa_2^2+\varkappa_3^2}=\Phi_\varepsilon(\varkappa).\qquad(12)$$

С учетом (10) связь спектров (11) со спектральными плотностями флуктуаций показателей преломления Φ_n, поглощения Φ_α и функцией их взаимной корреляции $\Phi_{n\alpha}$ имеет вид

$$\left.\begin{aligned}\Phi_{1\varepsilon}&=\Phi_n-\Phi_\alpha+i\,2\Phi_{n\alpha},\\ \Phi_{2\varepsilon}&=\Phi_n+\Phi_\alpha.\end{aligned}\right\}\qquad(13)$$

Аналогично можно ввести двумерные спектры флуктуаций, исходя из их связи с трехмерными спектрами

$$F(|x_1-x_2|,\varkappa_2,\varkappa_3)=\int_0^\infty\Phi(\varkappa)\,e^{i\varkappa_1(x_1-x_2)}\,d\varkappa_1.\qquad(14)$$

С учетом всех сделанных замечаний получаем следующие выражения для корреляционных функций комплексной фазы (8):

$$\langle\Phi_1(L,Y_1,Z_1)\,\Phi_1(L,Y_2,Z_2)\rangle=$$

$$=\frac{k^4}{16\pi^2}\int\int_0^L\frac{dx'\,dx''}{(L-x')(L-x'')P_*(x')P_*(x'')}\times$$

$$\times\int\int_{-\infty}^{\infty}[F_n(|x'-x''|,\varkappa_2,\varkappa_3)-F_\alpha(|x'-x''|,\varkappa_2,\varkappa_3)+$$

$$+i\,2F_{n\alpha}(|x'-x''|,\varkappa_2,\varkappa_3)]\,d\varkappa_2\,d\varkappa_3\int\int\int_{-\infty}^{\infty}\int\exp\{i\varkappa_2(y'-y'')+$$

$$+i\varkappa_3(z'-z'')\}\exp\left\{\frac{ik\sqrt{\varepsilon_0}}{2(L-x')P_*(x')}[(y'-P_*(x')Y_1)^2+\right.$$

$$+(z'-P_*(x')Z_1)^2]+\frac{ik\sqrt{\varepsilon_0}}{2(L-x'')P_*(x'')}\times$$

$$\left.\times[(y''-P_*(x'')Y_2)^2+(z''-P_*(x'')Z_2)^2]\right\}dy'\,dz'\,dy''\,dz'', \quad (15')$$

$$\langle\Phi_1(L,\ Y_1,\ Z_1)\,\Phi_1^*(L,\ Y_2,\ Z_2)\rangle=$$

$$=\frac{k^4}{16\pi^2}\int\limits_0^L\int\frac{dx'\,dx''}{(L-x')(L-x'')P_*(x')P_*^*(x'')}\times$$

$$\times\int\limits_{-\infty}^{\infty}\int[F_n(|x'-x''|,\ \varkappa_2,\ \varkappa_3)+F_\alpha(|x'-x''|,\ \varkappa_2,\ \varkappa_3)]\,d\varkappa_2\,d\varkappa_3\times$$

$$\times\int\int\limits_{-\infty}^{\infty}\int\int\exp\{i\varkappa_2(y'-y'')+i\varkappa_3(z'-z'')\}\exp\left\{\frac{ik\sqrt{\varepsilon_0}}{2(L-x')P_*(x')}\times\right.$$

$$\times[(y'-P_*(x')Y_1)^2+(z'-P_*(x')Z_1)^2]-\frac{ik\sqrt{\varepsilon_0^*}}{2(L-x'')P_*^*(x'')}\times$$

$$\left.\times\left[\left(y''-P_*^*(x'')Y_2\right)^2+\left(z''-P_*^*(x'')Z_2\right)^2\right]\right\}dy'\,dz'\,dy''\,dz''. \quad (15'')$$

Интегрируя (15) по y', z', y'', z'' и преобразовывая, получаем:

$$\langle\Phi_1\Phi_1\rangle=-\frac{k^2}{4\varepsilon_0}\int\limits_0^L\int dx'\,dx''\int\limits_{-\infty}^{\infty}\int(F_n-F_\alpha+i\,2F_{n\alpha})\times$$

$$\times\exp\left\{-\frac{i}{2k\sqrt{\varepsilon_0}}[(L-x')P_*(x')+(L-x'')P_*(x'')](\varkappa_2^2+\varkappa_3^2)+\right.$$

$$\left.+i[Y_1P_*(x')-Y_2P_*(x'')]\varkappa_2+i[Z_1P_*(x')-Z_2P_*(x'')]\varkappa_3\right\}d\varkappa_2\,d\varkappa_3, \quad (16')$$

$$\langle\Phi_1\Phi_1^*\rangle=\frac{k^2}{4\sqrt{\varepsilon_0\varepsilon_0^*}}\int\limits_0^L\int dx'\,dx''\int\limits_{-\infty}^{\infty}\int(F_n+F_\alpha)\times$$

$$\times\left\{-\frac{i}{2k}\left[\frac{(L-x')P_*(x')}{\sqrt{\varepsilon_0}}-\frac{(L-x'')P_*^*(x'')}{\sqrt{\varepsilon_0^*}}\right](\varkappa_2^2+\varkappa_3^2)+\right.$$

$$\left.+i[Y_1P_*(x')-Y_2P_*^*(x'')]\varkappa_2+i[Z_1P_*(x')-Z_2P_*^*(x'')]\varkappa_3\right\}d\varkappa_2\,d\varkappa_3. \quad (16'')$$

Переходим в (16) к переменным $x=(x'+x'')/2$ и $y=x'-x''$. Учитывая, что $P_*(x')\approx P_*(x'')\approx P(x)$, а также связь

$$\int_0^\infty F(\varkappa_2,\ \varkappa_3,\ x)\,dx=\pi\Phi(0,\ \varkappa_2,\ \varkappa_3),$$

получаем

$$\langle\Phi_1\Phi_1\rangle=-\frac{k^2\pi}{2\varepsilon_0}\int_0^L dx\int_{-\infty}^{\infty}\int(\Phi_n-\Phi_\alpha+i\,2\Phi_{n\alpha})\times$$

$$\times\exp\left\{-\frac{i\,(L-x)\,P_*(x)}{k\sqrt{\varepsilon_0}}(\varkappa_2^2+\varkappa_3^2)+iP_*(x)\,(Y_1-Y_2)\,\varkappa_2+\right.$$

$$\left.+iP_*(x)\,(Z_1-Z_2)\,\varkappa_3\right\}d\varkappa_2\,d\varkappa_3, \qquad (17')$$

$$\langle\Phi_1\Phi_1^*\rangle=\frac{k^2\pi}{2}\int_0^L dx\int_{-\infty}^{\infty}\int(\Phi_n+\Phi_\alpha)\exp\left\{-\frac{i\,(L-x)}{2k}\left[\frac{P_*(x)}{\sqrt{\varepsilon_0}}-\right.\right.$$

$$\left.-\frac{P_*^*(x)}{\sqrt{\varepsilon_0^*}}\right](\varkappa_2^2+\varkappa_3^2)+i\,[Y_1P_*(x)-Y_2P_*^*(x)]\,\varkappa_2+$$

$$\left.+i\,[Z_1P_*(x)-Z_2P_*^*(x)]\,\varkappa_3\right\}d\varkappa_2\,d\varkappa_3. \qquad (17'')$$

Используем далее свойства локальной изотропности и обозначим $\varkappa_2^2+\varkappa_3^2=\varkappa^2$, $Y_1^2+Z_1^2=\rho_1^2$, $Y_2^2+Z_2^2=\rho_2^2$, $(Y_1-Y_2)^2+(Z_1-Z_2)^2=\rho_{12}^2$. Выбираем точку наблюдения на оси пучка с координатами $(L,\ 0,\ 0)$ или $\rho_1=0$, $\rho_2=\rho_{12}=\rho$. В результате интегрирования (17) по углу и преобразования получаем:

$$\langle\Phi_1\Phi_1\rangle=-\frac{\pi^2k^2}{\varepsilon_0}\int_0^L dx\int_0^\infty\varkappa\,(\Phi_n-\Phi_\alpha+i\,2\Phi_{n\alpha})\times$$

$$\times e^{-\frac{i\,(L-x)\,P_*(x)}{k\sqrt{\varepsilon_0}}\varkappa^2}I_0\left(\varkappa\rho P_*(x)\right)d\varkappa, \qquad (18')$$

$$\langle\Phi_1\Phi_1^*\rangle=\pi^2k^2\int_0^L dx\int_0^\infty\varkappa\,(\Phi_n+\Phi_\alpha)\times$$

$$\times e^{-\frac{i\,(L-x)}{2k}\left[\frac{P_*(x)}{\sqrt{\varepsilon_0}}-\frac{P_*^*(x)}{\sqrt{\varepsilon_0^*}}\right]\varkappa^2}I_0\left(-\varkappa\rho P_*^*(x)\right)d\varkappa. \qquad (18'')$$

Учитывая, что в области, существенной для интегрирования $\frac{\varkappa^2 L}{k} \ll 1$, в силу чего $\varkappa\rho \ll 1$, заменяем функцию Бесселя асимптотическим рядом, удерживая два члена

$$I_0(z) = \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \frac{z^{2n}}{2^{2n}(n!)^2} \approx 1 - \frac{z^2}{4}.$$

Принимая во внимание малость поглощения ($\alpha \ll 1$) и определение самой корреляционной функции флуктуаций уровня

$$R_\varkappa(\rho, L) = \frac{1}{2} \operatorname{Re}\left[\langle \Phi_1 \Phi_1 \rangle + \langle \Phi_1 \Phi_1^* \rangle\right],$$

из (18) с учетом (9) получаем следующее выражение для корреляционной функции флуктуаций уровня принимаемого сигнала:

$$R_\varkappa(\rho, L) = \frac{\pi^2 k^2}{2} \int_0^L dx \int_0^\infty \varkappa e^{-\frac{P_2(L-x)\varkappa^2}{k}} \times$$

$$\times \left\{ \Phi_n(\varkappa) \left[1 - \frac{\varkappa^2\rho^2(P_1^2 - P_2^2)}{4} - \cos\frac{P_1(L-x)\varkappa^2}{k} + \frac{\varkappa^2\rho^2(P_1^2 - P_2^2)}{4} \times \right.\right.$$

$$\left. \times \cos\frac{P_1(L-x)\varkappa^2}{k} - \frac{\varkappa^2\rho^2 P_1 P_2}{2} \sin\frac{P_1(L-x)\varkappa^2}{k} \right] -$$

$$- 2\Phi_{n\alpha} \left[\sin\frac{P_1(L-x)\varkappa^2}{k} - \frac{\varkappa^2\rho^2(P_1^2 - P_2^2)}{4} \sin\frac{P_1(L-x)\varkappa^2}{k} - \right.$$

$$\left. - \frac{\varkappa^2\rho^2 P_1 P_2}{2} \cos\frac{P_1(L-x)\varkappa^2}{k} \right] + \Phi_\alpha \left[1 - \frac{\varkappa^2\rho^2(P_1^2 - P_2^2)}{4} + \right.$$

$$+ \cos\frac{P_1(L-x)\varkappa^2}{k} - \frac{\varkappa^2\rho^2(P_1^2 - P_2^2)}{4} \cos\frac{P_1(L-x)\varkappa^2}{k} +$$

$$\left.\left. + \frac{\varkappa^2\rho^2 P_1 P_2}{2} \sin\frac{P_1(L-x)\varkappa^2}{k} \right] \right\} d\varkappa. \qquad (19)$$

3. Средний квадрат флуктуаций уровня сигнала. Полагая в (19) $\rho = 0$, получаем выражение для среднего квадрата флуктуаций уровня сигнала

$$\langle \chi^2 \rangle = \frac{\pi^2 k^2}{2} \left\{ \int_0^L dx \int_0^\infty \varkappa e^{-\frac{P_2(L-x)\varkappa^2}{k}} \Phi_n(\varkappa) \left[1 - \cos\frac{P_1(L-x)\varkappa^2}{k} \right] d\varkappa - \right.$$

$$- 2 \int_0^L dx \int_0^\infty \varkappa e^{-\frac{P_2(L-x)\varkappa^2}{k}} \Phi_{n\alpha}(\varkappa) \sin\frac{P_1(L-x)\varkappa^2}{k} d\varkappa +$$

$$\left. + \int_0^L dx \int_0^\infty \varkappa e^{-\frac{P_2(L-x)\varkappa^2}{k}} \Phi_\alpha(\varkappa) \left[1 + \cos\frac{P_1(L-x)\varkappa^2}{k} \right] d\varkappa \right\}. \qquad (20)$$

Заметим, что при отсутствии поглощения средний квадрат флуктуаций уровня может быть получен из (20) при $\Phi_\alpha = \Phi_{n\alpha} = 0$:

$$\langle \chi_0^2 \rangle = \frac{\pi^2 k^2}{2} \int_0^L dx \int_0^\infty \varkappa e^{-\frac{P_2 (L-x) \varkappa^2}{k}} \Phi_n(\varkappa) \left[1 - \cos \frac{P_1 (L-x) \varkappa^2}{k} \right] d\varkappa. \tag{21}$$

Дальнейший анализ полученных соотношений возможен лишь при задании конкретного вида спектров. Будем считать, что спектры Φ_n, Φ_α, $\Phi_{n\alpha}$ подобны, т. е. совпадают их внешние и внутренние масштабы, и описываются функцией Кармана. В этом случае

$$\Phi(\varkappa) = 0{,}033 C^2 (1 + \varkappa^2 L_0^2)^{-11/6}, \tag{22}$$

где L_0 — внешний масштаб турбулентности, C — структурная функция флуктуаций, связанная с флуктуациями температуры и влажности выражениями

$$\left.\begin{aligned} C_n^2 &= \left(\frac{\partial n}{\partial T}\right)^2 C_T^2 + \left(\frac{\partial n}{\partial q}\right)^2 C_q^2, \\ C_\alpha^2 &= \left(\frac{\partial \alpha}{\partial T}\right)^2 C_T^2 + \left(\frac{\partial \alpha}{\partial q}\right)^2 C_q^2, \\ C_{n\alpha}^2 &= \frac{\partial n}{\partial T} \frac{\partial \alpha}{\partial T} C_T^2 + \frac{\partial n}{\partial q} \frac{\partial \alpha}{\partial q} C_q^2, \end{aligned}\right\} \tag{23}$$

где C_T^2 и C_q^2 — структурные функции флуктуаций температуры и влажности (в выражениях (23) мы не учитываем зависимости от давления, поскольку его горизонтальные изменения в атмосфере незначительны).

Введем параметр m, характеризующий отношение размеров зоны Френеля к поперечному размеру пучка. В случае распространения коллимированного пучка

$$m = L / 0{,}64 k \rho_0^2. \tag{24}$$

Введем также волновой параметр D, характеризующий отношение размеров зоны Френеля к размерам неоднородностей

$$D = L / (k L_0^2). \tag{25}$$

Подставляя (22)—(25) в (20) и (21), получаем следующие выражения для средних квадратов флуктуаций уровня сигнала при распространении в поглощающей атмосфере и в атмосфере без поглощения соответственно:

$$\langle \chi^2 \rangle = 0{,}00825 \pi^2 k^{7/6} L^{11/6} D^{-5/6} \left\{ C_n^2 \int_0^\infty (1+t)^{-11/6} dt \int_0^1 e^{-\frac{m}{1+m^2} D t x^2} \times \right.$$

$$\times\left[1-\cos\left(Dtx-\frac{m^2}{1+m^2}Dtx^2\right)\right]dx-2C_{n\alpha}^2\int_0^\infty(1+t)^{-11/6}\times$$

$$\times dt\int_0^1 e^{-\frac{m}{1+m^2}Dtx^2}\sin\left(Dtx-\frac{m^2}{1+m^2}Dtx^2\right)dx+C_\alpha^2\int_0^\infty(1+t)^{-11/5}\times$$

$$\times dt\int_0^1 e^{-\frac{m}{1+m^2}Dtx^2}\left[1+\cos\left(Dtx-\frac{m^2}{1+m^2}Dtx^2\right)\right]dx\Bigg\}, \qquad (26)$$

$$\langle\chi_0^2\rangle=0{,}00825\pi^2k^{7/6}L^{11/6}D^{-5/6}C_n^2\int_0^\infty(1+t)^{-11/6}dt\times$$

$$\times\int_0^1 e^{-\frac{m}{1+m^2}Dtx^2}\left[1-\cos\left(Dtx-\frac{m^2}{1+m^2}Dtx^2\right)\right]dx. \qquad (27)$$

Следует отметить, что при $m=0$ из соотношений (26)—(27), как частный случай, следуют выражения для средних квадратов флуктуаций уровня плоской монохроматической волны, полученные в работе [6].

Из анализа выражения (26) следует, что член при C_n^2 описывает флуктуации, имеющие место в абсолютно прозрачной среде, член при C_α^2 — флуктуации, возникающие из-за изменения оптической толщины среды, а член при $C_{n\alpha}^2$ — флуктуации, обусловленные корреляцией флуктуаций показателей преломления и поглощения. Оценки, приведенные в [3], показывают, что второй и третий члены выражения (26) относительно малы в области не очень сильного поглощения. Однако их малость не означает малости влияния поглощения на флуктуации, что утверждается в работе [1]. Так, в зоне дифракции Фраунгофера второй и третий члены выражения (26) становятся соизмеримыми с первым членом. При этом значение флуктуаций зависит от волнового параметра D и параметра m, характеризующего геометрию пучка.

4. Средний квадрат флуктуаций уровня сигнала при учете поглощения в атмосферном водяном паре. Будем считать, что в рассматриваемом диапазоне длин волн поглощение в атмосфере обусловлено вращательными переходами молекул водяного пара, и исключим из рассмотрения узкие области спектра поглощения кислорода.

Анализ значений флуктуаций температуры и влажности в приземном слое атмосферы [9] показывает, что структурные функции флуктуаций температуры и влажности могут изменяться в широких пределах: $C_T=(0{,}02\div0{,}2)$ °C·см$^{-1/3}$, $C_q=(0{,}6\div1{,}8)\times10^{-5}$ см$^{-1/3}$. Наиболее вероятные средние значения состояния турбулентности могут быть охарактеризованы следующими значениями: $C_T=0{,}05$ °C·см$^{-1/3}$, $C_q=1{,}24\cdot10^{-5}$ см$^{-1/3}$, которые мы и принимаем для последующих численных расчетов.

Сравнение кармановского спектра с экспериментальными данными по спектрам пульсаций температуры [3] показывает их хоро-

шее совпадение, если принять, что $\varkappa_{max}h \approx 0{,}2\pi$, где h — высота над поверхностью земли. Из этого условия и равенства $\varkappa_{max} = \sqrt{3/2\pi}$ следует, что в приземном слое атмосферы можно считать $L_0 \approx 2h$. В области высот 100—300 м сравнение экспериментальных данных [12] с кармановским спектром дает оценку $L_0 \approx h$. Вследствие этого для расчетов вполне достаточно принять значения L_0, изменяющиеся в пределах 1—100 м.

Последующие расчеты среднего квадрата флуктуаций уровня сигнала производились на длинах волн в диапазоне 10—0,8 мм, включая волну 0,921 мм, соответствующую центру линии поглощения водяного пара со значением поглощения $\gamma_0 = 42$ дБ/км ($\alpha_0 = 0{,}634 \cdot 10^{-6}$) при нормальных метеорологических условиях ($P_0 = 760$ мм рт. ст., $T_0 = 293$ К, $\rho_0 = 7{,}5$ г/м^3).

Структурные функции флуктуаций показателя преломления, показателя поглощения и их взаимных флуктуаций рассчитывались по соотношениям (23), при этом для вычисления производных показателя поглощения использовались результаты работы [4], а для вычисления производных показателя преломления — результаты работы [5].

В табл. 1 приведены значения C_n^2, C_α^2, $C_{n\alpha}^2$ для различных длин волн, выраженных в обратных сантиметрах, охватывающих

Таблица 1

Значения структурных функций показателей преломления и поглощения

ν, см$^{-1}$	C_n^2 м$^{-2/3}$	C_α^2 м$^{-2/3}$	$C_{n\alpha}^2$ м$^{-2/3}$
0,1	$2{,}485 \cdot 10^{-13}$	$1{,}14 \cdot 10^{-23}$	$3{,}45 \cdot 10^{-18}$
0,7	$2{,}486 \cdot 10^{-13}$	$1{,}08 \cdot 10^{-19}$	$1{,}42 \cdot 10^{-16}$
1,0	$2{,}488 \cdot 10^{-13}$	$2{,}11 \cdot 10^{-20}$	$4{,}12 \cdot 10^{-17}$
1,2	$2{,}487 \cdot 10^{-13}$	$5{,}76 \cdot 10^{-21}$	$3{,}60 \cdot 10^{-17}$
2,0	$2{,}495 \cdot 10^{-13}$	$1{,}33 \cdot 10^{-20}$	$5{,}30 \cdot 10^{-17}$
2,5	$2{,}500 \cdot 10^{-13}$	$2{,}35 \cdot 10^{-20}$	$7{,}00 \cdot 10^{-17}$
3,0	$2{,}505 \cdot 10^{-13}$	$3{,}65 \cdot 10^{-20}$	$8{,}64 \cdot 10^{-17}$
4,0	$2{,}515 \cdot 10^{-13}$	$7{,}68 \cdot 10^{-20}$	$1{,}08 \cdot 10^{-16}$
5,0	$2{,}530 \cdot 10^{-13}$	$1{,}75 \cdot 10^{-19}$	$1{,}90 \cdot 10^{-16}$
5,9	$2{,}550 \cdot 10^{-13}$	$1{,}10 \cdot 10^{-17}$	$1{,}40 \cdot 10^{-15}$
6,1	$2{,}540 \cdot 10^{-13}$	$5{,}78 \cdot 10^{-17}$	$3{,}46 \cdot 10^{-15}$
6,3	$2{,}535 \cdot 10^{-13}$	$2{,}12 \cdot 10^{-18}$	$9{,}20 \cdot 10^{-16}$
7,0	$2{,}555 \cdot 10^{-13}$	$4{,}46 \cdot 10^{-19}$	$3{,}10 \cdot 10^{-16}$
8,0	$2{,}585 \cdot 10^{-13}$	$4{,}80 \cdot 10^{-19}$	$3{,}25 \cdot 10^{-16}$
9,0	$2{,}617 \cdot 10^{-13}$	$6{,}75 \cdot 10^{-19}$	$3{,}86 \cdot 10^{-16}$
10,0	$2{,}665 \cdot 10^{-13}$	$1{,}15 \cdot 10^{-18}$	$5{,}25 \cdot 10^{-16}$
10,9	$2{,}705 \cdot 10^{-13}$	$3{,}68 \cdot 10^{-17}$	$2{,}78 \cdot 10^{-15}$
12,0	$2{,}795 \cdot 10^{-13}$	$6{,}15 \cdot 10^{-18}$	$1{,}15 \cdot 10^{-15}$

наиболее характерные точки рассматриваемого диапазона. Приведенные в табл. 1 значения структурных функций соответствуют наиболее вероятным средним значениям состояния турбулентности.

Значения параметра m при расчетах варьировались от 0 до 100, что включало в себя случаи распространения бесконечной плоской волны и узконаправленного излучения, сформированного круглыми передающими апертурами диаметром 0,5—7 м.

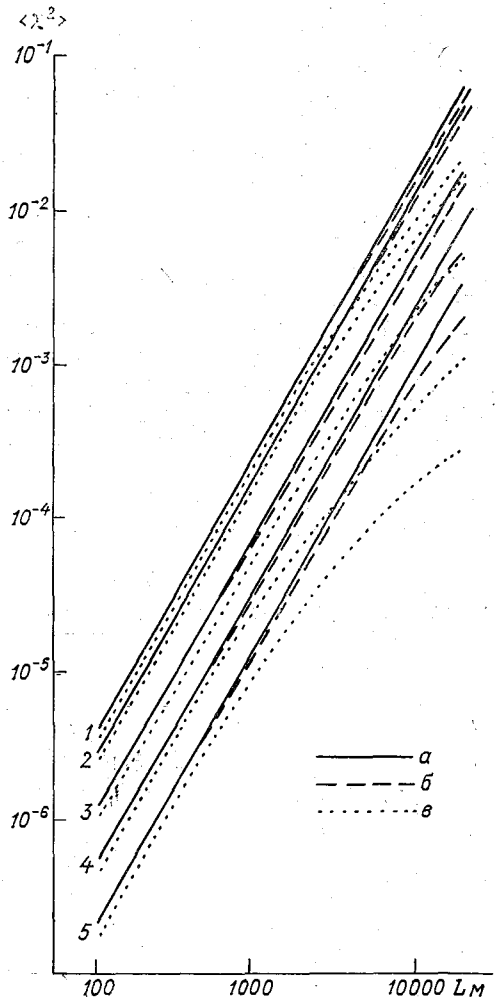


Рис. 2. Зависимость среднего квадрата флуктуаций уровня сигнала от длины трассы распространения для различных длин волн и L_0, равных 20 м (*а*), 5 м (*б*) и 1 м (*в*).

1) $\lambda=0{,}8$ мм; *2*) $\lambda=0{,}92$ мм; *3*) $\lambda=2$ мм; *4*) $\lambda=4$ мм; *5*) $\lambda=8$ мм.

На рис. 2 представлена рассчитанная зависимость среднего квадрата флуктуаций уровня сигнала плоской монохроматической волны от длины трассы распространения для различных длин волн и различных значений внешнего масштаба турбулентности.

Анализ показывает, что в рассматриваемом диапазоне волн величина флуктуаций, так же как и при распространении сигнала в абсолютно прозрачной среде, увеличивается с ростом расстояния, с увеличением внешнего масштаба турбулентности и с укорочением длины волны падающего излучения.

Для оценки влияния поглощения на амплитуду флуктуаций, как и в работах [2, 11], будем рассматривать отношение среднего квадрата флуктуаций в среде с поглощением к среднему квадрату флуктуаций в абсолютно прозрачной среде:

$$P_\chi=\langle\chi^2\rangle/\langle\chi_0^2\rangle. \qquad (28)$$

Исследование этого отношения показывает, что оно зависит от величины поглощения, а следовательно, является функцией длины волны. Так как в рассматриваемом диапазоне волн $\langle\alpha^2\rangle\ll\langle n^2\rangle$, то влияние поглощения на значения замираний принимаемых сигналов может оказаться заметным лишь в зоне геометрической оптики, где $D\ll1$.

На рис. 3 приведены зависимости P_χ для волны 0,921 мм от волнового параметра D для различных значений m.

Из анализа полученных результатов следует, что наличие поглощения может приводить к уменьшению уровня флуктуаций сигналов, причем геометрические размеры пучка оказывают существенное влияние на величину подавления замираний. Так, в случае бесконечной плоской волны максимальное подавление замираний составляет всего 4 %, в случае же оптимального значения параметра m значение подавления замираний может достигать

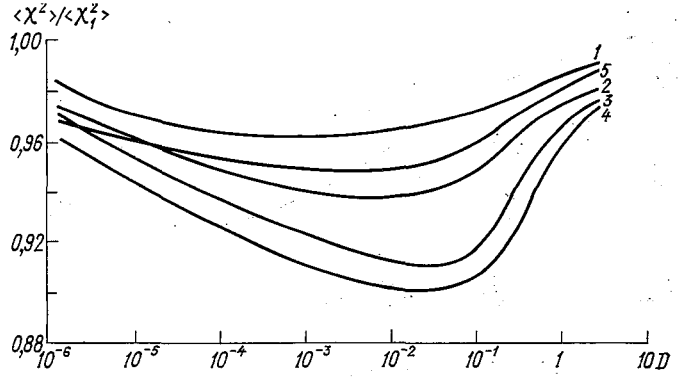


Рис. 3. Зависимость отношения среднего квадрата флуктуаций уровня сигнала в поглощающей атмосфере к среднему квадрату флуктуаций уровня сигнала в абсолютно прозрачной среде от волнового параметра при различных значениях параметра пучка m.

1) $m=0$; 2) $m=0{,}5$; 3) $m=1$; 4) $m=5$; 5) $m=100$.

10 %. При этом значение подавления замираний не зависит от самого поглощения на трассе распространения сигнала. Зависимость подавления флуктуаций от поглощения, так же как и от геометрии пучка, проявляется лишь в пространственном положении минимума P_χ (с увеличением поглощения смещается в сторону меньших значений волнового параметра). Наиболее оптимальным с точки зрения подавления замираний является пучок с $m=5$.

Распространение пространственно-ограниченного пучка вообще выгодно отличается от распространения бесконечно плоской волны тем, что концентрация мощности излучения в ограниченном пространстве приводит к уменьшению замираний сигналов.

На рис. 4 представлена зависимость отношения среднего квадрата флуктуаций сигнала при распространении пучка к среднему квадрату флуктуаций сигнала плоской монохроматической волны от параметра m. Из этой зависимости видно, что наибольшее уменьшение флуктуаций (до 75 %) наблюдается при величине $m=5\div10$. Отсюда, в частности, следует вывод, что для каждой длины волны и для каждой конкретной трассы распространения

сигнала существует свой оптимальный размер передающей апертуры, который может быть определен, исходя из определения параметра m. Кроме того, представленная зависимость может оказаться полезной при расчете флуктуаций амплитуды сигнала при формировании излучения круглой апертурой по величине флуктуаций бесконечной плоской волны, которая легче поддается расчету. Следует также заметить, что, как следует из рис. 4, чрезмерное увеличение размеров передающей антенны не дает преимуществ

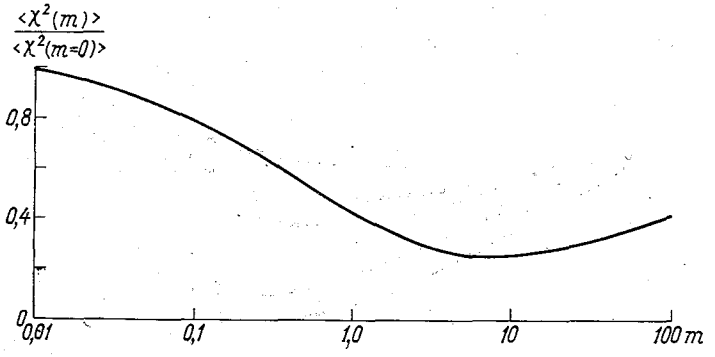


Рис. 4. Зависимость отношения среднего квадрата флуктуаций сигнала при распространении пучка к среднему квадрату флуктуаций сигнала при распространении бесконечной плоской волны.

по сравнению с направленным излучением с точки зрения уменьшения флуктуаций.

На основании проведенных исследований можно сделать следующие основные выводы.

1. Для каждой трассы и каждой длины волны существует оптимальный размер передающей антенны, при котором достигается максимальное уменьшение флуктуаций амплитуды сигнала до 75 %.

2. Молекулярное поглощение атмосферного водяного пара может приводить к уменьшению замираний сигналов до 10 % по сравнению с распространением в абсолютно прозрачной среде на длинах волн, лежащих вблизи линий поглощения H_2O, и на трассах, характеризуемых волновым параметром D, заключенным в пределах от 10^{-3} до 10^{-1}.

3. Представляется целесообразным в дальнейшем рассмотреть влияние приемной апертуры на величину среднего квадрата флуктуаций уровня сигнала в ее фокусе при приеме узконаправленного излучения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андреев Г. А., Черная Л. Ф. Флуктуация пучка миллиметровых волн при распространении в турбулентной поглощающей тропосфере земли.— Радиотехника, 1978, т. 33, № 1, с. 16—29.

2. Арманд Н. А., Изюмов А. О., Соколов А. В. Флуктуации радиоволн субмиллиметрового диапазона в турбулентной атмосфере.— Радиотехника и электроника, 1971, т. 16, № 8, с. 1333—1340.

3. Гурвич А. С. О влиянии поглощения на флуктуации уровня сигнала при распространении в атмосфере.— Радиотехника и электроника, 1968, т. 13, № 11, с. 1923—1931.

4. Зражевский А. Ю. Методика расчета поглощения в атмосферных парах воды в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах.— Радиотехника и электроника, 1976, т. 21, № 5, с. 951—957.

5. Зражевский А. Ю., Малинкин В. Г. Инженерный метод расчета вращательной части диэлектрической проницаемости водяного пара для $\lambda \geqslant 0{,}33$ мм.— Радиотехника и электроника, 1977, т. 22, № 1, с. 176—178.

6. Изюмов А. О. Флуктуации уровня и фазы плоской монохроматической волны субмиллиметрового диапазона при распространении в приземном слое турбулентной атмосферы.— Радиотехника и электроника, 1968, т. 13, № 7, с. 1147—1152.

7. Мэтьюз Дж., Уокер Р. Математические методы физики.— М.: Атомиздат, 1972.— 300 с.

8. Состояние теории распространения волн в случайно-неоднородной среде/Ю. Н. Барабаненков, Ю. А. Кравцов, С. М. Рытов, В. И. Татарский.— УФН, 1970, вып. 102, № 1, с. 3—42.

9. Структурные характеристики показателя преломления турбулентной поглощающей атмосферы в субмиллиметровом диапазоне волн/Г. А. Андреев, А. Ю. Зражевский, А. О. Изюмов, В. Г. Малинкин.— Препринт ИРЭ АН СССР, М., 1974, № 28(177).— 12 с.

10. Татарский В. И. Распространение радиоволн в турбулентной атмосфере.— М.: Наука, 1967.— 348 с.

11. Флуктуации миллиметровых радиоволн вблизи линии поглощения кислорода с центром на волне 5 мм при распространении в турбулентной атмосфере/Н. А. Арманд, А. О. Изюмов, Б. И. Полевой и др.— Радиотехника и электроника, 1973, т. 18, № 4, с. 680—686.

12. Цванг Л. Р. Измерение турбулентных потоков тепла и спектров температурных пульсаций.— Труды ИФА АН СССР, 1960, вып. 4, с. 144—156.

Н. Д. Попова, Г. Г. Щукин

О ВОЗМОЖНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ИНТЕНСИВНОСТИ ОСАДКОВ МЕТОДОМ ПАССИВНО-АКТИВНОЙ РАДИОЛОКАЦИИ

Для определения метеорологических характеристик атмосферы в настоящее время широкое применение находят методы дистанционного электромагнитного зондирования. В данной заметке рассматривается возможность определения мгновенной интенсивности жидких осадков с помощью метода пассивно-активной радиолокации, основанного на получении характеристик как собственного теплового радиоизлучения, так и отраженного радиоизлучения от облачного слоя с жидкими осадками.

В работах [1, 3] показана принципиальная возможность определения интегрального содержания жидкокапельной влаги в гидрометеорных образованиях, основанная на измерении радиояркостной температуры. С помощью же радиолокационной аппаратуры можно получить профиль отражаемости в зондируемом слое и его геометрические характеристики. Зная водозапас зондируемого слоя и профиль радиолокационной отражаемости в нем, можно определить профиль водности вдоль направления зондирования [6]. В методике используется предположение, что связь между отражаемостью и водностью сохраняется вдоль луча зондирования.

Для перехода от водности осадков к их интенсивности воспользуемся выражениями, приведенными в работе [2]. Распределение капель по размерам аппроксимируется нормированной функцией

$$n(d)\,dd = \frac{N_0 \beta^{\mu+1}}{\Gamma(\mu+1)} d^{\mu} e^{-\beta d}\,dd, \tag{1}$$

где N_0 — концентрация капель, d — диаметр, β и μ — параметры распределения капель.

Выражение для водности имеет вид:

$$w = \frac{\pi\rho}{6} \frac{N_0}{\beta^3} \frac{\Gamma(\mu+4)}{\Gamma(\mu+1)}, \tag{2}$$

где w в г/м^3, N в 1/м^3, β в 1/см^3.

Для интенсивности дождя предложено две формулы:

1) при $d \leqslant 0{,}1$ см и $v(d) = a_1 d$

$$I_1 = \frac{\pi \rho a_1}{6} N_0 \frac{1}{\beta^4} \frac{\Gamma(\mu+5)}{\Gamma(\mu+1)} 3{,}6 \cdot 10^4; \tag{3}$$

2) при $d > 0{,}1$ см и $v(d) = a_2 d^{1/2}$

$$I_2 = \frac{\pi \rho a_2}{6} N_0 \frac{1}{\beta^{3,5}} \frac{\Gamma(\mu+4{,}5)}{\Gamma(\mu+1)} 3{,}6 \cdot 10^4, \tag{4}$$

где I в мм/ч, N_0 в 1/см³, $a_1 = 4200$ 1/с, $a_2 = 1420$ см$^{1/2}$/с.

Из формулы (2) находим выражение для $1/\beta$ и подставляем в (3) и (4). Тогда получаем два соотношения между водностью и интенсивностью:

$$I_1 = K_1(N_0)\, \varphi_1(\mu)\, w^{1,3333}, \tag{5}$$

$$I_2 = K_2(N_0)\, \varphi_2(\mu)\, w^{1,1666}, \tag{6}$$

где

$$K_1(N_0) = \frac{187{,}62}{N_0^{0,3333}},$$

$$K_2(N_0) = \frac{56{,}96}{N_0^{0,1666}},$$

$$\varphi_1(\mu) = \frac{(\mu+4)}{[(\mu+3)(\mu+2)(\mu+1)]^{0,3333}},$$

$$\varphi_2(\mu) = \frac{\Gamma(\mu+4{,}5)\,[\Gamma(\mu+1)]^{0,1666}}{[\Gamma(\mu+4)]^{1,1666}}.$$

В жидких осадках концентрация капель может варьировать от 100 до 1000 1/м³. Для таких значений концентрации в табл. 1

Таблица 1

Функции $K_1(N_0)$ и $K_2(N_0)$

N_0 1/м³	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
$K_1(N_0)$	40,43	31,57	27,95	25,51	23,64	22,32	21,2	20,26	19,51	18,70
$K_2(N_0)$	26,45	23,56	22,03	20,95	20,21	19,58	19,3	18,67	18,33	17,99

приведены рассчитанные значения функций $K_1(N_0)$ и $K_2(N_0)$. При увеличении концентрации N_0 значения функций $K_1(N_0)$ и $K_2(N_0)$ уменьшаются. При концентрации более 500 1/м³ различие между K_1 и K_2 не превышает 15 %. В табл. 2 представлены функции

Таблица 2

Функции $\varphi_1(\mu)$ и $\varphi_2(\mu)$

μ	0	1	2	3	4	5	6
$\varphi_1(\mu)$	2,201	1,733	1,533	1,419	1,346	1,295	1,257
$\varphi_2(\mu)$	1,438	1,284	1,214	1,172	1,143	1,124	1,109

$\varphi_1(\mu)$ и $\varphi_2(\mu)$ для $\mu=0\div6$. Обе функции с увеличением μ уменьшаются, при этом φ_1 приближается к φ_2.

При зондировании слоя осадков точно определить параметры распределения капель по размерам N_0 и μ практически невозможно. Для достаточно продолжительных дождей независимо от их интенсивности число капель в 1 м³ приблизительно равно 500—700 [8]. Параметр μ учитывает мелкокапельную часть в функции распределения. Для дождей малой и средней интенсивности можно брать $\mu=2$, а для средней и большой интенсивности $\mu=0$ [9]. Оценку интенсивности осадков можно производить по формуле (5) при $\mu=2$ и по формуле (6) при $\mu=0$.

Таким образом, для перехода от водности осадков к их интенсивности имеем две формулы:

1) для $d\leqslant0{,}1$ см при $N_0=600$ и $\mu=2$

$$I_1=34{,}21w^{1{,}333}; \tag{7}$$

2) для $d>0{,}1$ см при $N_0=600$ и $\mu=0$

$$I_2=28{,}15w^{1{,}1666}. \tag{8}$$

Поскольку по данным активно-пассивной радиолокации по водозапасу зондируемого слоя получаем водность осадков, то определим градации водности для расчета интенсивности по формулам (7) и (8). Для этого в выражение для водности

$$w=\int_0^\infty \frac{4}{3}\pi\rho\left(\frac{d}{2}\right)^3 n(d)\,dd$$

подставим граничное значение диаметра капель $d=0{,}1$ см и среднее значение концентрации капель $N_0=600$. Тогда водность $w=0{,}32$ г/м³.

Следовательно, при водности осадков $w\leqslant0{,}32$ г/м³ их интенсивность рассчитывается по формуле (7), а при $w>0{,}32$ г/м³ — по формуле (8).

По предлагаемой методике нами рассчитаны интенсивность осадков по экспериментальным данным, полученным при наблюдениях за облачностью летом 1977 г. при помощи активно-пассивного комплекса, установленного на полигоне пос. Воейково. Методика наблюдений и обработки описана в работе [4].

Для примера использовались результаты наблюдения, проведенного 3 июля в 14 ч 22 мин, после которого через 2—3 мин над локатором отмечался ливневый дождь. Зондирование производилось при азимуте 132,6° и при угле места $\theta=20°$.

На рис. 1 представлены профиль отражаемости $\lg Z$ и рассчитанный по методике [6] при $b=2$ профиль водности w вдоль направления зондирования. Обе кривые построены из точки, соответствующей расстоянию от локатора $l=1{,}2$ км по направлению зондирования, поскольку с этого момента зафиксирован отраженный сигнал на фотопленке. При угле $\theta=20°$ это соответствует высоте над поверхностью земли 408 м и расстоянию от локатора по

горизонтали 1130 м. Для этой зоны мы определяем интенсивность осадков.

Водность дождя равна 2,53 г/м³ (рис. 1). Тогда, рассчитывая по формуле (8), получаем значение интенсивности дождя, равное 83 мм/ч. В этот день на метеостанции Воейково, которая удалена от полигона примерно на 600 м, по данным плювиографа в 15 ч 00 мин отмечена осредненная за 10-минутный интервал интенсивность, равная 0,65 мм/мин (38 мм/ч).

Полученное различие в значениях интенсивности дождя можно объяснить следующими обстоятельствами:

1) интенсивность дождя определялась для разных зон облака;

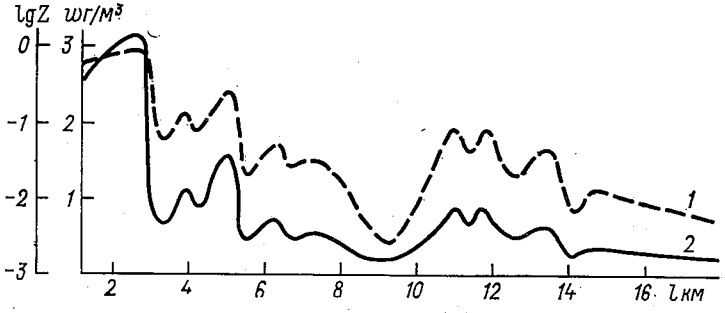


Рис. 1. Профили отражаемости lg Z (*1*) и водности w (*2*) по направлению зондирования.

2) пассивно-активным методом интенсивность рассчитана для высоты примерно 400 м, а по данным плювиографа получена для поверхности земли;

3) при помощи активно-пассивного зондирования определено мгновенное значение интенсивности, а значения интенсивности, полученные по данным плювиографа, осреднены за 10-минутные интервалы.

Обычно при определении интенсивности осадков (водности) дистанционными средствами используются [7] соотношения вида

$$Z = AI^{\alpha},$$

где Z — радиолокационная отражаемость, I — интенсивность осадков, A и α — параметры.

Параметры A и α не обладают устойчивостью. Они меняются не только от дождя к дождю, но и в течение одного дождя [5]. Поэтому радиолокационное измерение интенсивности отдельных дождей будет осуществляться со значительными ошибками.

Предлагаемая методика оценки интенсивности жидких осадков включает метод определения водности гидрометеообразования по данным пассивно-активного радиозондирования, который позволяет получить параметр A для каждого зондирования [4, 6]. Этот метод позволяет определить распределение интенсивности осадков в отдельных очагах.

Поскольку при оценке интенсивности осадков предлагаемым методом используется интегральное значение водности зондируемого слоя, необходимо провести исследования по совершенствованию метода определения водозапаса облаков с осадками.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Горелик А. Г., Калашников В. В. Определение интегральной водности дождевых облаков и высоты слоя дождя СВЧ радиометрическим методом.— Труды ЦАО, 1972, вып. 103, с. 58—63.

2. Горелик А. Г., Смирнова Г. А. О связи водности и интенсивности осадков с радиолокационной отражаемостью метеообъекта при различных параметрах распределения капель по размерам.— Труды ЦАО, 1963, вып. 48.

3. Исследование водности облаков с помощью трехсантиметрового радиометра/Л. П. Бобылев, М. А. Васищева, А. И. Новоселов и др.— Труды ГГО, 1975, вып. 328, с. 50—58.

4. Комплексное активно-пассивное радиолокационное зондирование облачности/Г. Г. Щукин, Л. П. Бобылев, Я. К. Ильин и др.— Труды ГГО, 1978, вып. 411.

5. Литвинов И. В. Устойчивость во времени величины радиолокационной отражаемости жидких осадков.— Труды ИПГ, 1967, № 9, с. 70—76.

6. Попова Н. Д., Щукин Г. Г. К методике определения профиля водности в облаках методом пассивно-активной радиолокации.— Труды ГГО, 1977, вып. 395, с. 68—71.

7. Радиолокационные измерения осадков/А. М. Боровиков, В. В. Костарев, И. П. Мазин и др.— Л.: Гидрометеоиздат, 1967.

8. Степаненко В. Д. Радиолокация в метеорологии.— Л.: Гидрометеоиздат, 1966.— 348 с.

9. Шифрин К. С. О расчете микроструктуры.— Труды ГГО, 1961, вып. 109, с. 168—178.

Г. Б. Брылев, Б. М. Воробьев, С. С. Грачев

РАСЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК КОНВЕКТИВНЫХ ОБЛАКОВ ПО ДАННЫМ СТАНДАРТНОЙ АЭРОЛОГИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ И ИХ СРАВНЕНИЕ С РЕЗУЛЬТАТАМИ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

Решение многих задач физики атмосферы, техники связи, радиолокации требует знания внутренней структуры конвективного облака. Она может быть рассчитана, в частности, на основе развиваемой в [2—4] струйной модели облачной конвекции. При этом необходимо знать параметры среды, в которой развивается такое облако. Данная статья посвящена возможности использования указанной модели для расчета микрофизических, макродинамических и радиолокационных характеристик конвективного облака по данным стандартной аэрологической информации, поступающей в прогностические центры.

В качестве рабочей модели послужила численная схема стационарного конвективного облака, развиваемая в работах [2, 4]. Эта схема, представляющая собой одну из разновидностей неадиабатических моделей конвекции, позволяет предвычислять осредненные по сечению облака основные его характеристики: скорость восходящего потока (w), его горизонтальные (R) и вертикальные (H) размеры, температуру (t), водность (q) и др. При этом необходимо знать (либо задавать) стратификацию окружающей облако атмосферы, а также параметры восходящего потока на нижней границе облака.

Численная схема представляет собой систему обыкновенных дифференциальных уравнений и может быть записана в следующем виде:

$$\frac{dw}{dz}=\frac{980}{w}\left\{\frac{T'-T}{T}-\frac{0{,}378}{p}\left[(f'-1)E'-F_zE+E'\right]-S-l_d\right\}-$$
$$-\frac{0{,}2T'}{RT}\sqrt{w^2+(u^*-u)^2}-\frac{0{,}5uwT'}{\pi RT\sqrt{u^2+w^2}}, \qquad (1)$$

$$\frac{du}{dz}=\frac{0{,}5\,(u^*-u)\,|\,u^*-u\,|\,T'}{\pi RT\sqrt{u^2+w^2}}+\frac{0{,}2T'\,(u^*-u)}{RT}\sqrt{w^2+(u^*-u)^2}, \qquad (2)$$

$$\frac{dT'}{dz}=-\frac{gT'}{c_pT}-\frac{\alpha T'(T-T')}{RTw}\sqrt{w^2+(u^*-u)^2}+$$

$$+\frac{4\pi\rho_* r_*^2 n_* L_* E(r,\ r_*)Sv_*}{c_p\rho_* KNT'rw}+\frac{4\pi\rho_* r_*^2 n_*(L+L_*)D\mu E'_*}{c_p\rho_* KNT'rw}\times$$

$$\times\left(1+\frac{D\mu^2(L+L_*)^2E'_*}{K^2N^2T'^3\lambda}\right)\left[(f'-1)\frac{E'}{E'_*}+\frac{E'}{E'_*}-1-\frac{2\sigma_*\mu}{r_*KNT\rho'_*}\right]+$$

$$+\frac{4\pi\rho hr^2LD\mu E'}{c_p\rho KNT'rw}\left(1+\frac{D\mu^2L^2E'}{K^2N^2T'^3\lambda}\right)^{-1}\left[f'-1-\frac{2\sigma\mu}{\rho KNT'r}+\frac{3im_0\mu}{4\pi\rho r^3M_0}\right], \tag{3}$$

$$\frac{dR}{dz}=\frac{R}{2}\left[\frac{0{,}2T'}{RTw}\sqrt{w^2+(u^*-u)^2}+\frac{\mu g}{KNT}+\frac{1}{T'}\frac{dT'}{dz}-\right.$$

$$\left.-\frac{w}{u^2+w^2}\frac{dw}{dz}-\frac{u}{u^2+w^2}\frac{du}{dz}\right], \tag{4}$$

$$\frac{df'}{dz}=-f'\left(\frac{\mu L}{KNT'^2}\frac{dT'}{dz}+\frac{\mu g}{KNT}+\frac{\alpha T'}{RT}\right)-\frac{4\mu p\pi rnD\xi}{wKNT'}\times$$

$$\times\left[f'-1-\frac{2\sigma\mu}{r\rho KNT'}+\frac{3im_0\mu}{3\pi r^3\rho M_0}\right]-\frac{\alpha T}{RTw}\sqrt{w^2+(u^*-u)^2}\times$$

$$\times\left[-F_z\frac{E'}{E'}+(S+l_d)\frac{Mp}{\mu E'}\right]-\frac{4\mu\rho\pi r_* n_* DE'_*}{KNT'wE'}\times$$

$$\times\left[(f'-1)\frac{E'}{E'_*}+\frac{E'}{E'_*}-1-\frac{2\sigma_*\mu}{r_*\rho_*KNT'}+\frac{3im_0\mu}{M_0r_*^3 4\pi\rho_*}\right], \tag{5}$$

$$\frac{dr}{dz}=\frac{D\mu E'}{\rho KNT'rw}\left(f'-1-\frac{2\sigma\mu}{\rho KNT'r}+\frac{3im_0\mu}{4\pi\rho r^3M_0}\right)\left(1+\frac{D\mu^2L^2E'}{K^2N^2T'^3\lambda}\right)^{-1}, \tag{6}$$

$$\frac{du}{dz}=-\frac{11\cdot10^{-7}nn_*pv_*r_*^2}{wT'}, \tag{7}$$

$$\frac{dr_*}{dz}=\frac{D\mu E'_*}{\rho_*KNT'r_*w}\left(1+\frac{D\mu^2(L+L_*)^2E'_*}{K^2N^2T'^3\lambda}\right)^{-1}\times$$

$$\times\left(f'\frac{E'}{E'_*}-1-\frac{2\sigma_*\mu}{r_*NKT'}+\frac{3im_0\mu}{4\pi M_0r_*^3\rho_*}\right)+\frac{S\mu pv_*E(r,\ r_*)}{4w\rho_*KNT'}, \tag{8}$$

$$\frac{dn_*}{dz}=-\frac{n_*\alpha T'}{wRT}\sqrt{w^2+(u^*-u)^2}, \tag{9}$$

$$\frac{dp}{dz}=-\frac{\mu gp}{KNT\left(1+\frac{0{,}378F_zE}{p}\right)}. \tag{10}$$

В этих уравнениях D — коэффициент диффузии пара, μ — относительная молекулярная масса водяного пара, ρ_* — плотность льда, K — постоянная Больцмана, N — число Авогадро, T' — температура в струе, r_* — радиус кристаллов, w — вертикальная составляющая скорости потока, E'_* — упругость насыщения надо льдом при температуре T', i — коэффициент Ван-Гоффа, u — горизонтальная составляющая скорости потока, u^* — скорость ветра, T — температура окружающей среды, r — радиус капель, p — давление, f' — относительная влажность воздуха в долях, S — водность удельная, l_d — ледность удельная, n_* — концентрация кристаллов, n — концентрация капель, L — теплота конденсации, L_* — теплота замерзания, R — радиус потока, F_z — влажность воздуха вне струи, E и E' — упругость насыщения водяного пара над поверхностью воды при температуре T и T', c_p — удельная теплоемкость воздуха, λ — коэффициент молекулярной теплопроводности воздуха, σ — поверхностное натяжение воды, σ_* — поверхностное натяжение льда, v и v_* — гравитационная скорость падения капель и кристаллов, M_0 — относительная молекулярная масса растворимого ядра конденсации, m_0 — масса ядра, $E(r, r_*)$ — коэффициент захвата, α — константа.

Система уравнений (1)—(10) решалась численно на ЭВМ БЭСМ-6 методом Рунге—Кутта.

Дифференциальные уравнения интегрировались по высоте от некоторого исходного уровня (уровня конденсации), на котором задавались начальные параметры конвективного потока, до уровня, где $w = 0{,}5$ м/с. Высота уровня конденсации $H_{конд}$ рассчитывалась по известной из [7] формуле

$$H_{конд} = 22\,(100 - f_0),$$

где f_0 — относительная влажность воздуха у поверхности земли.

Численные значения входящих в уравнение констант и параметров приведены в [2, 4].

Начальные параметры конвективного облака во всех случаях принимались постоянными и равными: $R_0 = 5$ км, $w_0 = 3$ м/с, $f'_0 = 400$ %, $n_0 = 10^6$ 1/г, $r_0 = 1$ мкм, $\Delta T_0 = T_0 - T'_0 = 0$ °С. Эти параметры, судя по данным [7], являются типичными для мощных кучевых и кучево-дождевых облаков, развивающихся летом в континентальных условиях.

Исходная численная модель облака в силу присущих ей ограничений и допущений [2—4, 7] не позволяет вести корректный расчет функции распределения облачных капель по размерам. В то же время водность облака, создаваемая в основном мелкими каплями, рассчитывается с достаточной для практики точностью. В связи с этим интересующая нас в дальнейшем радиофизическая характеристика облака — его радиолокационная отражаемость $Z(r^6)$ — рассчитывалась через водность по эмпирическому соотношению из [1] вида

$$Z = 6{,}1 q^{1{,}96}. \qquad (11)$$

Следует заметить, однако, что формула (11) справедлива лишь для вполне определенной стадии развития облака — начала образования ливневых осадков.

Расчеты на ЭВМ конвективных и радиолокационных параметров производились по данным стандартного радиозондирования атмосферы за дневной срок в пос. Воейково, поступающим в виде информационных телеграмм. Как правило, критический анализ и отбраковка первичных аэрологических данных не проводились. Исключением из этого правила явились несколько случаев радиозондирования атмосферы в условиях выпадения сильных осадков или при облачности нижнего яруса 10 баллов. Всего было выполнено 74 численных эксперимента по данным аэрологического зондирования 1976—1977 гг. (июнь—сентябрь). Соответствующие этим случаям результаты радиолокационных наблюдений за кучево-дождевыми облаками брались по данным МРЛ, установленных в пос. Воейково и Ленинграде (30 км от пункта аэрологического зондирования).

При этом для сопоставления выбирались:

— максимальное значение высоты в радиусе 100 км от МРЛ по ячейкам 30×30 км за срок ±2 часа от выпуска радиозонда и максимальные значения отражаемости осадков в радиусе 100 км за те же сроки;

— средние значения высот радиоэха Cb в радиусе 100 км по ячейкам 30×30 км за те же сроки;

— максимальное значение радиолокационного критерия грозоопасности $Y = H_{макс} \lg Z_{макс}$;

— максимальное значение высоты радиоэха Cb и отражаемости в радиусе 40 км по измерениям на ИДВ МРЛ за срок ±2 часа от выпуска радиозонда по данным МРЛ в Ленинграде.

Очевидно, что вероятность обнаружения более высоких Cb растет пропорционально радиусу или площади обзора. Это лишний раз подтверждается при сопоставлении данных МРЛ в Ленинграде и пос. Воейково. Максимальные высоты радиоэха, зафиксированные на МРЛ в пос. Воейково, больше, чем зафиксированные на МРЛ в Ленинграде.

Из многочисленных характеристик облаков, которые позволяет получить модель, к анализу привлекались максимальные значения: высоты ($H_м$), скорости восходящих потоков ($w_{макс}$), удельной водности ($q_{макс}$), отражаемости ($\lg Z_м$) и радиолокационного критерия грозоопасности $Y_м = H_м \lg Z_м$. Перечисленные характеристики достаточно репрезентативны для описания особенностей процессов в конвективных облаках.

Были рассчитаны статистические параметры максимальных величин модельных и радиолокационных характеристик конвективных облаков (средние арифметические значения, средние квадратические отклонения и коэффициенты вариации), которые приведены в табл. 1.

Из табл. 1, в частности, следует, что в среднем модель дает меньшие значения параметров, чем соответствующие им радиоло-

Таблица 1

Статистические параметры максимальных величин модельных радиолокационных характеристик конвективных облаков

Параметр	Характеристики										
	модельные					радиолокационные					
	Радиозондирование в пос. Воейково					МРЛ в пос. Воейково				МРЛ в Ленинграде	
	$H_м$ км	$W_{макс}$ м/с	$q_{макс}$ г/кг	$\lg Z_м$ (r^6)	$Y_м$	$H_В$ км	$H_{ср.В}$ км	$\lg Z_{макс}$ (r^6)	Y	$H_Л$ км	$\lg Z_{макс}$
Среднее арифметическое	4,7	13,1	3,6	1,7	8,7	6,0	4,5	2,2	16,3	5,3	2,3
Среднее квадратическое отклонение	1,8	5,9	1,4	0,5	4,7	2,5	1,9	0,7	7,9	2,5	0,6
Коэффициент вариации	0,4	0,4	0,4	0,3	0,5	0,4	0,4	0,3	0,5	0,5	0,2
Число случаев	74	74	74	74	74	57	45	57	41	58	58

кационные. Величины средних квадратичных отклонений для модели меньше, чем для радиолокационных. Однако коэффициенты вариации, которые показывают, насколько велико рассеивание по сравнению со средним значением, оказались одинаковыми как для модельных, так и для радиолокационных характеристик.

Таким образом, можно отметить, что при оценке по средним модель удачно описывает реальные процессы при развитии конвективной облачности.

Для получения количественных соотношений между модельными и радиолокационными характеристиками были рассчитаны коэффициенты корреляции и найдены уравнения линейной регрессии (табл. 2, рис. 1—3).

Таблица 2

Аналитический вид уравнений линейной регрессии между максимальными значениями модельных и радиолокационных характеристик конвективных облаков

Уравнение	Ошибка уравнения регрессии	Коэффициент корреляции $K \pm 3\sigma_K$
1. $H_м = 0{,}3w_{макс} + 0{,}8$	0,6	0,9 ± 0,06
2. $H_м = 1{,}1q_{макс} + 0{,}9$	1,2	0,8 ± 0,1
3. $H_м = 2{,}9 \lg Z_м - 0{,}4$	1,3	0,7 ± 0,1
4. $w_{макс} = 3{,}0q_{макс} + 2{,}4$	4,3	0,7 ± 0,2
5. $w_{макс} = 8{,}3 \lg Z_м - 1{,}2$	4,6	0,6 ± 0,2
6. $q_{макс} = 2{,}7 \lg Z_м - 1{,}2$	0,6	0,9 ± 0,06
7. $H_В = 0{,}8H_м + 2{,}2$	2,0	0,6 ± 0,2
8. $H_В = 0{,}2w_{макс} + 3{,}1$	2,2	0,5 ± 0,3
9. $H_{ср.\ В} = 0{,}7H_м + 1{,}3$	1,3	0,7 ± 0,2
10. $H_{ср.\ В} = 0{,}2w_{макс} + 2{,}2$	1,5	0,6 ± 0,3
11. $H_Л = 0{,}8H_м + 1{,}3$	2,0	0,6 ± 0,2
12. $H_Л = 0{,}2w_{макс} + 2{,}3$	2,1	0,5 ± 0,3
13. $Y = 1{,}2H_м \lg Z_м + 5{,}2$	5,4	0,7 ± 0,2
14. $H_В = 1{,}3H_{ср.\ В} + 0{,}5$	1,1	0,9 ± 0,06
15. $H_В = 0{,}8H_Л + 2{,}4$	1,7	0,8 ± 0,1

Уравнения 1—6 в табл. 2 являются уравнениями регрессии между модельными характеристиками облаков. Они указывают, что в условиях разной стратификации степень статистической зависимости очень высокая и приближается к функциональной. Эти сведения полезны при анализе различных критериев опасности. Из уравнений 1—6 в табл. 2 можно сделать вывод, что только

часть приведенных характеристик является практически независимой, и поэтому не следует их все привлекать для расчетов радиолокационных критериев опасности.

Полученное значение коэффициента корреляции между $w_{макс}$ и $\lg Z_м$, равное 0,6, гораздо меньше приведенного в [5], где скорость $w_{макс}$ рассчитывалась по методу частицы, а отражаемость Z выбиралась из радиолокационных наблюдений. Это говорит о том, что с помощью уравнения (11), по-видимому, нельзя с необходи-

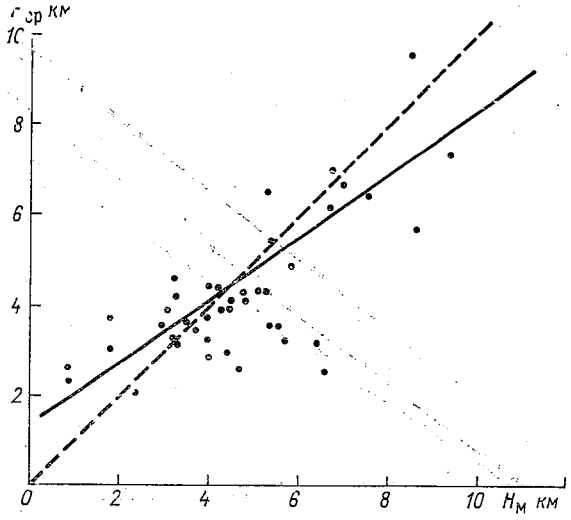


Рис. 1. Уравнение линейной регрессии между средними ($H_{ср}$) высотами радиоэха конвективной облачности в радиусе 100 км от МРЛ и высотами модельных облаков ($H_м$), рассчитанными по данным аэрологического зондирования.

мым приближением оценить отражаемость в Cb. Действительно, водность в таких облаках практически не меняется, а вид функции распределения капель по размерам, особенно ее «хвоста», меняется существенно. Формула (11) этого не учитывает. С другой стороны, надо дополнительно исследовать, является ли выбранная описанным выше образом $Z_{макс}$ репрезентативной для оценки интенсивности развития конвективной облачности в каждый конкретный день. Коэффициент корреляции между $Z_{макс}$ и $Z_м$ равен 0,2—0,3. Возможно, осредненное значение Z по ячейкам 30×30 км будет более пригодным. Однако несомненно, что рассматриваемые $Z_м$ и $Z_{макс}$ мало зависят от стратификации, а это противоречит известным экспериментальным данным [1, 5, 6].

Анализируя уравнения (7—12) из табл. 2 и рис. 1, можно выделить примерно три зоны.

При $H_м \leqslant 3 \div 4$ км модель занижает высоту радиоэха Cb ($H_{ср}$), при 4 км $< H_м \leqslant 8$ км — дает удовлетворительное совпадение и при $H_м > 8$ км — завышает.

При малых значениях высот Cb ($\leqslant 4$ км) модель [2, 4, 7] очень чувствительна к заданию начальных параметров облака на уровне конденсации и к положению самого уровня конденсации.

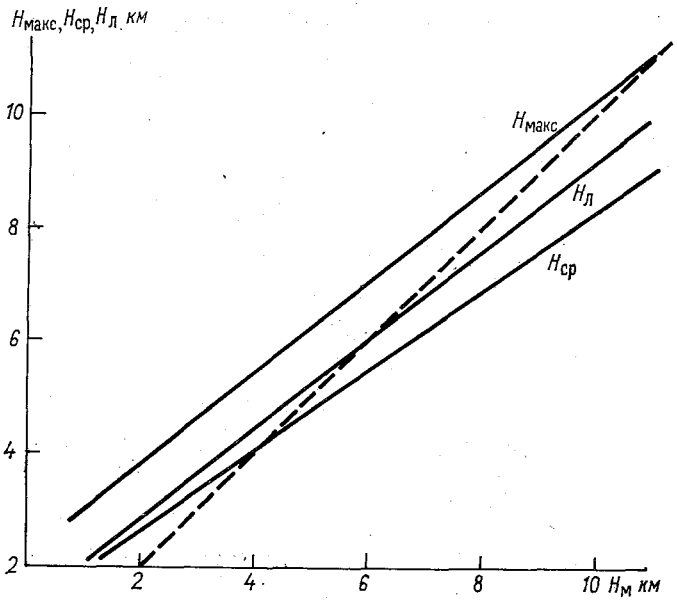


Рис. 2. Уравнения линейной регрессии между средними ($H_{ср}$), максимальными ($H_{макс}$) высотами радиоэха конвективной облачности в радиусе 100 км от МРЛ, максимальными ($H_л$) в радиусе 40 км и высотами модельных облаков ($H_м$), рассчитанными по данным аэрологического зондирования.

Можно отметить, что в аналогичных ситуациях отмечаются и наибольшие радиолокационные погрешности измерения высот Cb.

С помощью рис. 1 *б* и уравнений (7)—(12) табл. 2 по данным аэрологического зондирования и модели можно успешно прогнозировать средние и максимальные высоты радиоэха ливней и гроз.

Расчет радиолокационного критерия опасности Y и сравнение его с экспериментальным (рис. 2) показывает, что модель занижает Y во всем диапазоне его значений. Тем не менее большое значение коэффициента корреляции, равное 0,7, позволяет использовать и эту зависимость в прогностических целях. Можно на-

деяться, что при получении репрезентативной величины Z связь между $Y_м$ и Y фактическим будет еще лучше.

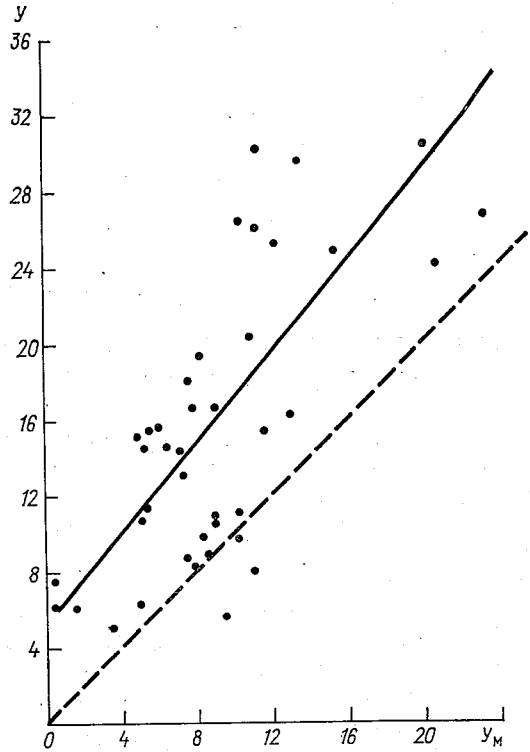


Рис. 3. Уравнение линейной регрессии между значениями радиолокационного критерия грозоопасности $У$ (по данным МРЛ пос. Воейково) и рассчитанным и по модели $Y_м$ по данным аэрологического зондирования.

Выполненная работа показала практическую пригодность модели струйной конвекции для прогнозирования радиолокационных характеристик конвективной облачности и особенно высот радиоэха.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Атлас Д. Успехи радарной метеорологии/Пер. с англ.— Л.: Гидрометеоиздат, 1967.— 196 с.

2. Воробьев Б. М. К расчету искусственной кристаллизации мелкокапельных мощных кучевых облаков.— Труды ЛГМИ, 1972, вып. 45, с. 108—116.

3. Воробьев Б. М. Численная модель стационарного градового процесса в естественных и искусственно регулируемых условиях.— ИАН СССР. Физика атмосферы и океана, 1977, т. XIII, № 9.

4. Воробьев Б. М., Пономарева О. В. Численное моделирование макродинамических и микрофизических процессов в мелкокапельной конвективной струе.— Труды ГГО, 1975, вып. 356, с. 255—264.

5. Дивинская Б. Ш., Брылев Г. Б., Сальман Е. М. Радиолокационные характеристики полей с мощными кучевыми облаками и их связь с термодинамическим состоянием атмосферы.— Труды ГГО, 1969, вып. 243, с. 16—22.

6. К вопросу о возможности расчетов некоторых радиолокационных характеристик конвективных облаков/Г. Б. Брылев, Б. М. Воробьев, С. Б. Гашина и др.— Труды ГГО, 1969, вып. 243, с. 34—48.

7. Матвеев Л. Т. Курс общей метеорологии. Физика атмосферы.— Л.: Гидрометеоиздат, 1976.— 640 с.

В. К. Завируха, В. Д. Степаненко

МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ ТОЧЕЧНЫХ РАДИОЭХО С ПОМОЩЬЮ АЭРОДРОМНОЙ РЛС

Радиолокационное обнаружение и селекция орнитологических объектов среди точечных радиоэхо атмосферы с целью предотвращения столкновений их с летательными аппаратами является в настоящее время одной из важнейших задач радиолокационной метеорологии.

Проблема обеспечения безопасности полетов в орнитологическом отношении особенно остро встала в последние годы. С возрастанием интенсивности полетов авиации, с увеличением скоростей самолетов и вертолетов на низких высотах вероятность столкновения их с птицами значительно возросла. Птицы оказались неспособными вовремя заметить приближающийся самолет и уклониться от него, что приводит зачастую к тяжелым последствиям [2]. Помимо этого, птицы представляют серьезные помехи для работы некоторых видов современных радиолокационных станций.

В связи с этим использование аэродромных РЛС УВД для получения данных о характеристиках рассеяния птиц и параметрах их движения представляет большой интерес. Эти характеристики позволяют оценить возможности аэродромных РЛС по обнаружению орнитологических объектов с целью предупреждения экипажей в воздухе о возможности столкновения. Вместе с тем они позволяют разрабатывать аппаратуру для исследования этих проблем.

Исходя из изложенного, авторами был проведен полевой эксперимент по наблюдению с помощью аэродромной РЛС дециметрового диапазона за точечными радиоэхо в районах Ленинградской области. В процессе эксперимента в некоторых случаях опознавание орнитологических объектов в воздухе проводилось с помощью вертолета. Надежное подтверждение принадлежности точечных радиоэхо отражениям от птиц осуществлялось последующей обработкой материалов фоторегистрации индикаторов кругового обзора РЛС. Съемка экранов РЛС с 5-минутной и более

экспозицией позволяла получить трассы полетов и перелетов птиц (рис. 1).

Обработка и анализ результатов зафиксированных более 1100 трасс перемещения точечных радиоэхо позволили получить данные о периоде времени их наблюдения, представленные в табл. 1. Распределение периодов времени на индикаторах РЛС показывает, что большинство точечных радиоэхо наблюдалось

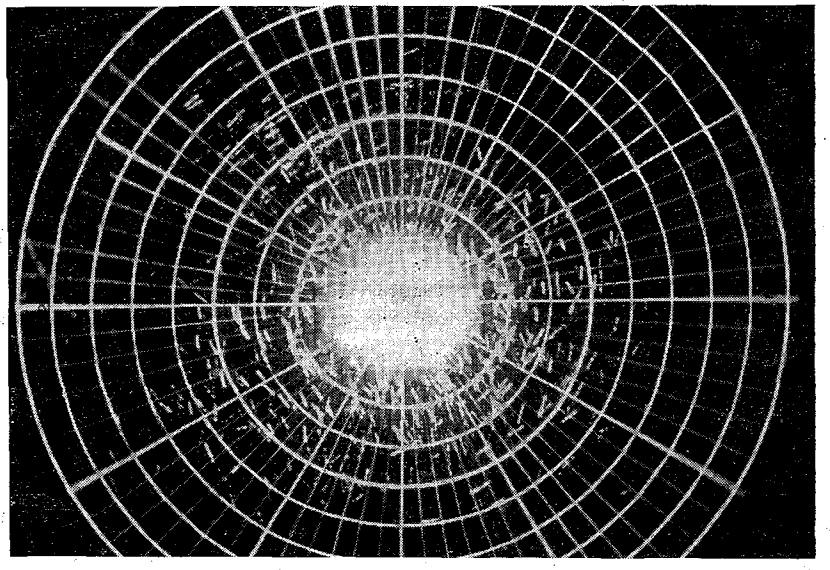


Рис. 1. Индикатор РЛС с точечными радиоэхо при 5-минутной экспозиции съемки.

в течение интервала времени не более 5 мин. В то же время наблюдались трассы, время наблюдения которых составляло около 85 мин.

Таблица 1

Повторяемость P различных периодов времени наблюдения τ точечных радиоэхо на ИКО РЛС

τ мин	5	10	15	20	25	30	35	40	45
P %	49	18	13	7	5	3	2	0,5	0,5
τ мин	50	55	60	65	70	75	80	85	
P %	0,2	0,5	0,2	0,5	0,2	0	0,2	0,2	

Помимо этого производился расчет высоты обнаружения точечных радиоэхо при входе их в зону видимости РЛС по формуле

для определения дальности прямой видимости цели при нормальной атмосферной рефракции:

$$D = 4{,}12\left(\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}\right),$$

где h_1 — высота цели над поверхностью земли, h_2 — высота антенны РЛС.

Повторяемость высот обнаружения точечных радиоэхо показана в табл. 2, из которой видно, что в большинстве случаев максимальные высоты не превышают 300—400 м.

Таблица 2

Повторяемость P различных высот $H_м$ точечных радиоэхо

$H_м$ км	0—50	50—100	100—150	150—200	200—250	250—300
P %	22	31	18	10	6	4

$H_м$ км	300—350	350—400	400—450	450—500	500—550	550—600
P %	2,5	2	1,5	1,5	1	0,5

Последовательная съемка индикаторов РЛС с 5-минутной экспозицией в течение промежутков времени от 1 до 2 часов позволяла в последующем построить траектории движения радиоэхо и определить скорости его перемещения. Распределение скоростей перемещения представлено в табл. 3. Из анализа этой таблицы

Таблица 3

Повторяемость P скоростей движения v точечных радиоэхо

v км/ч	0—40	40—50	50—60	60—70	70—80	80—90
P %	5	11	24	7	22	16

v км/ч	90—100	100—110	110—120	120—130	130—140
P %	8	5	1	0,5	0,5

видно, что наибольшая повторяемость скоростей лежит в пределах 50—80 км/ч. Максимальные скорости зарегистрированы около 120—140 км/ч. Учитывая тот факт, что перемещения с максимальными скоростями происходили в основном по направлению воздушного потока, согласно [5, 6] можно утверждать о наличии в период наблюдений перелетов птиц.

По дальности обнаружения точечных радиоэхо с помощью уравнения радиолокации для одиночных целей [3] была произведена оценка нижнего предела значений эффективной площади рассеяния (ЭПР) точечных радиоэхо. Распределение ЭПР представлено в табл. 4. Учитывая данные, приведенные в работах [4, 5]

Таблица 4

Повторяемость P ЭПР точечных радиоэхо

ЭПР см²	0—15	15—30	30—45	45—60	60—75	75—90	90—105	105—130
P %	77	16	5	0,5	0,5	0,5	0,25	0,25

и результаты экспериментальных наблюдений, можно отметить, что ЭПР до 60 см² соответствуют одиночным крупным птицам и стаям мелких птиц. ЭПР более 60 см² соответствуют стаям средних и крупных птиц (утки, журавли, лебеди).

В заключение можно сделать следующие выводы:

1) обзорная РЛС УВД обнаруживает стаи крупных птиц на удалениях до 80—100 км, одиночные птицы наблюдались до 20—30 км;

2) анализ скоростей полета, высот обнаружения, значений ЭПР, продолжительности наблюдений и траекторий движения точечных радиоэхо указывает на их принадлежность в основном птицам;

3) обзорные РЛС УВД, работающие в дециметровом диапазоне волн, могут быть эффективно использованы для оценки общей орнитологической обстановки в районе аэродрома с целью повышения безопасности полетов.

Точечные радиоэхо от птиц на индикаторах РЛС может обнаруживать только опытный, специально подготовленный оператор. Он должен хорошо знать картину радиоэхо от местных предметов, характерные особенности отметок от самолетов и птиц, а также уметь применять методы подавления помех от гидрометеоров и местных предметов в зависимости от метеорологических условий и обстановки в воздухе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Атлас Д. Успехи радарной метеорологии.— Л.: Гидрометеоиздат, 1973, с. 139—167.

2. Лаврик В. С. и др. Летчик, внимание — птицы! — М.: Воениздат, 1970, с. 68—72.

3. Степаненко В. Д. Радиолокация в метеорологии.— Л.: Гидрометеоиздат, 1973, с. 142—160.

4. Якоби В. Э. Биологические основы предотвращения столкновений самолетов с птицами.— М.: Наука, 1974, с. 105—143.

5. Flok W. L. Flight safety aspects of radar techniques in bird aircraft collision avoidance.— Univ. Colorado, 1971.

6. Haykir S. S., Carter C. R., Patriarche M. V. Identification of areas of bird clutter and weather clutter using air traffic control radar.— In: Int. Elec. Electron. Conf. and Exposit, Toronto, 1975, p. 172—173.

7. Hunt F. R. The radar detection of birds in an operational environment.— In: Int. Elec. Electron. Conf. and Exposit., Toronto, 1975, p. 170—171.

Т. В. Иванова, В. Д. Степаненко

АНАЛИЗ ИЗМЕНЧИВОСТИ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИ ТРАНСФОРМАЦИИ ОБЛАЧНОГО ПОЛЯ

Изучение изменчивости характеристик поля радиоэха конвективных облаков в мезомасштабе представляет большой интерес, поскольку позволяет выяснить особенности эволюции систем указанных облаков. Такая попытка была осуществлена с использованием материалов автоматизированных радиолокационных наблюдений.

Летом 1971 г. в пос. Воейково проводились автоматизированные радиолокационные наблюдения с помощью аппаратуры ААОМ [1] в радиусах 150 и 300 км. Все обозреваемое радиолокатором пространство было разбито на ячейки размером 30×30 км (в $r = 300$ км) и 15×15 км (в $r = 150$ км) и пронумеровано. Интервал времени между сериями составлял 15—30 мин.

Первичный материал был представлен в виде карт максимальных высот и цифровых лент, на которые выводились номер ячейки, высота и отражаемость на пяти уровнях (0—2, 2—4 км и т. д.).

Из всего массива первичного материала для обработки были выбраны данные трех дней наблюдений: 14 июня ($r = 300$ км), 16 июля ($r = 300$ км) и 2 августа ($r = 150$ км), включающие в себя 42 серии наблюдений. В эти дни в радиусе действия МРЛ наблюдались системы конвективных облаков, связанные с прохождением атмосферных фронтов.

При анализе данных рассматривались радиолокационные характеристики: максимальная высота радиоэха $H_{макс}$, максимальная отражаемость радиоэха $Z_{макс}$, общая площадь радиоэха $n_{яч.\ общ}$, совокупность грозовых и ливневых ячеек по полю $n_{яч.\ конв}$, площадь, занятая грозовым радиоэхом, $n_{яч.\ гр}$, комплексная характеристика опасности радиоэха $H \lg Z_3 = y_{факт.\ ср}$.

Для удобства проведения анализа радиолокационная информация переносилась на географически привязанный бланк. На этот же бланк наносились данные визуальных наблюдений, проводимых на метеостанциях, и положение атмосферных фронтов по данным приземных синоптических карт.

14 июня 1971 г. (рис. 1 *а*). Утром теплый фронт, располагающийся юго-восточнее пос. Воейково на расстоянии 300 км от него, перемещался на северо-запад со скоростью 30—40 км/ч; к 12 ч он оказался в зоне обзора радиолокатора. Днем началось окклюдирование фронта и его обострение, облачное поле перестраивалось — размывалась слоистообразная облачность и развивалась кучевообразная. По аэрологическим данным энергия неустойчивости была отрицательной, высота изотермы —22 °С составляла 6,5 км. Метеостанции регистрировали предфронтальные грозы с 10 ч 45 мин. В первые два срока наблюдений (9 ч 35 мин и 9 ч 55 мин) по радиолокационным данным отмечались обложные осадки, в 10 ч 25 мин — первые ливневые ячейки и в 11 ч 25 мин — ячейки с грозой. Площадь грозового радиоэха в этот срок составляла 5 % общей площади и 30 % площади конвективного радиоэха. Максимальная высота достигала 7 км. Изменение радиолокационных характеристик от срока к сроку, соответствовало суточному ходу с максимумом в послеполуденные часы ($H_{макс}$ = 9 км, площадь радиоэха 91 ячейка, площадь грозового радиоэха составляла 9 % общей площади и 52 % площади конвективного радиоэха). Этот максимум был обусловлен процессами развития Cb, ростом их вертикальной мощности под влиянием термодинамических факторов.

16 июля 1971 г. (рис. 1 *б*). Над зоной обзора радиолокатора располагался заполняющийся циклон. В процессе трансформации фронтальная облачная система разрушалась. Это привело к усилению конвекции на фронте окклюзии в дневные часы. Высота уровня конвекции составляла 8,9 км, изотермы —22 °С — 5,5 км, энергия неустойчивости была положительна и равна 464 Дж/см². Грозовая деятельность развита слабо, метеостанции периодически отмечают грозы. По всему полю — обложные осадки, перемежающиеся с ливнями.

Радиолокационные характеристики в течение дня менялись скачкообразно. При грозах наблюдался рост верхней границы облачности от 6 до 8 км, на 25 % увеличивалась площадь радиоэха, площадь грозового радиоэха составляла 12—15 % общей площади и 40—50 % площади конвективного радиоэха. По окончании гроз значения этих характеристик убывают. Относительно быстрый рост радиолокационных характеристик в начале грозы и их уменьшение по окончании говорят о наличии сильной конвективной пульсации во время грозы и об ослаблении сильных восходящих потоков во время прекращения грозы и выпадения ливня.

2 августа 1971 г. (рис. 1 *в*). По аэрологическим данным, энергия неустойчивости положительна и равна 925 Дж/см², высота уровня конвекции 10,6 км, высота изотермы —22 °С — 6,6 км. Метеостанции с 5 ч регистрировали грозы, сопровождающиеся ливнями, окончание гроз в 10 ч 30 мин, ливней — в 12 ч 30 мин. В начале радиолокационных наблюдений (8 ч 50 мин) максимальная высота достигала 10 км и с 11 ч она начала постепенно убывать.

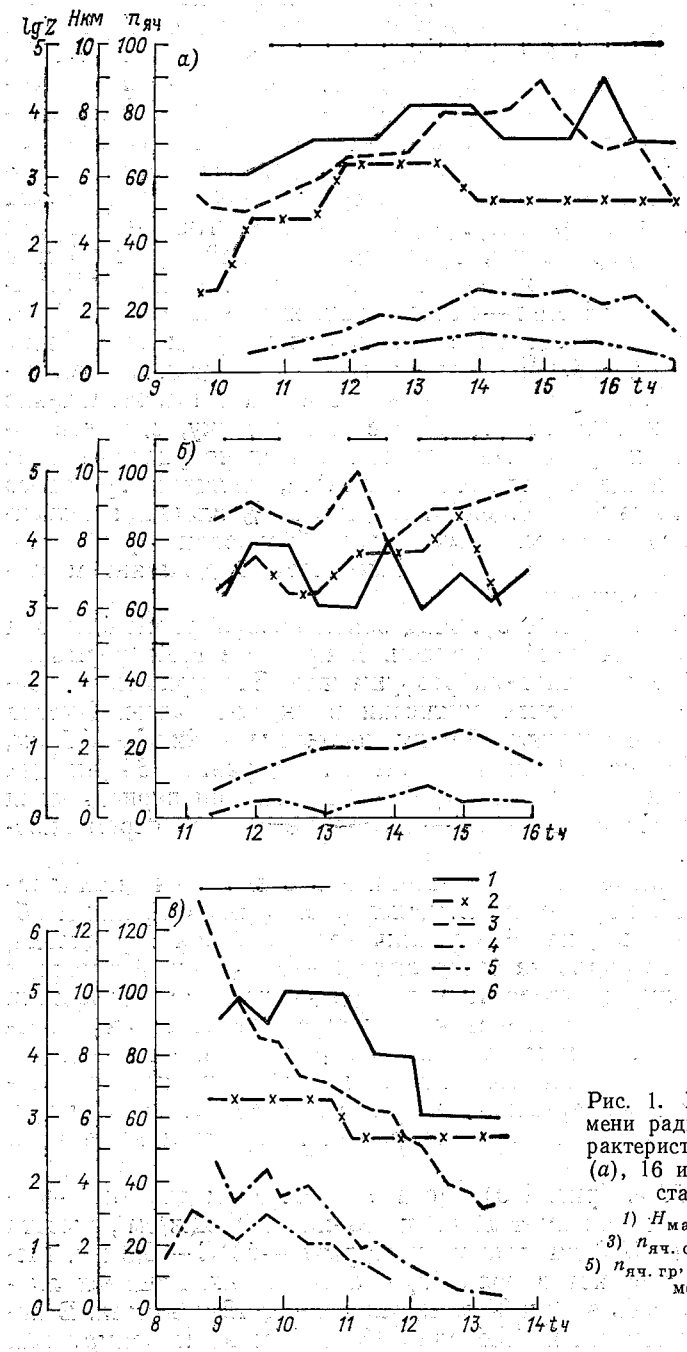


Рис. 1. Изменение во времени радиолокационных характеристик поля 14 июня (*а*), 16 июля (*б*) и 2 августа (*в*) 1971 г.

1) $H_{макс}$, 2) $\lg Z_{макс}$, 3) $n_{яч.\ общ}$, 4) $n_{яч.\ конв}$, 5) $n_{яч.\ гр}$, 6) гроза по данным метеостанции.

Общая площадь радиоэха резко убывала от срока к сроку (от 130 до 33 ячеек в конце наблюдений).

Площадь грозового радиоэха в начале наблюдений составляла 20—30 % общей площади и 60—70 % площади конвективного радиоэха, в конце — около 10 % общей площади и 40 % площади конвективного радиоэха.

Несмотря на то что грозовая деятельность в дневные сроки должна усиливаться, в развивающемся антициклоническом поле она уменьшилась и совсем прекратилась в 10 ч 30 мин. При совместном анализе радиолокационных, метеорологических и аэрологических данных выявлено:

— началу грозовой деятельности в системе фронтальных конвективных облаков предшествует резкое увеличение таких радиолокационных характеристик радиоэха, как максимальная высота, отражаемость, площадь;

— особенностью вертикальной структуры грозового радиоэха является более равномерное распределение отражаемости по высоте, чем в ливневом радиоэхе (рис. 2) [2];

— в момент интенсивной грозовой деятельности площадь грозового радиоэха составляет 10—30 % общей площади радиоэха и 50—70 % площади конвективного радиоэха;

— для поля фронтальных конвективных облаков изменение комплексной радиолокационной характеристики опасности радиоэха $Y_{факт.\,ср}$ является достаточно информативной и репрезентативной характеристикой, при описании временного хода явлений (трансформации). В поле $Y_{факт.\,ср}$ изменяется в пределах от 0,4 до 8,6, в то же время в грозовом радиоэхе $Y_{факт.\,ср}$ изменяется от 8,7 до 17,6, в ливневых — от 6,4 до 8,5, в радиоэхе обложных осадков и облаков — от 1,7 до 3,8;

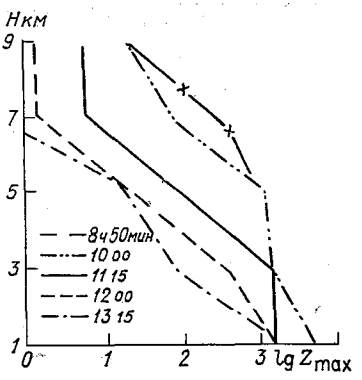


Рис. 2. Пространственно-временная изменчивость отражаемости ($\lg Z_{max}$) при трансформации облачного поля (в период 8 ч 50 мин—10 ч 00 мин отмечалась гроза, в 11 ч 15 мин—13 ч 15 мин — ливневый дождь). 2 августа 1971 г.

— радиоэхо облачной системы располагается в районе линии фронта при стационарном его состоянии, преимущественно за ним при холодном фронте, и при теплом — перед ним. Конвективные ячейки радиоэха располагаются, как правило, параллельно линии фронта в непосредственной близости от нее;

— чаще всего облачные поля с Cb имеют суточный ход с максимумом в послеполуденные часы, при размывании фронта отмечается затухание грозовой деятельности в вышеуказанные часы.

— подтверждается связь максимальных значений высота радиоэха с высотой уровня конвекции;

— грозовая деятельность осуществляется чаще всего при превышении максимальной высоты уровня изотермы —22 °С [3].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вопросы автоматизированного получения радиолокационной информации об опасных Cb/C. Б. Гашина, А. Г. Линев, В. А. Петрушевский, Е. М. Сальман.— Труды ГГО, 1974, вып. 327, с. 18—25.

2. Гальперин С. М., Стасенко В. Н. Динамика грозового облака по данным радиотехнических наблюдений.— Труды ГГО, 1976, вып. 383, с. 129—135.

3. Котов Н. Ф. Определение радиолокационной характеристики грозового состояния ливней.— Труды ГГО, 1961, вып. 120.

А. С. Солонин

К ВОПРОСУ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕОРИИ РАСПОЗНАВАНИЯ ОБРАЗОВ ДЛЯ АНАЛИЗА РАДИОЛОКАЦИОННОЙ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

Быстрое развитие и внедрение радиолокационных методов наблюдения за физическим состоянием атмосферы вызывается возрастающими потребностями народного хозяйства в метеорологической информации. Решение задач обеспечения безопасности воздушного движения в сложных метеорологических условиях, штормоповещения и проведения активных воздействий приводит к необходимости автоматизации наблюдений, обработки и классификации радиолокационной метеорологической информации с использованием ЭВМ. В связи с этим важной проблемой является разработка алгоритмов автоматического анализа радиолокационной метеорологической информации. При кибернетическом подходе к этой задаче ее можно решать методами теории распознавания образов. При этом метеорологические объекты представляются набором физически обоснованных комплексов параметров радиолокационных сигналов, образующих пространство признаков.

Разработка новых и использование уже существующих алгоритмов автоматического распознавания метеорологических объектов позволяет синтезировать иерархическую систему классификации, которая имеет более высокое качество и надежность работы, чем каждая ее подсистема в отдельности. Рассмотрим математические аспекты синтеза иерархических систем распознавания метеорологических объектов, реализующих семейство частных алгоритмов автоматической классификации.

Иерархическая система распознавания S метеорологических объектов представляется при теоретико-множественном подходе в виде кортежа, состоящего из множества $\{s\}$ частных подсистем классификации s и предиката или некоторого функционала G:

$$S=\langle\{s\},\ G\rangle.$$

Предикат G определяет место каждой частной подсистемы классификации s в иерархической структуре S. Любая подсистема s формализуется следующим образом.

Имеется множество Ω метеорологических объектов ω и некоторое множество D задач D_ω распознавания метеорологических объектов $\omega \in \Omega$, связанных с задачами обеспечения безопасности воздушного движения, штормоповещения и активных воздействий. Предполагается, что эти задачи распознавания метеорологических объектов имеют решения q в множестве всевозможных классификаций $Q = \{q\}$ объектов ω из множества Ω. Задано отображение δ множества задач D в множество классификаций Q:

$$\delta : D \to Q,$$

которое будем называть классификатором. Каждой классификации q из множества классификаций Q поставим в соответствие реализацию r из множества реализаций R решения классификационных задач при обеспечении безопасности воздушного движения, штормоповещения и активных воздействиях с помощью отображения

$$\varepsilon : Q \to R.$$

Такую реализацию r будем называть объективной классификацией метеорологических объектов $\omega \in \Omega$.

Подсистемой распознавания s метеорологических объектов $\omega \in \Omega$ называется отображение

$$s : \Omega \to R$$

такое, что

$$(\forall \omega,\ r : s(\omega) = r) \Longleftrightarrow \big(\exists q \in Q : (\delta(D_\omega) = q)\ \&\ (\varepsilon(q) = r)\big),$$

где $\forall$ и $\exists$ — логические кванторы всеобщности и существования, $\&$ — знак конъюнкции или «и», $\Longleftrightarrow$ — эквивалентность. Подсистема распознавания s ставит в соответствие каждому метеорологическому объекту ω объективную классификацию r.

Наглядное представление системы классификации задается следующей диаграммой:

$$\begin{array}{ccc} \Omega & \xrightarrow{d} & D \\ {\scriptstyle s}\downarrow & & \downarrow{\scriptstyle \delta} \\ R & \xrightarrow{\varepsilon} & Q \end{array}$$

Стрелки на этой диаграмме указывают соответствующие отображения. Из диаграммы видно, что подсистема классификации s задается композицией частных отображений:

$$s = \varepsilon \circ \delta \circ d,$$

где $\circ$ — знак композиции. Отображение d ставит в соответствие каждому метеорологическому объекту $\omega \in \Omega$, наблюдаемому с помощью технических средств (в частности, радиолокационных), определенную задачу классификации D_ω, связанную либо с задачей обеспечения безопасности воздушного движения, либо с задачей штормоповещения, либо с задачей активных воздействий. Каж-

дой такой задаче D_ω отображение δ ставит в соответствие классификацию q из множества всевозможных классификаций Q. Используя эту классификацию q, отображение ε строит реализацию решения r, которая завершает работу подсистемы классификации s.

Конкретизация рассмотренных выше отображений приводит к следующей постановке задачи распознавания метеорологических объектов.

Необходимо разбить множество метеорологических объектов $\Omega = \{\omega\}$ на l непересекающихся подмножеств Ω_j, называемых классами метеорологических объектов.

Обозначим через $\mathcal{A}$ некоторую σ-алгебру подмножеств множества Ω, содержащую подмножества Ω_j, и через P вероятностную меру, определенную на $\mathcal{A}$. Тогда $(\Omega, \mathcal{A}, P)$ будет вероятностным пространством.

Набор физически обоснованного комплекса радиолокационных метеорологических параметров определяется с помощью некоторого измеримого относительно σ-алгебры $\mathcal{A}$ отображения

$$x : \Omega \to X,$$

где $X \subset R^N$ называется пространством признаков (R^N — евклидово пространство размерности N). Такое отображение определяется путем обработки измерительной информации, получаемой различными радиолокационными средствами наблюдения.

В пространстве признаков X это отображение порождает семейство борелевских подмножеств $X_j(\tau)$, $j = 1, 2, \ldots, l$, зависящих от векторного параметра $\tau \in T$. Параметр τ характеризует классификатор метеорологических объектов δ.

Задача автоматического распознавания метеорологических объектов сводится к минимизации некоторого функционала среднего риска. Выбор функционала во многих случаях зависит от интуитивных представлений о принципах, позволяющих «правильно» распознавать предъявляемые системе s метеорологические объекты. Для минимизации функционала среднего риска используются алгоритмы рекуррентного типа. Такие алгоритмы удобны для реализации на ЭВМ, так как не требуют большой памяти машины и позволяют обрабатывать информацию по мере ее поступления (использовать реальный масштаб времени).

В общем виде функционал среднего риска представляется выражением

$$W(\tau) = \sum_{i=1}^{l} \int_X I_{X_i(\tau)}(x)\, q_i(x, \tau)\, F(dx), \tag{1}$$

где $I_{X_i(\tau)}$ — характеристическая функция множества $X_i(\tau)$, т. е.

$$I_{X_i(\tau)}(x) = \begin{cases} 1, & \text{если } x \in X_i(\tau), \\ 0, & \text{если } x \notin X_i(\tau); \end{cases}$$

$q_i(x, \tau)$ — неотрицательные функции потерь, зависящие от

векторных аргументов x и τ; множества $X_i(\tau)$ (классы метеорологических объектов) определяются условиями

$$X_i(\tau)=\left\{x : q_i(x, \tau) \leqslant \min_{k \neq i} q_k(x, \tau)\right\} \tag{2}$$

(границы множеств $X_i(\tau)$ условимся относить к множествам с меньшим индексом); F — вероятностное распределение на X, $F(X)=1$.

Для функционала (1) решение задачи распознавания метеорологических объектов состоит в нахождении разбиения $\{X_i(\tau_*)\}_{i=1}^{l}$ пространства признаков X, для которого функционал среднего риска принимает минимальное значение, т. е.

$$W(\tau_*)=\inf_{\tau} W(\tau). \tag{3}$$

Это разбиение влечет за собой разбиение $\{\Omega_i(\tau_*)\}_{i=1}^{l}$ пространства метеорологических объектов Ω согласно правилу

$$\{\omega \in \Omega_i(\tau_*)\} \Longleftrightarrow \{x(\omega) \in X_i(\tau_*)\}, \tag{4}$$

причем $\Omega_i(\tau_*)=\Omega_i$.

Оптимальный вектор τ_*, соответствующий условию (3), находится среди решений уравнения

$$\sum_{i=1}^{l} \int_X I_{X_i(\tau)}(x) \nabla_\tau q_i(x, \tau) F(dx)=0, \tag{5}$$

где $\Delta_\tau q_i(x, \tau)$ — градиент функции $q_i(x, \tau)$ по аргументу τ (предполагается, что функции потерь $q_i(x, \tau)$ обладают нужной гладкостью по τ).

В практических задачах распознавания метеорологических объектов имеет место априорная неопределенность, так как не все входящие в уравнение (5) функции определены.

Пусть существует последовательность отображений $\omega_1(\omega), \ldots, \omega_n(\omega)$ таких, что случайные величины $x_n(\omega)=x(\omega_n(\omega))$ стохастически независимы и порождают в пространстве признаков одинаковое распределение F. Последовательность случайных величин $x_n(\omega)$ является обучающей последовательностью. Использование обучающей последовательности позволяет преодолеть априорную неопределенность с помощью рекуррентной процедуры

$$\tau_{n+1}=\tau_n-\gamma_n \nabla_\tau q(x_n, \tau_n), \tag{6}$$

где τ_1 — начальная оценка параметра τ, γ_n — числовая последовательность, $q^*=(q_1, \ldots, q_l)$ (звездочка обозначает транспонирование).

Таким образом, задача распознавания метеорологических объектов представляется следующей диаграммой:

$$\begin{array}{ccc} \Omega & \xrightarrow{x} & X \\ {\scriptstyle s}\downarrow & & \downarrow{\scriptstyle \delta} \\ \{\Omega_i(\tau)\}_{i=1}^{l} & \xleftarrow{\varepsilon} & \{X_i(\tau)\}_{i=1}^{l} \end{array}$$

Здесь отображение x каждому метеорологическому объекту ω ставит в соответствие вектор характеристик $x(\omega)$ из пространства признаков X, которое связано с определенной задачей D_ω обеспечения безопасности воздушного движения, штормоповещения, активных воздействий.

Отображение δ строится так, чтобы некоторый параметр $\tau_* \in \in T$, являющийся пределом последовательности τ_n, полученной в силу процедуры (6), доставлял экстремум функционалу (1), а отображение ε определяется правилом (3).

Проиллюстрируем изложенный выше подход к автоматическому распознаванию метеорологических объектов на задаче штормоповещения, описанной в работах Г. Б. Брылева, С. Б. Гашиной, А. Г. Линева, Е. М. Сальмана [1, 3].

Рассматривается множество метеорологических объектов Ω, состоящее из всевозможных кучево-дождевых облаков ω. Аппаратура автоматической обработки и представления радиолокационной метеорологической информации позволяет рассмотреть отображение x, которое ставит в соответствие каждому кучево-дождевому облаку ω дискретное описание вертикального профиля отражаемости $Z(H)$ в ячейках пространства размером 30×30 км (или 15×15 км). Множество дискретных профилей отражаемости образует пространство признаков X, состоящее из шестимерных векторов $x(\omega)=\{x_i(\omega)\}_{i=1}^{6}$. Компонентами этих векторов являются: значение максимальной высоты радиоэхо ($x_1(\omega)=H_{\max}$) и отражаемости в слоях 0—2 км ($x_2(\omega)=Z_1$), 2—4 км ($x_3(\omega)=Z_2$), 4—6 км ($x_4(\omega)=Z_3$), 6—8 км ($x_5(\omega)=Z_4$), 8—10 км ($x_6(\omega)=Z_5$). Рассматривается задача штормоповещения $D_\omega \in D$, построения класса грозовых радиоэхо X_1 и класса негрозовых X_2 в пространстве признаков X. Решение этой задачи определяет отображение δ, которое строится с помощью методов математической статистики, включающих как параметрические, так и непараметрические алгоритмы. Реализация r построенной классификации $q=\{X_1, X_2\}$ отображением δ в шестимерном пространстве признаков X осуществляется отображением ε по правилу (3). Это правило обеспечивает построение разбиения пространства метеорологических объектов Ω на два класса. К первому классу Ω_1 относятся все кучево-дождевые облака, сопровождающиеся грозами. Второй класс Ω_2 состоит из негрозовых кучево-дождевых облаков. Подсистема распознавания s представляет собой композицию рассмотренных выше отображений.

Построение конкретных алгоритмов распознавания метеорологических объектов связано с выбором функций $q_i(x, \tau)$ и способом их задания.

Если при данном метеорологическом объекте ω считать известным, каким классам Ω_i принадлежат значения функций $\omega_n(\omega)$, то в качестве функций потерь часто рассматриваются функции вида

$$q_i(x, \tau)=\sum_{j=1}^{l} c_{ij} d_j(x, \tau). \tag{7}$$

В этой формуле c_{ij} — штраф, уплачиваемый за отнесение явления i-того класса к j-тому классу, матрицы штрафов $|c_{ij}|$. $d_j(x, \tau)$ — функция достоверности того, что $x(\omega)$ соответствует метеорологическому объекту $\omega \in \Omega_j$. Функция достоверности задается следующим выражением:

$$d_j(x, \tau) = \frac{P_j p(x \mid \Omega_j(\tau))}{p(x)}, \tag{8}$$

где P_j — вероятность появления метеорологического объекта j-го класса, $p(x)$ — плотность вероятности, индуцируемая в R^N отображением $x(\omega)$, $p(x|\Omega_j(\tau))$ — условная плотность распределения метеорологических объектов j-го класса. Считается, что указанные плотности распределений существуют.

Задание функций потерь такого вида приводит к байесовому разбиению пространства признаков

$$(x \in X_i(\tau)) \Longleftrightarrow \left(\sum_{j=1}^{l} c_{ij} d_j(x, \tau) \leqslant \sum_{j=1}^{l} c_{kj} d_j(x, \tau) \quad \text{при} \quad k \neq i \right).$$

При решении задач D_ω распознавания метеорологических объектов по данным дистанционного зондирования очень часто приходится решать эту задачу при отсутствии априорной классификации обучающей выборки. Это связано с возможными ошибками визуальной интерпретации этих данных. Следовательно, необходимо строить такие алгоритмы классификации, которые учитывали бы структуру носителей распределений наблюдаемых метеорологических объектов.

Анализ носителей многомерных распределений признаков метеорологических объектов показывает, что большинство имеет либо внутриклассовую дисперсию значений признаков меньше межклассовой, либо внутриклассовая дисперсия больше межклассовой и носители распределений имеют «вытянутую» форму.

В первом случае функцию потерь естественно выбирать в виде

$$q_i(x, \tau) = \| x - \tau^{(i)} \|^2.$$

Минимизация функционала (1) в этом случае означает отыскание разбиения с минимальной суммой дисперсий по всем классам $X_i(\tau)$. По существу это соответствует аппроксимации распределений классов нормальными распределениями со сферическими ковариационными матрицами.

Однако исследование носителей многомерных распределений радиолокационных параметров метеорологических объектов показывает, что чаще бывает второй случай — случай «вытянутости» носителей классов $X_i(\tau)$ [1]. Для этого случая целесообразно применить алгоритм распознавания, предложенный в работе [2]. В этом алгоритме функции потерь представляются следующим образом:

$$q_i(x, \tau) = \frac{[(u^{(i)}, x) + v^{(i)}]^2}{\| u^{(i)} \|^2}.$$

Задача в рассматриваемом варианте состоит в построении таких гиперплоскостей $(u^{(i)}, x)+v^{(i)}=0$, относительно которых «рассеяние» множества X минимально.

Описанные выше алгоритмы самообучения могут рассматриваться как алгоритмы обучения, если в них не вводить обратной связи по решениям о классификации поступающих векторов признаков метеорологических объектов.

Построение иерархических систем распознавания, которые способны работать в условиях априорной неопределенности относительно вида закона распределения радиолокационных характеристик и дополнительной адаптации системы к особенностям обучающей выборки, связанной с разделимостью векторов в пространстве признаков, позволяет более эффективно решать задачи радиометеорологии и более оптимально обслуживать народное хозяйство.

Автор глубоко благодарен д-ру техн. наук проф. Ю. А. Мельнику за постоянное внимание к работе и за ценные замечания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Брылёв Г. Б., Сонечкин Д. М. Предварительные результаты применения техники квадратичного дискриминантного анализа для распознавания градовых и ливневых радиоэхо.— Труды ГГО, 1976, вып. 383, с. 91—102.

2. Лиховидов В. Н., Солонин А. С., Фомин В. Н. О сходимости рекуррентного алгоритма в одной задаче самообучения.— Вестник ЛГУ, 1978, № 13, с. 139—141.

3. Сальман Е. М., Гашина С. Б., Линев А. Г. Некоторые вопросы автоматизированного получения и анализа радиолокационной информации.— Метеорология и гидрология, 1976, № 7, с. 113—117.

Г. Б. Брылев, А. В. Завдовьев, А. Г. Линев

ПРИНЦИП ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СОВОКУПНОСТИ АЛГОРИТМОВ ПРИ АВТОМАТИЗАЦИИ РАСПОЗНАВАНИЯ РАДИОЭХО ГРОЗ И ОСАДКОВ

Исследования различных алгоритмов распознавания радиоэхо гроз и осадков, проводившиеся до сих пор [1—4], посвящены в основном сравнению между собой эффективности отдельных алгоритмов распознавания. Целью этих исследований явился выбор одного, достаточно надежного алгоритма распознавания, который можно было бы рекомендовать для реализации в специализированном вычислительном устройстве — аппаратуре автоматизированной обработки метеоинформации (ААОМ), поскольку реализация нескольких различных алгоритмов распознавания представляла определенные технические трудности. Применение для автоматизации анализа ЭВМ, работающей в комплексе с ААОМ, позволяет реализовать несколько схем распознавания, использующих различное количество признаков и разный физический подход. При этом окончательное решение может приниматься по совокупности решений отдельных схем распознавания.

Поэтому представляет интерес рассмотреть возможность использования совокупности алгоритмов и оценить эффективность такого подхода.

В качестве исходного материала были взяты данные наблюдений на комплексе МРЛ—ААОМ в Минске и Гомеле за 1975 г. Данные ААОМ представляют собой статистические ряды реализаций, дискретно описывающих вертикальный профиль $Z(H)$ гроз и осадков в ячейках пространства 30×30 км^2 (H_{max}) и отражаемость в слоях высоты 2—4 км (Z_2), 4—6 км (Z_3), 6—8 км (Z_4) и 8—10 км (Z_5).

Для исследований было выбрано: по данным Гомеля 390 случаев гроз и 636 случаев негрозовых осадков, по данным Минска 256 случаев гроз и 594 случая негрозовых осадков.

Учитывая необходимость корректировки критериальных значений в зависимости от удаления метеообъекта от МРЛ (поскольку из-за ослабления радиоволн и увеличения объема осреднения при

измерениях происходит деформация многоугольников плотности распределения вероятности признаков с расстоянием), исходные данные были сгруппированы по двум градациям расстояния ($R \leqslant 150$ км и $R > 150$ км). Для каждой из этих групп определялись критериальные значения или рассчитывались плотности распределения условной вероятности признаков. В табл. 1 приведены результаты этих расчетов.

К задаче распознавания метеообразований по радиолокационным характеристикам было представлено два класса атмосферных образований: класс грозоопасных Cb (условное обозначение ω_1), и класс негрозовых осадков (условное обозначение ω_2). Распознавание проводилось по следующим алгоритмам.

1. Критерий мажоритарного выбора

$$S_1 = \sum_{i=1}^{5} \operatorname{sign}(x_i - P_i) \geqslant 3.$$

2. $S_2 = H \sum_{i=2}^{5} Z_i > S_0,$

где $S_0 = \begin{cases} 290 & \text{для } R \leqslant 150 \text{ км}, \\ 220 & \text{для } R > 150 \text{ км}. \end{cases}$

3. $S_3 = HZ_3 > Y_0,$

где $Y_0 = \begin{cases} 85 & \text{для } R \leqslant 150 \text{ км}, \\ 70 & \text{для } R > 150 \text{ км}. \end{cases}$

4. Схема Байеса

$$S_4 = \frac{P(\omega_1)}{P(\omega_2)} \prod_{i=1}^{5} \frac{P(x_i/\omega_1)}{P(x_i/\omega_2)} \geqslant 1.$$

В данной схеме рассчитывались апостериорные вероятности двух взаимоисключающих событий (классов ω_1 и ω_2), характеризуемых 5-мерным вектором независимых признаков $X(H, Z_2, Z_3, Z_4, Z_5)$. В формуле $P(\omega_1)$ и $P(\omega_2)$ — априорные вероятности классов, а $P(x_i/\omega_1)$ и $P(x_i/\omega_2)$ — условные вероятности признаков.

5. Квадратичная дискриминантная функция [1], разделяющая пространство признаков на два класса,

$$S_5 = (x - x_{\text{ср}}) \sum_{2}^{-1} (x - x_{\text{ср}})^{\text{т}} - (x - y_{\text{ср}}) \sum_{2}^{-1} (x - y_{\text{ср}})^{\text{т}} \geqslant D_0,$$

где $x_{\text{ср}}$ и $y_{\text{ср}}$ — векторы средних значений в классах ω_1 и ω_2, $\sum_1^{-1}$ и $\sum_2^{-1}$ — обратные корреляционные матрицы в классах ω_1 и ω_2.

Для принятия решения по совокупности алгоритмов использован принцип мажоритарного выбора (алгоритм 6)

$$S_6 = \sum_{i=1}^{5} \operatorname{sign}(S_i - S_{0i}) \geqslant 3.$$

Проверка правильности классификации проводилась сопоставлением радиолокационной информации о явлении с данным

Таблица 1

Статистическая частота P появления признаков H, Z_2, Z_3, Z_4, Z_5, которые использовались в алгоритмах классификации по Байесу по данным 1975 г.

Признак	Значения признаков															
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
	Грозы, $R \leqslant 150$ км															
H	0	0	0	0,02	0,03	0,04	0,10	0,17	0,19	0,17	0,14	0,09	0,03	0,02	0,01	0,01
Z_2	0	0	0	0	0	0	0,01	0,02	0,04	0,04	0,06	0,14	0,26	0,25	0,12	0,10
Z_3	0	0	0	0	0	0	0,01	0,02	0,05	0,06	0,11	0,21	0,24	0,18	0,08	0,02
Z_4	0	0	0	0	0	0	0,01	0,03	0,12	0,20	0,20	0,17	0,13	0,09	0,03	0,01
Z_5	0	0	0	0	0	0	0,02	0,11	0,24	0,25	0,17	0,09	0,05	0,04	0,01	0,01
	Грозы, $R > 150$ км															
H	0	0	0	0	0,01	0,02	0,06	0,13	0,26	0,23	0,13	0,10	0,04	0,02	0,01	0,01
Z_2	0	0	0	0	0	0	0,01	0,01	0,05	0,30	0,25	0,12	0,20	0,05	0,02	0,02
Z_3	0	0	0	0	0	0	0,01	0,0	0,01	0,08	0,11	0,13	0,15	0,30	0,15	0,05
Z_4	0	0	0	0	0	0	0,01	0,01	0,05	0,30	0,25	0,08	0,09	0,16	0,12	0,12
Z_5	0	0	0	0	0	0	0,01	0,03	0,06	0,50	0,14	0,06	0,08	0,08	0,03	0,02
	Без грозы, $R \leqslant 150$ км															
H	0,01	0,05	0,14	0,23	0,21	0,13	0,05	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Z_2	0	0	0	0	0	0	0,02	0,11	0,21	0,19	0,14	0,15	0,12	0,04	0,02	0,02
Z_3	0	0	0	0	0	0	0,05	0,20	0,30	0,21	0,09	0,03	0,04	0,01	0,01	0,01
Z_4	0	0	0	0	0	0	0,05	0,26	0,38	0,20	0,01	0,03	0,02	0,01	0,01	0,01
Z_5	0	0	0	0	0	0	0,16	0,39	0,32	0,09	0,02	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
	Без грозы, $R > 150$ км															
H	0,01	0,01	0,02	0,02	0,10	0,09	0,30	0,30	0,05	0,06	0,02	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
Z_2	0	0	0	0	0	0	0,01	0,01	0,15	0,40	0,20	0,10	0,10	0,05	0,01	0,01
Z_3	0	0	0	0	0	0	0,01	0,01	0,20	0,40	0,15	0,07	0,07	0,05	0,02	0,01
Z_4	0	0	0	0	0	0	0,01	0,05	0,30	0,50	0,05	0,03	0,03	0,01	0,01	0,01
Z_5	0	0	0	0	0	0	0,01	0,01	0,30	0,50	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01

наземных наблюдений. При этом за критерий совпадения наземной и радиолокационной информации о грозах был выбран часовой промежуток от середины срока радиолокационных наблюдений и радиус ±30 км от метеостанции, на которой зафиксирована гроза. Все данные, не удовлетворяющие этим двум условиям, считались несовпавшими.

Таким образом, анализ эффективности алгоритмов и их достоверности будет справедлив только для таких условий сопоставления. Сужение пространственно-временного интервала может дать другие показатели надежности радиолокационной информации.

Для сравнительной оценки эффективности алгоритмов рассчитывались:

а) относительная вероятность правильного распознавания класса

$$P_{\text{в}}(\omega_i)=\frac{n_{\omega i}}{N_{\omega i}},$$

где $n_{\omega i}$ — число правильных классификаций, $N_{\omega i}$ — число векторов данного класса. Относительная ошибка распознавания определялась как

$$P=1-P_{\text{в}}(\omega_i);$$

б) общая вероятность правильной классификации:

$$P(e)=P(\omega_1)\,P_{\text{в}}(\omega_1)+P(\omega_2)\,P_{\text{в}}(\omega_2),$$

где $P(\omega_1)$ и $P(\omega_2)$ — вероятность появления классов ω_1 и ω_2;

в) отношение числа «ложных» тревог, т. е. числа перевода негрозовых осадков в класс гроз, к общему числу гроз

$$D=\frac{N_{\omega_2}[1-P_{\text{в}}(\omega_2)]}{N_{\omega_1}}.$$

Результаты расчета представлены в табл. 2.

Таблица 2

Характеристики эффективности алгоритмов в поле признаков (%)

Характеристика распознавания	Алгоритм					
	1	2	3	4	5	6
			Гомель			
$P_{\text{в}}(\omega_1)$	82,6	88,4	64,8	84,1	82,3	84,3
$1-P_{\text{в}}(\omega_2)$	9,5	21,6	5,4	16,4	14,9	0
D	15,5	35,2	8,8	26,7	24,3	0
$P(e)$	87,5	82,2	83,3	83,8	84,0	94,0
			Минск			
$P_{\text{в}}(\omega_1)$	83,6	87,5	60,9	85,1	78,1	85,5
$1-P_{\text{в}}(\omega_2)$	3,7	12,5	1,4	9,3	5,6	0
D	8,7	29,0	3,2	21,5	12,8	0
$P(e)$	92,5	87,5	87,3	89,0	89,5	95,6

Анализируя результаты распознавания по различным алгоритмам, представленные в табл. 2, можно сделать следующие выводы.

1. Каждый из рассмотренных пяти алгоритмов обеспечивает примерно одинаковую общую вероятность распознавания $P(e)$, (что отмечалось в ранее выполненных работах), хотя относительная вероятность распознавания $P_в(\omega_1)$ алгоритма 3 (критерий Y_0) меньше относительной вероятности распознавания остальных алгоритмов.

2. Принятие решения по совокупности алгоритмов при сохранении достаточно высокой относительной вероятности правильного распознавания гроз сводит к минимуму (в данном случае к 0) вероятность «ложной» тревоги, обеспечивая тем самым увеличение общей вероятности правильного распознавания $P(e)$ на 3—6 % ($P(e) = 94 \div 96$ %).

Разобьем пространство векторов на три зоны:

1) зона однозначного определения гроз, где векторы по всем пяти алгоритмам относятся к классу ω_1;

2) зона однозначного определения негрозовых осадков, где векторы по всем пяти алгоритмам относятся к классу ω_2;

3) зона неопределенности.

В зону неопределенности попадают от 40 до 50 % гроз и 20—30 % негрозовых осадков.

Для оценки эффективности различных алгоритмов в зоне неопределенности были рассчитаны те же характеристики распознавания, что и для всего пространства признаков. Результаты расчета приведены в табл. 3.

Таблица 3

Характеристики эффективности алгоритмов в зоне неопределенности признаков (%)

Характеристика распознавания	Алгоритм					
	1	2	3	4	5	6
			Гомель			
$P_в(\omega_1)$	56,4	71,3	12,7	60,3	56,0	61,1
$1 - P_в(\omega_2)$	35,5	80,5	20,1	61,1	56,9	0
$P(e)$	60,9	44,3	47,8	49,4	50,0	81,3
			Минск			
$P_в(\omega_1)$	66,5	74,5	20,2	69,6	56,1	70,4
$1 - P_в(\omega_2)$	20,8	69,4	7,8	51,4	30,8	0
$P(e)$	72,0	53,7	53,0	59,3	61,1	87,3

Как следует из таблицы, общая вероятность распознавания $P(e)$ практически для каждого из пяти алгоритмов составляет 50—60 %. Использование принципа принятия решения по совокупности алгоритмов позволяет существенно повысить общую вероятность распознавания в зоне неопределенности.

Вероятность правильного распознавания увеличивается в этом случае до 80—85 %, т. е. на 15—20 % по сравнению с отдельными алгоритмами, увеличивая тем самым вероятность правильной классификации по всему пространству признаков.

Таким образом, полученные результаты позволяют сделать вывод, что принцип принятия решения по совокупности алгоритмов обеспечивает бо́льшую надежность распознавания, чем отдельно взятые алгоритмы, и, что особенно важно, обеспечивает достаточно высокую надежность в зоне неопределенности, когда принятие решения по одному алгоритму затруднительно.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Брылев Г. Б., Сонечкин Д. М. Предварительные результаты применения техники квадратичного дискриминантного анализа для распознавания грозовых и ливневых радиоэхо.— Труды ГГО, 1976, вып. 383, с. 91—102.

2. Вопросы автоматизированного получения радиолокационной информации об опасных Cb/С. Б. Гашина, А. Г. Линев, В. А. Петрушевский, Е. М. Сальман.— Труды ГГО, 1974, вып. 327, с. 18—25.

3. Оптимальные численные схемы распознавания класса грозоопасных Cb и негрозоопасных осадков/С. Б. Гашина, А. Г. Линев, В. Г. Оноприенко, Е. М. Сальман.— Труды ГГО, 1976, вып. 383, с. 18—25.

4. Численный эксперимент по распознаванию грозовых Cb/Е. М. Сальман, С. Б. Гашина, А. Г. Линев, Н. Д. Попова.— Труды ГГО, 1974, вып. 327, с. 32—39.

Г. Б. Брылев, Д. М. Сонечкин, В. В. Шведов

ВЛИЯНИЕ ОБУЧАЮЩЕЙ ВЫБОРКИ НА РАСПОЗНАВАНИЕ РАДИОЭХА ГРОЗ И ЛИВНЕЙ

В работе [1] для распознавания грозового и ливневого радиоэха была использована техника квадратичного дискриминантного анализа на главных компонентах. Результаты испытания построенной дискриминантной функции на материалах наблюдений семи радиолокационных станций МРЛ за летние сезоны 1973—1974 гг. обнаружили высокое качество распознавания (2,5 % нераспознанных гроз и 17,5 % неправильно распознанных ливней в среднем для всех МРЛ, кроме МРЛ на ст. Минеральные Воды, для которого результаты распознавания ливневого радиоэха оказались совсем неудовлетворительными). В данной статье описываются результаты испытания разработанного метода на массовом материале радиолокационных наблюдений. Всего здесь было рассмотрено 9608 грозовых и 3664 ливневых радиолокационных отражений, относящихся к наблюдениям восьми МРЛ (Борисполь, Гомель, Ростов, Пенза, Минеральные Воды, Свердловск, Новосибирск, Чита), за летние сезоны 1973—1976 гг. (всего 15 сезоно-станций). Независимая идентификация грозового и ливневого радиоэха производилась по данным наземных метеостанций, расположенных в пределах ±30 км от зоны максимальной отражаемости, за сроки, отличающиеся от момента наблюдения радиоэха на ±1 ч.

С целью выяснения, насколько применима дискриминантная функция, полученная при обучении на данных одной какой-то радиолокационной станции за один сезон, для распознавания данных других МРЛ и других сезонов на первом этапе данной работы было сформировано 15 обучающих выборок по числу сезоно-станций. На каждой из этих выборок построена дискриминантная функция, которая испытывалась на данных остальных сезоно-станций. Результаты испытаний показали, что данные наблюдений любой из сезоно-станций, за исключением данных ст. Минеральные Воды за 1973 г. и ст. Пенза за 1974 и 1975 гг., вполне пригодны для обучения. Построенные по каждой из обучающих выборок дискриминантные функции обеспечивают на независимых

данных других сезоно-станций ошибки распознавания грозового и ливневого радиоэха в среднем не намного больше, чем соответствующие ошибки на данных обучающей выборки (рис. 1). Абсолютные величины ошибок примерно равны тем, которые были получены при независимых испытаниях в работе [1], где для обучения использовались лишь данные Борисполя и Новосибирска.

Полученные результаты убедительно свидетельствуют о допустимости распространения результатов обучения распознавания грозового и ливневого радиоэха в одном географическом районе на другие географические районы. Что касается вышеуказанных трех сезоно-станций, для которых как при использовании их в качестве обучающих, так и при испытании их в качестве экзаменующих получились плохие результаты, то имеются основания считать, что причиной этого являются систематические ошибки, обусловленные особенностями эксплуатации. Косвенным подтверждением этого является хорошее качество как обучения, так и экзамена на данных МРЛ ст. Минеральные Воды за 1975 г., когда, как известно, техническое состояние станции было хорошим. Вторым выводом, следующим из проведенных испытаний, является возможность использования разработанного метода распознавания грозового и ливневого радиоэха для контроля правильности функционирования радиолокационных станций.

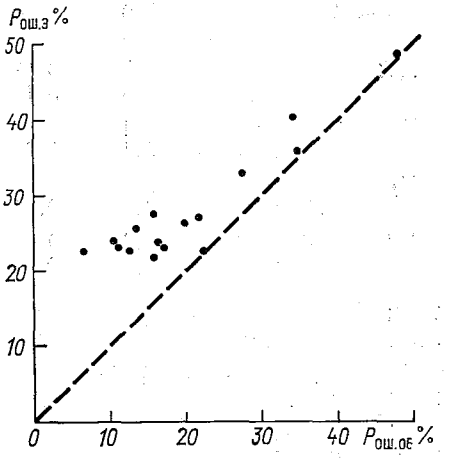


Рис. 1. Зависимость средней суммарной ошибки экзаменационных выборок ($P_{ош.э}$) от минимальной обучающей ошибки ($P_{ош.об}$), полученной по совокупности пяти признаков (штриховая линия — биссектриса).

На втором этапе работы данные всех сезоно-станций, кроме трех отбракованных (а также МРЛ на ст. Ростов), были использованы для построения единой дискриминантной функции (8673 грозовых и 2333 ливневых радиолокационных отражений). В табл. 1 приведены оцененные по этой выборке векторы средних и ковариационно-корреляционные матрицы классов грозовых и ливневых радиолокационных отражений. Из данных табл. 1 следует, что между значениями первичных признаков: высотой максимальной отражаемости ($H_{макс}$); логарифмом отражаемости ($\lg Z$) на уровне, превышающем нулевую изотерму на 2—2,5 км; величиной $Y = H_{макс} \lg Z$; высотой изотермы — 22 °С (H_t), полученной по данным ближайшего радиозонда; величиной $\Delta H = H_{макс} - H_t$, существуют в большинстве случаев значительные корреляционные связи, затрудняющие оценку информативности

Таблица 1

Средние значения первичных признаков и ковариационные (верхний треугольник, включая диагональные члены) и корреляционные (нижний треугольник) матрицы для классов грозовых и ливневых отражений радиоэха

Признаки	Явление	Среднее	Признаки				
			$H_{макс}$	$\lg Z$	Y	H_t	ΔH
$H_{макс}$	Гроза	9,0	3,28	0,20	9,22	0,24	3,03
	Ливень	6,8	2,93	0,24	3,04	0,35	2,57
$\lg Z$	Гроза	2,2	0,15	0,56	5,67	—0,03	0,23
	Ливень	0,6	0,15	0,84	5,65	0,01	0,23
Y	Гроза	20,1	0,59	0,87	75,46	0,29	8,92
	Ливень	4,4	0,27	0,95	42,48	0,32	2,73
H_t	Гроза	6,4	0,24	—0,06	0,06	0,32	—0,07
	Ливень	6,2	0,32	0,02	0,08	0,43	—0,07
ΔH	Гроза	2,6	0,95	0,17	0,58	—0,07	3,10
	Ливень	0,6	0,90	0,15	0,25	—0,07	2,65

этих признаков для распознавания. Оправданным поэтому является переход к статистическим главным компонентам гауссоских аппроксимаций распределений вероятности этих признаков по классам.

Матрица преобразования первичных признаков к главным компонентам

$$C_i = \sum_{j=1}^{5} a_{ij} x_j$$

представлена в табл. 2, а необходимые для вычисления дискриминантной функции вектор средних значений главных компонентов и

Таблица 2

Матрица преобразования (a_{ij}) первичных признаков (x_j) к главным компонентам (C_i) (строки матрицы упорядочены по информативности компонентов, оцененной значением расстояния Бхаттачария)

C_i	x_j				
	$H_{макс}$	$\lg Z$	Y	H_t	ΔH
C_1	5,041	6,664	—0,684	—3,350	—3,423
C_2	—0,076	—1,234	0,196	—0,001	0,075
C_3	—36,510	0,834	—0,084	36,650	36,740
C_4	0,148	—0,559	—0,067	0,272	0,347
C_5	—0,618	—0,242	0,038	2,258	0,419

вектор их собственных чисел для класса ливней даны в табл. 3. Результаты распознавания для этой же (зависимой) выборки

Таблица 3

Средние значения и дисперсии (собственные числа) главных компонент (C_i) в классе ливней, упорядоченные по значениям расстояния Бхаттачария

C_i	Расстояние Бхаттачария	Среднее	Дисперсия
C_1	0,894	—3,481	12,00
C_2	0,774	—1,093	0,173
C_3	0,710	—0,294	14,96
C_4	0,434	0,870	1,233
C_5	0,352	—0,096	1,316

приведены в табл. 4 и обнаруживают следующее. Минимальное число нераспознанных гроз (3,9 %) достигается при использовании четырех главных компонентов, а минимальное число ложных гроз (14,8 %) — при учете двух главных компонентов. Однако минимизация суммарной ошибки, вычисляемой в предположении,

Таблица 4

Результаты распознавания (% ошибок) грозового и ливневого радиоэха в среднем для семи радиолокационных станций на летние сезоны 1973—1976 гг.

C_i	Распознавание по каждой компоненте отдельно		Распознавание по n первым компонентам	
	Грозы	Ливни	Грозы	Ливни
C_1	5,9	27,2	5,9	27,2
C_2	35,9	5,5	13,6	14,8
C_3	1,0	89,0	5,0	27,0
C_4	28,9	40,4	3,9	21,3
C_5	23,7	69,3	4,2	22,2

что классы равновероятны, требует использования четырех главных компонентов. Суммарная ошибка составляет при этом 12,6 % (0,5·(3,9+21,3) %). Эти цифры почти не отличаются от полученных в работе [1], что может служить доказательством их надежности. Надо отметить, что при распознавании с помощью полученной общей дискриминантной функции данных отдельных сезоно-станций, входящих в обучающую выборку, получаются заметные различия в ошибках первого и второго рода. Так, нераспознанные грозы составляют 1,2—14,79 %, а ложные 5,9—34,0 %. Однако

суммарная ошибка колеблется в меньших пределах (от 7,5 до 20,8 %). При этом оптимальное число главных компонентов составляет: 2 для пяти сезоно-станций, 3 для одной, 4 для четырех и 5 для одной сезоно-станции, т. е. в подавляющем большинстве случаев достаточно четырех главных компонентов.

Анализ вкладов дисперсий первичных признаков в главные компоненты (см. табл. 1 и 2) показывает, что наиболее информативной является величина Y, вклад которой является наибольшим по сравнению со всеми остальными в первый, второй и четвертый компоненты. Наибольший вклад в третий компонент вносит признак H_{-22}. Зато вклад этого признака в первый, второй и четвертый компоненты пренебрежимо мал. Признаки $H_{\text{макс}}$ и ΔH тесно связаны (см. табл. 1), и их вклады надо рассматривать совместно. С учетом этого можно сказать, что они весомы для первого и четвертого компонентов. Вклад их во второй компонент довольно мал, а в третий — пренебрежимо мал. Признак $\lg Z$ важен для расчета второго и третьего компонентов, менее важен (но не пренебрежимо) для первого компонента. Так как из вышесказанного следует, что на большинстве МРЛ надо использовать четыре компонента, то получается, что существенны все первичные признаки. Для МРЛ, где оптимальное число компонентов меньше трех, первичный признак H_{-22} можно не принимать во внимание.

Из рис. 2, где в качестве обучающей выборки взяты данные одного МРЛ, полученные за три разных года, видно, во-первых, что наибольшая повторяемость главных компонентов у экзаменационных МРЛ 10 других городов та же, что и у обучающих; во-вторых, что данные одного и того же МРЛ за разные годы могут отличаться очень существенно. Последнее можно объяснить либо изменчивостью погодного режима в течение рассматриваемых лет, либо дрейфом технических параметров МРЛ.

Последний проведенный эксперимент имел целью проверить, насколько надежен разработанный метод в наиболее сложных условиях слабых гроз и сильных ливней, когда характеристики радиоэха тех и других близки. Обучающая выборка для этого эксперимента была составлена из данных, использованных выше, но из их числа были исключены грозы, для которых значения Y превышали 5 % самых интенсивных ливней, и ливни, для которых значения Y превышали 1 % самых слабых гроз. Исключенные ситуации почти достоверно распознаются по значению их первого компонента, в который, как отмечалось, решающий вклад вносит величина Y. Оставшиеся 6213 грозовых и 1973 ливневых радиолокационных отражения находятся вблизи дискриминирующей поверхности. Естественно, что для них ошибки оказались больше, чем для всех радиолокационных отражений в целом. Нераспознанных гроз было 6,7 %, а ложных — 56,3 %. Последняя цифра особенно велика. Однако если учесть, что при наземных наблюдениях, которые были использованы для идентификации радиоэха, далеко не все грозы регистрируются, особенно слабые, то можно думать, что фактическое число ложных гроз гораздо меньше.

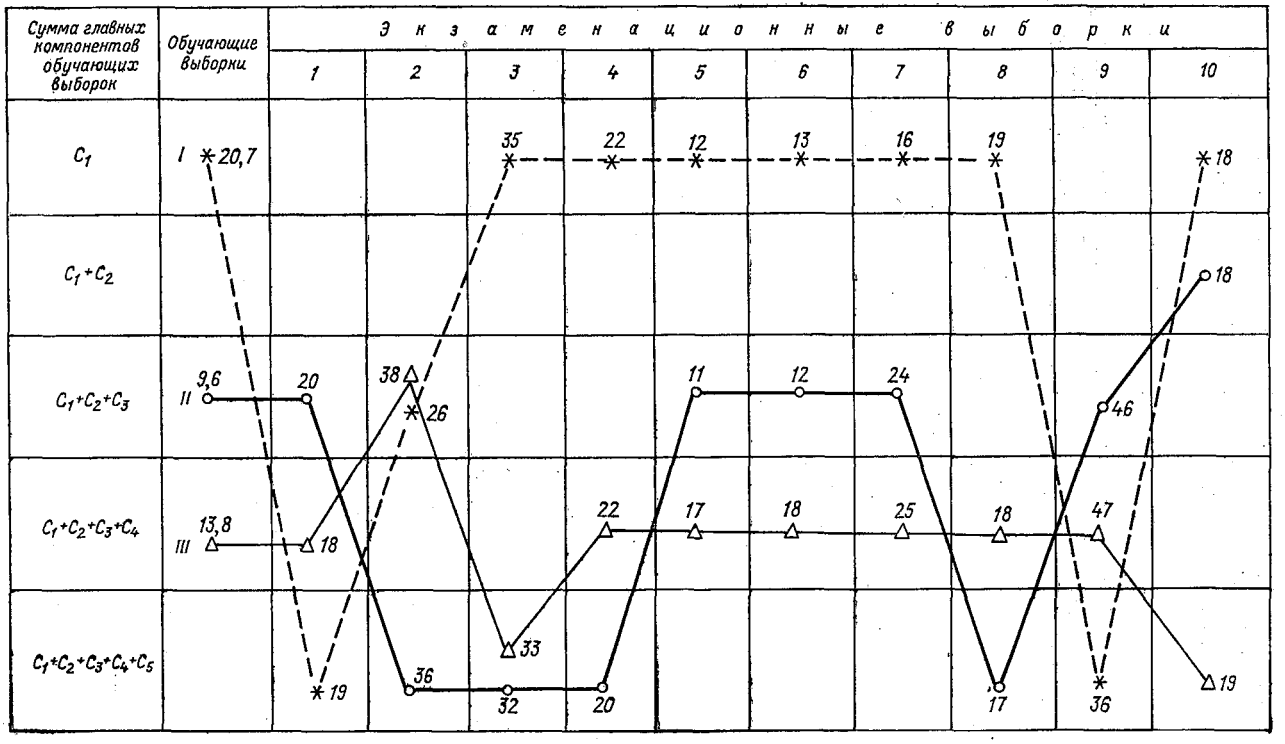


Рис. 2. Изменение минимальной суммарной ошибки распознавания (%) экзаменационных выборок для данных 10 МРЛ в зависимости от минимальной ошибки распознавания обучающих выборок (*I—III*) МРЛ, в качестве которых выбраны наблюдения одного МРЛ за три различных года.

В целом выполненные расчеты подтверждают высокое качество распознавания грозового и ливневого радиоэха с помощью разработанного метода. Кроме того, они демонстрируют его пригодность для осуществления оперативного контроля надежности радиолокационных данных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Брылев Г. Б., Сонечкин Д. М. Предварительные результаты применения техники квадратичного дискриминантного анализа для распознавания грозовых и ливневых радиоэхо.— Труды ГГО, 1976, вып. 383, с. 91—102.

Г. Б. Брылев, А. В. Завдовьев, Г. Л. Низдойминога

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ РАДИОЭХА ОБЛАКОВ И ОСАДКОВ НА ОСНОВЕ КОРРЕЛЯЦИОННОГО АНАЛИЗА

До настоящего времени определение скорости (V) и направления перемещения (d) зон радиоэха облаков и осадков является наиболее субъективной операцией при проведении регулярных наблюдений на МРЛС. Ее объективизация затруднена, очевидно, тем, что радиоэхо в процессе перемещения может менять произвольно свою форму в результате:

— процессов естественного развития и распада облаков;

— орографических эффектов, усиливающих или ослабляющих эти процессы;

— особенностей наблюдений и интерпретации данных на МРЛ.

Эти факторы, взаимодействуя, приводят к тому, что правильное определение V и d возможно примерно в 30 % случаев наблюдений радиоэха. От оператора МРЛ при этом требуется известное мастерство и знание наиболее вероятных траекторий перемещения радиоэха в районе наблюдений.

Более объективным и надежным методом измерений V и d и на этой основе прогнозирования их перемещения является применение техники корреляционного анализа полей, перемещающихся с произвольной скоростью и меняющих свою форму. Он достаточно подробно изложен в работах [3—7].

Трехмерная пространственно-временная корреляционная функция стационарного поля имеет следующий вид:

$$\rho(\xi, \eta, \Delta t) = \frac{\langle \{F(x, y, t) - \langle F \rangle\} \{F(x+\xi, y+\eta, t+\Delta t) - \langle F \rangle\} \rangle}{\langle \{F(x, y, t) - \langle F \rangle\}^2 \rangle}. \quad (1)$$

Наблюдая поле $F(x, y, t)$ через временной интервал Δt, можно рассчитать двухмерную пространственную взаимно-корреляционную функцию $\rho(\xi, \eta, \Delta t)$ и определить ее максимум $\rho_{\text{макс}} = \rho(\xi', \eta', \Delta t)$, где ξ' и η' — координаты максимума. С помощью

(ξ' и η') задается вектор положения $\mathbf{r}$ на плоскости (x, y) (рис. 1 *а*, *б*). Скорость поля определяется выражением

$$\mathbf{V}=\mathbf{r}/\Delta t. \qquad (2)$$

Таким образом, максимальное значение коэффициента взаимной корреляции $\rho_{макс}$ служит показателем развития поля, а изменение его координат во времени дает наилучшую оценку среднего движения поля за интервал времени Δt.

Для оценки вклада случайных изменений поля в вектор скорости $\mathbf{V}$ можно использовать

$$\mathbf{V}_{сл}=\mathbf{r}''/\Delta t, \qquad (3)$$

где $\mathbf{r}''$ определяется координатами (ξ'', η''), в которых пространственная автокорреляционная функция $\rho(\xi'', \eta'', 0) = \rho_{макс}$.

Если отношение $\mathbf{V}_{сл}/\mathbf{V} = 0$, то наблюдаемые временные изменения ноля в фиксированной точке являются полностью обусловленными движением поля мимо точки. При $\mathbf{V}_{сл}/\mathbf{V} \to \infty$ временные изменения поля происходят без вклада перемещения.

Наблюдая поля $F(t_i - \Delta t)$ и $F(t_i)$ в моменты времени $(t_i - \Delta t)$ и t_i, можно рассчитать вектор $\mathbf{V}$ и использовать его для прогноза наиболее вероятного положения поля $F(t_i)$ во время $t_i + \Delta t$. Оценка точности такого прогноза производится дополнительным расчетом значения коэффициента взаимной корреляции $\rho_{опт}$ между смещенным $F(t_i)$ и фактическим полем, наблюдавшимся во время $t_i + \Delta t$. Поскольку $F(t_i)$ переносится в прогнозируемое положение без изменения структуры, величина $(1 - \rho_{опт})$ будет мерой изменчивости поля за интервал Δt. Пространственная ошибка при этом определяется как разность между прогностическим положением и координатами $\rho_{опт}$.

Опыт расчетов показал, что вычисление коэффициентов взаимной корреляции для всех возможных смещений поля в обеих декартовых координатах является экономически неэффективным из-за большого времени счета. Для его уменьшения в работе [7] предлагается определять максимальный коэффициент корреляции сначала на «грубой» сетке, а затем уточнять его на «мелкой». Однако такой подход может приводить к значительным ошибкам прогноза, если на грубой сетке выявлен не абсолютный, а локальный максимум (последнее наиболее вероятно при квазипериодичности поля осадков).

Мы полагаем более перспективным сначала определять $\mathbf{V}$ по максимальному коэффициенту совмещения площадей в матрице совмещений (последняя аналогична взаимно-корреляционной, но ее счет идет быстрее в 6 раз), а затем уточнять путем расчета коэффициентов корреляции вокруг первого приближения. Такой подход изложен в схеме применения алгоритма прогноза скорости и направления перемещения радиоэха облачности и зон осадков (табл. 1). Однако он не единственно возможный. При наличии данных аэрологического зондирования для предварительного прогноза перемещения радиоэха можно использовать рекомендации

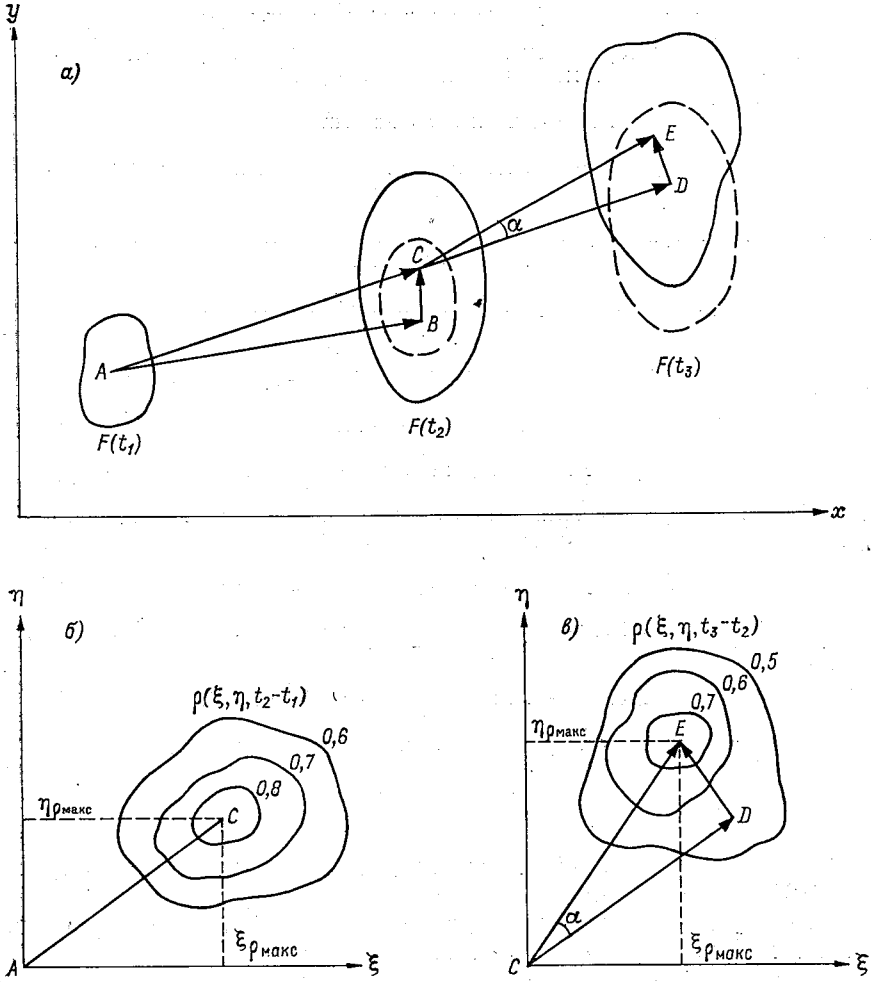


Рис. 1. Иллюстрация метода пространственно-временнóй корреляции определения скорости и направления перемещения радиоэха.

а — реализация радиоэха F в моменты времени t_1, t_2, t_2: AB — вектор перемещения, рассчитанный методом максимального совмещения площадей; BC — вектор уточнения, рассчитанный корреляционным методом; AC — вектор реального перемещения за время $t_2—t_1$; CD — вектор прогноза перемещения радиоэха на момент времени t_3; CE — вектор фактического перемещения за время $t_3—t_2$; DE — вектор ошибки прогноза; α — отклонение по направлению прогноза от реального смещения; *б* и *в* — изолинии взаимно-корреляционных функций $\rho(\eta, \xi, \Delta t)$ для реализаций $F(t_1)$, $F(t_2)$ и $F(t_2)$, $F(t_3)$ (векторы проведены в точку максимального значения корреляционной функции).

Таблица 1

Схема применения алгоритма для прогноза скорости и направления перемещения радиоэха облачности и зон осадков

Расчет матрицы площадных перекрытий $M(t_1, t_2)$

↓

Определение вектора перемещения AB по максимальному совмещению в матрице площадей $M(t_1, t_2)$

↓

Перенос поля $F(t_1)$ на вектор AB

↓

Расчет взаимно-корреляционной матрицы $M(t_1, t_2)$ для реализаций $F(t_2)$ и смещенного $F(t_1)$

↓

Определение вектора поправки BC на основании максимального коэффициента в матрице корреляций

↓

Определение вектора полного перемещения $AC=AB+BC$

↓

Расчет вектора прогноза $CD=AC\,\dfrac{t_3-t_2}{t_2-t_1}$ на время t_3

↓

Проверка прогноза

↓

Перенос поля $F(t_2)$ на вектор прогноза CD

↓

Расчет вектора ошибки прогноза DE методом взаимных корреляций $F(t_3)$ и смещенного $F(t_2)$

↓

Определение вектора фактического перемещения за (t_3-t_2) $CE=CD+DE$

↓

Расчет отклонения по направлению d между прогнозируемым и фактическим перемещением

↓

Расчет ошибки по расстоянию $\|CD\|-\|CE\|$

↓

Расчет суммарной ошибки в процентах

$$\left\|\frac{DE}{CE}\right\|\cdot 100\ \%$$

[1, 2] о связи **V** с потоками на стандартных барических поверхностях (850, 700 и 500 мбар).

Для обработки и расчетов были выбраны 16 траекторий движения шестнадцати независимых друг от друга ячеек и малых площадей радиоэха ($S < 100 \div 500$ км^2) осадков. Первичный материал был получен при наблюдении на МРЛ в пос. Воейково летом 1976 г. Фоторегистрация экрана ИКО с частотой 15—30 мин ($\varepsilon = 0{,}5 \div 1°$) позволяла весьма точно определять местоположение РКО на площади обзора, а также с высотой вероятностью получать при последующей обработке фотограмм фактические траектории их движения над земной поверхностью.

Сведения о параметрах движения V и d ячеек и ММП были получены двумя способами. В первом случае для определения $V_{р.э}$ и d использовался корреляционный метод и первичные данные на ЭВМ в соответствии с алгоритмами табл. 1. Во втором

случае скорость и направление движения РКО определялись с использованием правил и рекомендаций, изложенных в [1, 2]. Для расчета по корреляционному методу все зоны РКО разбивались на квадраты 5×5 км и после этого рассчитывались корреляционные матрицы и скорости $V_{п.к}$.

Направление d было определено по изменению положения центра тяжести ячейки и ММП с точностью до 5°, а скорость была

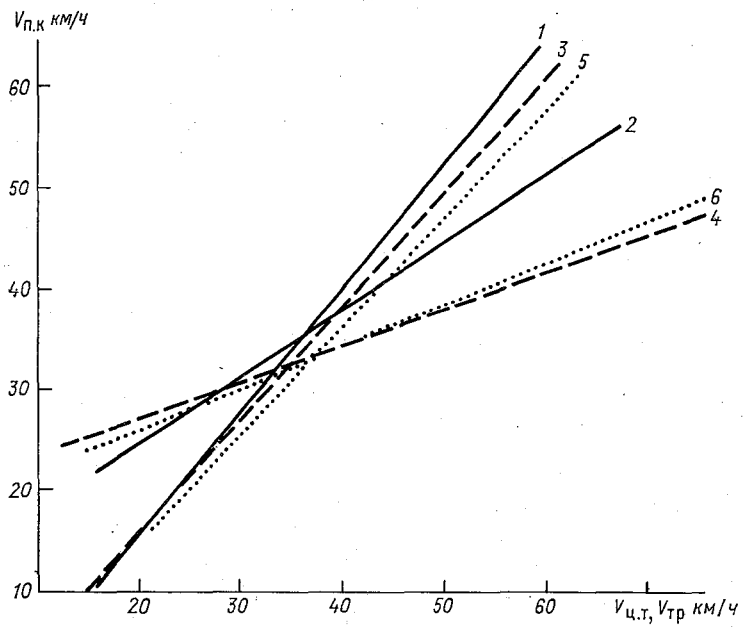


Рис. 2. Уравнения прямой и обратной регрессии для скоростей, определенных разными методами.

1) $V_{п.к}=f(V_{ц.т})$, 2) $V_{ц.т}=f(V_{п.к})$, 3) $V_{п.к}=f(V_{тр.})$, 4) $V_{тр.}=f(_{п.к})$, 5) $V_{ц.т}=f(V_{тр.})$, 6) $V_{тр.}=f(V_{ц.т})$.

получена с точностью не менее 5 км/ч по формуле $V=60\frac{l}{\Delta t}$, где l — путь, проходимый центром тяжести РКО за время Δt.

Любая из траекторий движения РКО была определена по трем и более точкам, поэтому общее число случаев для сравнения d и $V_{р.э}$, полученных по упомянутым выше двум способам, достигает 69.

Результаты сопоставления экспериментальных данных представлены на рис. 2 и в табл. 2. Можно отметить, что статистическая связь между скоростями, определенными разными способами (перекрестной корреляции $V_{п.к}$, с помощью центра тяжести

$V_{ц.т}$ и методом накопленной средней по всей траектории движения радиоэха $V_{тр}$), довольно тесная и устойчивая.

Уравнения регрессии (прямой и обратной) близки друг к другу а коэффициенты корреляции между $V_{п.к}$ и $V_{ц.т}$ равны 0,75 Ухудшение степени статистической зависимости между $V_{п.к}$, $V_{ц.т}$ и $V_{тр}$ объясняется, по-видимому, большой неравномерностью дви-

Характеристики скоростей радиоэха ММП и

Величина	Среднее, км/ч	Коэффициенты корреляции		
		$V_{п.к}$	$V_{ц.т}$	$\overline{V}_{тр}$
$V_{п.к}$	35,7	1	0,75	0,55
$V_{ц.т}$	35,9	0,75	1	0,63
$\overline{V}_{тр}$	33,6	0,55	0,63	1

жения зон радиоэха. Анализ погрешностей измерения V показывает следующее.

1. Отклонения угла $\Delta\alpha = d_{ц.т} - d_{п.к}$ в пределах $\pm 10°$ имеет максимальную повторяемость 58 %, отклонения 10—30° — 25 %, отклонения $\geqslant -(10 \div 30)°$ — 16 % и отклонения $\pm(>30°)$ — только 1 %.

2. Отмечается систематическое отклонение ячеек и ММП РКО влево от направления потока на $АТ_{700}$. Оно объясняется правым вращением ветра с высотой в слое 1,5—3 км в дни наблюдений. Поскольку большинство зон РКО имело высоты не больше 4 км, влияние потока нижнего уровня на $АТ_{850}$ на характеристики движения вполне очевидны [1, 2].

3. Чем меньше время наблюдения радиоэха $(t_2 - t_1)$ до момента определения $V_{п.к}$, тем больше вероятность возникновения ошибки

$$P = \frac{V_{п.к} - V_{ц.т}}{V_{ц.т}}.$$

Это положение иллюстрируется табл. 3.

Полученные данные указывают на перспективность и практическую пригодность метода корреляционного анализа для определения и прогнозирования скорости и направления перемещения зон радиоэха.

Из анализа данных следует, что ячейка 5×5 км дают достаточно подробное описание структуры радиоэха и позволяют получать результаты с требуемой точностью. Однако необходима разработка и проверка рекомендаций, учитывающих тенденцию развития ливневых очагов. Поэтому при составлении окончательных алгоритмов следует проверить несколько предложений:

1) учесть тенденцию развития поля и не составлять прогноз, если площадь радиоэха между двумя реализациями изменилась более чем на 25 %;

2) включить тенденцию в алгоритм прогноза и предсказывать не только перемещения отдельной ячейки или поля радиоэха, но и изменение его размеров;

Таблица 2

ячеек, измеренных разными способами (число измерений $N=69$)

Уравнение линейной регрессии (погрешность регрессии)		
$\overline{V}_{п.\,к}$	$\overline{V}_{ц.\,т}$	$\overline{V}_{тр}$
1	$6{,}6+0{,}8V_{ц.\,т}$ ($\pm 7{,}1$)	$5{,}1+0{,}9V_{тр}$ ($\pm 9{,}7$)
$10{,}7+0{,}7V_{п.\,к}$ ($\pm 6{,}9$)	1	$2{,}9+V_{тр}$ ($\pm 5{,}3$)
$21{,}8+0{,}3V_{п.\,к}$ ($\pm 5{,}7$)	$18{,}9+V_{ц.\,т}$ ($\pm 9{,}3$)	1

3) использовать для определения тенденции данные о высотах и отражаемостях;

4) учитывать данные о ветре на AT_{850} и AT_{700} для расчета корреляционной матрицы;

5) учитывать при расчете $V_{п.\,к}$ вид радиоэха и его конфигурацию для начала по самым грубым градациям.

Таблица 3

Повторяемость погрешности P (%) в зависимости от времени наблюдения радиоэха до расчета $V_{п.\,к}$

t_2-t_1 мин	P %						Σ
	10	20	30	40	50	> 50	
< 20	12	3	8	1	2	3	29
21—40	13	5	6	1		2	27
41—60	5	3				2	10
> 60	2	1					3
Σ	32	12	14	2	2	7	69

Можно не сомневаться, что экспериментальная проверка всех предложений позволит отобрать наиболее простой алгоритм для большинства погодных ситуаций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Брылев Г. Б., Низдойминога Г. Л. О связи скорости и направления перемещения зон радиоэха с воздушными потоками на стандартных барических уровнях.— Труды ГГО, 1975, вып. 328, с. 84—94.

2. Брылев Г. Б., Низдойминога Г. Л. О повышении заблаговременности прогноза перемещения небольших зон радиоэха с учетом данных аэрологического зондирования.— Труды ГГО, 1977, вып. 395, с. 92—94.

3. Briggs B. H. On the analysis of moving patterns in geophysics.— J. Atmosph. Terr. Phys., 1968, vol. 30, p. 1777—1788.

4. Baucher R. J. Radar precipitation. Echo motion and suggested prediction techniques.— In: Proc. 10th Wea. Radar Conf. Am. Met. Soc., Boston, 1963, p. 1—7.

5. Kessler E., Russo J. A., Jr. Statistical properties of weather radar echoes.— In: Proc. 10th Wea. Radar Conf. Am. Met. Soc., Boston, 1963, p. 25—33.

6. Zawadzki I. I. Statistical properties of precipitation patterns.— J. Appl. Met., vol. 12, 1973, p. 459—472.

7. Austin G. L., Bellon A. The use of digital weather radar records for short-term precipitation forecasting.— Quart. J. Roy. Met. Soc., 1974, vol. 100, p. 658—664.

О. Н. Руссис, В. Д. Степаненко

НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ РАДИОЛОКАЦИОННОГО ОБНАРУЖЕНИЯ ДОЖДЕЙ В РАЙОНЕ КУБЫ

В настоящее время на Кубе имеется небольшая сеть радиолокационного штормового оповещения, оснащенная несколькими иностранными радиолокаторами метеорологического назначения. В связи с особенностями географического положения Кубы получаемая с этой сети информация является весьма важной, особенно при прохождении тропических циклонов в этом районе.

Известно, что один из критериев эффективности радиолокационного обнаружения дождей $W_р$ (радиоклиматическая вероятность обнаружения) зависит от вероятности выпадения дождей различной интенсивности. Для районов Кубы эта характеристика [1] заметно отличается от тех, которые присущи районам умеренных и высоких широт, в частности СССР (рис. 1) [1, 2]. На рис. 1 представлены кривые относительного распределения дождей различной интенсивности для о. Пинос (ст. Ла-Мельвис) и для Ленинграда.

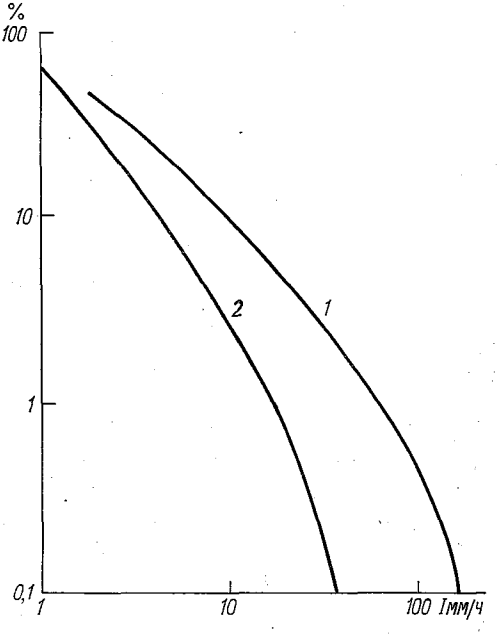


Рис. 1. Относительная вероятность выпадения дождей для Кубы (*1*) и Ленинграда (*2*).

Для Кубы характерны большие значения интенсивности дождей по сравнению с Ленинградом. В связи с этим вероятность выпадения очень сильных дождей на Кубе ($I>30$ мм/ч), равная

примерно 10 %, почти в 20 раз больше, чем в Ленинграде, где она составляет примерно 0,42 %. Кроме того, на Кубе, в отличие от Ленинграда, весьма слабые ($I < 1$ мм/ч) и моросящие дожди, как правило, не наблюдаются. Минимальные интенсивности дождей находятся в пределах 0,6—3,0 мм/ч с наибольшей вероятностью выпадения 47 %.

На основании разработанной ранее методики расчета $W_р$ [1] сначала были определены максимальные дальности радиолокационного обнаружения дождей различной интенсивности $R_{макс}$ для трех метеорологических радиолокаторов. В качестве исходного уравнения использовалась следующая формула:

$$R^2_{макс} = C \frac{7 \cdot 10^{-18} \mu P_t h Z}{P_{мин} \lambda^2 \theta_1 \theta_2} \left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right|^2 K K_3, \qquad (1)$$

где P_t — излучаемая мощность в импульсе (Вт), $P_{мин}$ — чувствительность приемника (Вт), h — длительность зондирующего импульса (м), θ_1 и θ_2 — ширина диаграмм направленности (рад), λ — длина волны (м), Z — отражаемость осадков (мм^6/м^3), m — комплексный показатель преломления воды, K — коэффициент ослабления, учитывающий потери за счет ослабления в волноводе МРЛ, в газах атмосферы, облаках и осадках на трассе. Численные значения коэффициента C, учитывающего флуктуационные потери при вероятности обнаружения 0,95, близки к $4 \cdot 10^{-2}$ [1].

При расчетах $R_{макс}(I)$ использовалось также известное соотношение

$$Z = 200 I^{1,60}, \qquad (2)$$

где Z в мм^6/м^3, а I — интенсивность дождей в мм/ч.

При определении K_3 вертикальная протяженность отражающей части дождевых облаков принималась равной 8 км.

Расчет коэффициента ослабления K производился при следующих упрощающих предположениях. Трасса между МРЛ и метеоцелью покрыта на $^1/_3$ максимальной дальности облаками со средней водностью $\overline{W} = 2$ г/м^3. Ширина зоны дождей на трассе полагалась равной 10 км, а их интенсивность равнялась интенсивности обнаруживаемых дождей. Для простоты интенсивность данного дождя полагалась постоянной, а обнаружение достаточным для его ближайшей к МРЛ периферии.

Для расчета $R_{макс}$ использовались радиолокаторы: отечественный МРЛ-5, работающий в двух диапазонах волн ($\lambda_1 = 3$ см и $\lambda_2 = 10$ см); японский RC-32B с $\lambda = 10$ см и английский «Десса-42» с $\lambda = 3$ см.

Для МРЛ-5 при работе на $\lambda_1 = 3$ см расчеты производились при двух диаграммах направленности $\theta_1 = 1{,}5°$ и $\theta_2 = 0{,}5°$. Для всех МРЛ учитывались две длительности зондирующих импульсов, на которых они работают. В качестве иллюстрации часть результатов расчета показана на рис. 2. Из этого рисунка видно, что наибольшими значениями $R_{макс}(I)$ обладают МРЛ-5 и RC-32B, а наименьшими — «Десса-42».

С помощью полученных значений $R_{макс}(I)$ и вероятностей выпадения дождей различной интенсивности, представленных на рис. 1, легко определить важную характеристику, какой является радиоклиматическая вероятность обнаружения дождей $W_р$. При этом будем следовать известной методике [1].

При расчетах $W_р$ используется следующая формула:

$$W_р(R) = \int_{I_{мин}}^{I_{макс}} P(I)\,dI - \int_{I_{мин}}^{I_{мин}(R)} P(I)\,dI, \qquad (3)$$

где $I_{макс}$ и $I_{мин}$ — соответственно максимальное и минимальное значение интенсивности дождя, наблюдаемое в действительности; $I_{мин}(R)$ — минимальное значение интенсивности дождя, обнаруживаемое МРЛ на расстоянии $R_{макс}$. Если положить первый интеграл равным единице, то второй интеграл характеризует вероятность необнаруженных метеоцелей на расстоянии $R \geqslant R_{макс}$. Величину $I_{мин}(R)$ определяем для каждой МРЛ с помощью кривых, представленных на рис. 2. Полученные результаты представлены в табл. 1.

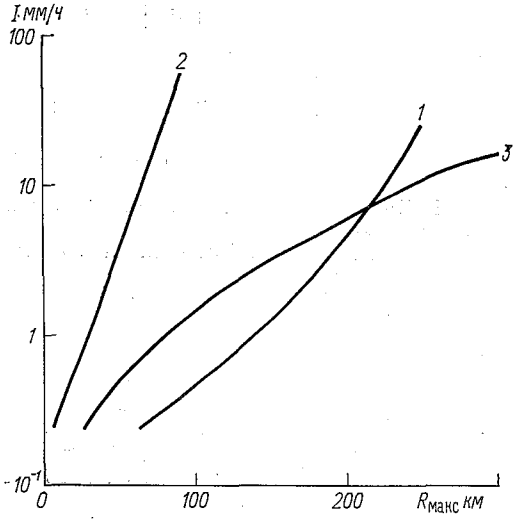


Рис. 2. Максимальные дальности обнаружения дождей для различных МРЛ.

1) МРЛ-5, λ=3 см; 2) «Десса»-42, λ=3 см; 3) МРЛ-5 и RC-32B, λ=10 см.

Из анализа данных табл. 1 хорошо видна степень уменьшения вероятности обнаружения $W_р(R)$ дождей с увеличением расстояния для рассматриваемых МРЛ. Кроме того характерным является влияние климатических характеристик дождей на величину $W_р(R)$. Для районов Кубы на расстояниях $R > 50 \div 100$ км величины $W_р(R)$ существенно больше, чем для Ленинграда. При организации сети МРЛ на Кубе это важное обстоятельство целесообразно использовать, так как оно обеспечивает больший эффективный радиус обнаружения опасных явлений $R_э$, связанных с кучево-дождевыми облаками, по сравнению с $R_э$ для районов умеренных широт СССР.

Авторы выражают благодарность Ф. Арналдо Альфансо, Ж. Ж. Енрико и П. С. Рамону за ценную информацию о повторяемости дождей на о. Пинис, позволяющую определить особенности радиоклиматической вероятности обнаружения дождей в районе Кубы с помощью МРЛ.

Таблица

Вероятность радиолокационного обнаружения дождей в зависимости от расстояния для Кубы (числитель) и Ленинграда (знаменатель)

МРЛ	λ см	*R* мм						
		10	30	50	100	150	200	250
МРЛ-5	3	100/100	100/100	100/100	100/76	50/30	40/12	—
МРЛ-5 и РС-32В	10	100/100	100/100	100/67	70/17	60/3	47	32
«Десса-42»	3	100	90	3	—	—	—	—

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Степаненко В. Д. Радиолокация в метеорологии.— Гидрометеоизда 1973, с. 123—128.
2. Carlos J. La lluvia en La Habana.— Marina de Guerra de Cuba, 194

К. С. Жупахин, Т. В. Иванова, Н. Ф. Котов

НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ СТРУКТУРЫ ОЧАГОВ РАДИОЭХА ОТ КУЧЕВО-ДОЖДЕВЫХ ОБЛАКОВ И ДИНАМИКИ ИХ РАЗВИТИЯ

С целью решения задачи радиолокационного исследования внутренней структуры и динамики развития Cb разрабатывался и испытывался ряд устройств. Наиболее быстродействующее среди них — устройство электронной аналоговой записи линейных профилей отражаемости — позволяет получить весьма детальную информацию о внутренней структуре облаков (об особенностях распределения в них отражаемости) лишь вдоль некоторой линии. И хотя процесс получения информации со всей исследуемой территории может быть автоматизирован, время анализа при этом получается значительным и составляет несколько минут [1, 2]. Такое время анализа может оказаться недопустимо большим при решении задачи исследования внутренней структуры Cb и динамики их развития. Для решения этой задачи К. С. Жупахин и В. С. Жупахин в 1970 г. разработали устройство обработки многоконтурного изоэха с электронным способом записи внутренней структуры Cb в плоскости радиолокационного разреза с отображением информации непосредственно на экранах ЭЛТ ИКО и ИДВ в реальном масштабе времени, т. е. за время самого радиолокационного разреза (несколько секунд) [3].

Упрощенная функциональная схема этого устройства состоит из трех основных и последовательно соединенных блоков: блока осреднения пространственно-временных реализаций эхо-сигналов, блока квантования и блока формирования узких маркерных импульсов записи контуров изоэха (отражаемости). При этом на экранах ИКО и ИДВ неоднородности радиолокационной отражаемости (Z) облаков и осадков отображаются в виде контурных карт (аналогично топографическим диаграммам), дающих наглядную картину внутренней структуры этих метеорологических образований и позволяющих определять численные значения Z в любой точке плоскости радиолокационного разреза, а также величины ее градиентов.

Наблюдения за локальными кучево-дождевыми облаками и за полями облаков и осадков проводились летом (июнь—август) 1971 г. на НЭБ ГГО в пос. Воейково в радиусе 50—100 км с помощью метеорологического радиолокатора с устройством обработки многоконтурного изоэха.

Радиолокационные наблюдения проводились в дни, когда регистрировались атмосферики прибором ПРГ = 100 или прогнозировались грозы путем:

1) выполнения серий снимков наклонных разрезов под разными углами места методом кругового обзора, начиная с $\varepsilon = 0$ до полного исчезновения эхо-сигналов. Серии наклонных разрезов осуществлялись при масштабе 100 или 50 км и нулевом затухании аттенюатора, через каждые 10—15 мин. Проведение одной серии наклонных разрезов занимало 4—5 мин;

2) выполнения непрерывной съемки очагов радиоэха с экрана ИКО под оптимальным углом возвышения антенны при нулевом затухании аттенюатора в режиме кругового обзора. Эта съемка осуществлялась в перерывах между сериями наклонных разрезов, за 1 мин получали четыре снимка.

Проведение непрерывных радиолокационных наблюдений позволяло проследить за самыми кратковременными изменениями радиолокационных характеристик очагов радиоэха от Cb в течение всего периода их существования.

Регистрация в виде контурных карт изоэха давала возможность за малые промежутки времени получить полный объем самой детальной радиолокационной информации. Так, по контурным картам изоэха рассчитывались детальные (с разрешением 1—2 км) цифровые карты радиолокационной отражаемости на различных высотах и цифровые карты верхней и нижней границ очагов радиоэха [4]. Контурные карты очагов радиоэха позволяли получать такие основные радиолокационные характеристики, как верхнюю и нижнюю границы радиоэха $H_{вг}$ и $H_{нг}$ площади радиоэха различной интенсивности, объемные характеристики радиоэха, особенности пространственного распределения радиолокационной отражаемости, а также их изменения во времени (рис. 1). Это позволяло производить анализ структуры очагов радиоэха и динамики их развития.

Анализ основывался на совместном использовании радиолокационной и метеорологической информации и данных грозорегистратора ПРГ-100. При этом получали сведения о геометрических размерах и внутренней структуре очагов радиоэха и характере явлений, связанных с ними, о динамике развития полей и локальных очагов радиоэха.

Для анализа изменений пространственно-временной структуры поля использовался графический метод обработки. Графики строили по суммарным значениям площади и отражаемости, они дают наглядное представление о площадных характеристиках зон равных значений отражаемости, о вертикальном и горизонтальном распределениях зоны с максимальными значениями отражаемости,

об уровне верхней границы очагов радиоэха. Анализируя графики, мы можем проследить эволюцию облачной системы и локальных очагов радиоэха.

Временнóй рост значений высоты верхней границы очагов радиоэха, радиолокационной отражаемости, вертикальных и горизонтальных размеров зоны максимальной отражаемости, площади и объема позволяет судить не только об усилении явления, но и о переходе от одного явления к другому. При наличии ливней ра-

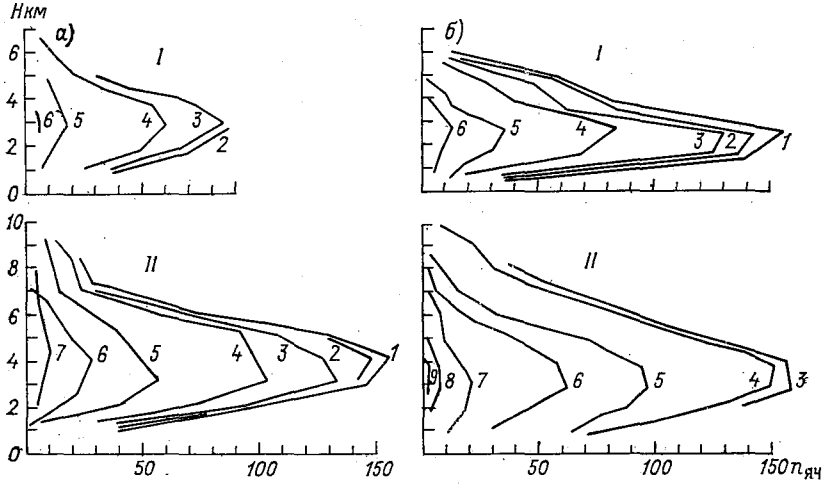


Рис. 1. Изменение пространственной структуры очагов радиоэха при прохождении фронта окклюзии, сопровождавшегося ливнями *I* и грозами *II*. 3 августа 1971 г.

1) $Z=-1{,}0$, *2*) $Z=-0{,}5$, *3*) $Z=0{,}0$, *4*) $Z=0{,}5$, *5*) $Z=1{,}0$, *6*) $Z=1{,}5$, *7*) $Z=2{,}0$, *8*) $Z=2{,}5$, *9*) $Z=3{,}0$.

диолокационные характеристики меняются во времени меньше, чем при грозах. Во время грозы быстро растут значения площади и объема радиоэха, увеличиваются размеры по вертикали и горизонтали зон максимальных значений отражаемости, которые характеризуют крупнокапельную часть очагов радиоэха. В грозовых очагах эта зона распространяется несколько выше, чем в ливневых. В зависимости от стадии жизни очага радиоэха меняется высота этой области (см. рис. 1).

Применение схемы многоконтурного изоэха позволяет проводить наблюдения за изменением пространственной структуры локальных очагов радиоэха во времени и за процессами их взаимодействия (слиянием и разделением). Как показали наши исследования, в процессе жизни поля облачности происходит непрерывное взаимодействие соседних очагов радиоэха.

Слияние и разделение очагов радиоэха можно наблюдать при любой синоптической обстановке. Процессы слияния и разделения очагов радиоэха могут идти параллельно. После слияния от

нового очага радиоэха могут отделиться ядра или новый очаг может снова делиться. В процессе слияния и разделения очагов радиоэха происходит изменение их конфигурации, площадных характеристик и внутренней структуры.

На рис. 2 изображен процесс изменения внутренней структуры локальных очагов радиоэха, а также слияния и разделения этих очагов, представленных в виде контурных карт изоэха, полученных 8 VII 1971 г. Синоптическая обстановка в этот день характеризовалась внутримассовым положением. Очаги радиоэха располагались хаотически по всему полю наблюдений. Были выбраны два очага радиоэха (*I* и *II*), которые в начале наблюдений нахо-

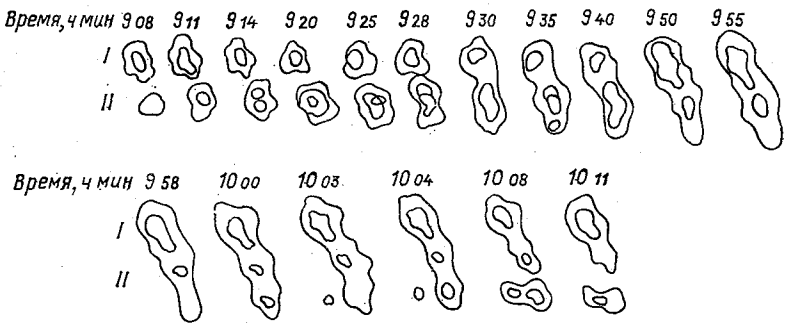


Рис. 2. Изменение внутренней структуры локальных очагов во времени.

дились на расстоянии 3 км друг от друга (расстояние между краями). На кадре перед моментом слияния расстояние между краями было 0,8 км.

Площадь и отражаемость очага радиоэха *I* изменялись незначительно, в то время как площадь очага радиоэха *II* непрерывно росла. Поэтому слияние произошло в основном из-за распространения очага радиоэха *II*. Скорость увеличения площади очага радиоэха *II* с 9 ч 08 мин до 9 ч 27 мин составляла примерно 4 км²/мин. На 3-й минуте после начала наблюдений в очаге радиоэха *II* появился второй контур, на 7-й минуте — третий контур. Рост площадей зон разной интенсивности происходил параллельно. Взаимодействие очагов радиоэха *I* и *II* произошло на 20-й минуте после начала наблюдений. В течение последующих 10 мин происходило медленное увеличение площади и постепенное уменьшение отражаемости. Затем очаг радиоэха стал увеличиваться в размерах и в 10 ч 08 мин произошло его разделение.

Таким образом, за 42 мин мы наблюдали слияние очагов радиоэха и разделение вновь образовавшегося очага. На примере наблюдений 8 VII 1971 г. мы убеждаемся, что процессы перестройки внутренней структуры очагов радиоэха идут весьма интенсивно, поэтому для изучения пространственно-временно́й изменчивости внутренней структуры очагов радиоэха недостаточно

одного-двух зондирований в час, необходимо производить непрерывные наблюдения с частотой не менее одного кадра за 1—2 мин. Непрерывная съемка очагов радиоэха позволяет произвести их «кинофильмирование», что даст возможность проследить на экране за динамикой развития и изменением внутренней структуры очагов радиоэха.

Нами не исследовались физические причины взаимодействия очагов внутренней структуры, однако можно предположить существование связи указанных выше изменений внутренней структуры радиоэха с физическими процессами, происходящими в облаках, в частности с развитием мощных вертикальных потоков внутри облаков, а также с образованием мощных вытекающих и втекающих движений воздушной среды вне облаков.

На основании изложенного можно сделать вывод о том, что разработанное устройство обработки многоконтурного изоэхо обеспечивает возможность оперативного выявления конвективных ячеек внутри кучево-дождевых и в том числе грозовых облаков. Этот вывод находит подтверждение и в [4], где была выявлена связь обнаруживаемого числа ячеек внутри грозовых облаков с интенсивностью грозовой деятельности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жупахин К. С. Устройство электронной аналоговой записи на экранах индикаторов метеорологического радиолокатора.— Труды ГГО, 1970, вып. 262.

2. Жупахин К. С., Котов Н. Ф., Коптяев Г. А. Радиолокационный метод обзора постоянной высоты.— Труды ГГО, 1968, вып. 224.

3. Жупахин К. С. Изобретательская деятельность ГГО.— В кн.: Современные фундаментальные исследования Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова. Л.: Гидрометеоиздат, 1977, с. 182—193.

4. Жупахин К. С., Иванова Т. В., Созин В. И. Результаты предварительного сравнения пеленгационных и радиолокационных наблюдений за грозовыми очагами.— Труды ГГО, 1973, вып. 282.

5. Котов Н. Ф., Морозова Т. И. Метод составления цифровых карт радиолокационной информации.— Труды ГГО, 1968, вып. 224.

Г. Б. Брылев, Е. П. Сергиенко, В. И. Ширяева

РАДИОЛОКАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГРОЗ В РАЙОНЕ КИЕВА

По данным МРЛ проведено исследование радиолокационных характеристик гроз в радиусе около 100 км вокруг центрального аэропорта Киева. Для этой цели были рассмотрены особенности радиоэха кучево-дождевых облаков с грозами, отмеченными 12 метеостанциями штормового кольца, а также метеонаблюдателями АМСГ Киев и УАМЦ за пятилетний период (1971—1975 гг.). Радиолокационные характеристики гроз определялись, когда станция МРЛ работала ежечасно. Всего было рассмотрено 1785 гроз. Отдельной считалась гроза, когда интервал времени между окончанием предыдущей грозы и фиксированием новой грозы был 30 мин и более.

Изучение характеристик производилось как в целом для всех гроз, так и в зависимости от синоптической обстановки, которая была представлена семью основными типами процессов:

1) холодные фронты (включая холодные фронты с волнами при скорости их движения $\geqslant$15 км/ч);
2) вторичные холодные фронты;
3) фронты окклюзии;
4) теплые фронты;
5) стационарные фронты (включая все медленно движущиеся фронты при скорости их смещения $<$15 км/ч);
6) внутримассовое развитие гроз при циклонической кривизне изобар у земли;
7) внутримассовое развитие гроз при антициклонической кривизне изобар у земли.

Эффективность информации МРЛ о грозах. Метеорологические радиолокаторы с высокой степенью достоверности (в среднем 93,3 %) позволяют обнаруживать грозы в радиусе 100 км при их правильной интерпретации. Отсутствие на экранах МРЛ радиоэха при фактических грозах (0,8 %), как правило, связано с сильным ослаблением радиоволн в осадках по пути распространения радиоволн. Наибольший процент совпадения радиолокационной и визуальной информации о грозах отмечен при прохождении вто-

ричных холодных фронтов (97,2 %) и при внутримассовом развитии кучево-дождевых облаков в циклоническом поле (95,9 %). Самый низкий процент совпадения двух видов информации о грозах (90,0 %) наблюдался при прохождении теплых фронтов через зону обзора.

В течение грозового сезона, который над центральными районами Украины длится с апреля по октябрь, грозы обнаруживаются МРЛ неодинаково. Выше 90 % совпадения гроз наблюдалось только с мая по август. В апреле 21,7 % гроз были интерпретированы как радиолокационные ливни и кучево-дождевые облака без явлений, а правильно интерпретированы 69,6 % случаев гроз. Аналогично выглядят и результаты сопоставления визуальной и радиолокационной информации о грозах в осенние месяцы (сентябрь и октябрь). При этом следует отметить, что в сентябре, когда анализ данных МРЛ проводится еще по летним критериям, результаты сопоставлений несколько хуже, чем в октябре, когда анализ обычно проводится по критериям переходного периода [5]. Так, в сентябре было неправильно интерпретировано 23,3 % из 99 случаев отмеченных гроз, а в октябре — 10 % из 50 случаев отмеченных гроз.

Приведенные результаты сопоставлений указывают на некоторое несовершенство радиолокационных критериев распознавания гроз ранней весной и осенью и на необходимость корректировки их по фактическим данным МРЛ.

Основные радиолокационные характеристики гроз. Активизация грозовой деятельности тесно связана с развитием мощной кучево-дождевой облачности. Об этом свидетельствует большая горизонтальная и вертикальная протяженность конвективных облаков при значительном влагосодержании воздуха в нижней и средней тропосфере и больших скоростях восходящих потоков. Косвенно об активизации конвективных процессов, а значит и об активизации гроз можно судить по верхним границам радиоэха конвективной облачности $H_{макс}$, о площади распространения радиоэха грозоопасных ячеек и о величине отражаемости на верхнем ($H_3 \approx H_{t_{-22}}$) и на среднем ($H_2 \approx H_{t_0}$) уровнях [2, 3].

Поэтому при исследовании грозовой деятельности важно знать радиолокационные характеристики кучево-дождевых облаков с грозами, основными из которых являются:

— верхняя граница радиоэха ($H_{макс}$), сопоставление ее с $H_{t_{-22}}$, с уровнем конвекции $H_{конв}$, высотой тропопаузы $H_{тр}$;

— радиолокационная отражаемость ($\lg Z$) на верхнем $\lg Z_3(H_3)$ и среднем $\lg Z_2(H_2)$ уровнях;

— комплексный критерий опасности кучево-дождевых облаков ($Y = H_{макс} \lg Z_3$);

— площадь распространения радиоэха с грозоопасными ячейками.

Среднегодовые значения основных радиолокационных характеристик гроз в зоне обзора за 1971—1975 гг. представлены

в табл. 1. Анализ табл. 1 позволяет сделать следующие выводы.

Таблица 1

Радиолокационные характеристики гроз в районе Киева

Характеристика	Величина	Синоптическая ситуация							
		холодный фронт с волнами	вторичный холодный фронт	фронт окклюзии	теплый фронт	стационарный фронт	циклоническое поле	антициклоническое поле	все ситуации
$H_{макс}$ км	мин.	4	4	5	4	3	2	6	2
	ср.	9,1	8,5	9,3	9,1	9,4	8,6	8,5	9,0
	макс.	15	13	18	14	15	15	13	18
ΔH км	мин.	—2,0	—2,0	—1,5	—2,0	—2,0	—2,0	—1,5	—2,0
	ср.	2,9	2,7	3,2	2,9	3,0	2,5	2,5	2,9
	макс.	9	7	10	7	9	9	7	10
$\Delta H_{конв}$ км	мин.	6,2	5,7	6,2	6,2	7,2	6,2	5,8	7,2
	ср.	0,0	—0,5	—1,0	—0,4	—0,9	—1,0	—1,9	—0,6
	макс.	6,8	6,8	6,3	5,8	7,8	5,3	1,3	7,8
$\Delta H_{тр}$ км	% превышений 1 км	7,7	4,1	11,2	8,7	7,7	5,9	2,0	7,4
	ср.	1,1	0,7	1,2	0,9	0,9	1,0	0,7	0,9
	макс.	5,0	2,0	6,3	4,0	3,4	4,0	1,6	6,3
$\lg Z_3$	мин.	0,2	0,8	0,2	0,2	0,2	0,8	1,2	0,2
	ср.	2,4	2,4	2,2	2,6	2,4	2,4	2,3	2,4
	макс.	4,8	0,8	4,4	4,8	5,4	4,4	4,4	5,4
$\lg Z_2$	мин.	0,2	0,8	0,8	0,2	0,8	0,8	0,2	0,2
	ср.	3,0	3,0	2,6	3,0	2,9	3,0	2,9	2,9
	макс.	4,8	4,8	4,4	4,8	5,4	4,8	4,4	5,4
Y	мин.	5	7	5	5	5	5	5	5
	ср.	22,8	20,8	20,4	24,7	23,6	22,3	20,6	22,7
	макс.	50	49	50	50	50	50	45	50

По данным наблюдений за рассматриваемый пятилетний период, верхняя граница радиоэха грозовых облаков изменялась в широком диапазоне (от 2 до 18 км). Наиболее часто повторяются $H_{макс}$, равные 7—12 км. Грозы с $H_{макс} < 7$ км составляют 10 % случаев, а с $H_{макс} > 12$ км — 4 % случаев. Наибольшие значения $H_{макс}$ (17—18 км) отмечаются в зоне фронта окклюзии (2 случая). Средняя высота $H_{макс} = 9{,}0$ км. Значение $H_{макс}$ грозовых облаков при внутримассовом развитии Cb примерно на 0,5 км ниже, чем при прохождении фронтальных разделов. Исключение составляют вторичные холодные фронты, при которых $H_{макс}$ примерно равно $H_{макс}$ при внутримассовых процессах.

На рис. 1 представлен годовой ход $\overline{H}_{макс}$ грозовых облаков. Как видно из графика, весной и осенью $H_{макс}$ значительно ниже (на 1,5—2 км), чем летом. Наибольшие значения $H_{макс}$ (9,6 км) отмечены в июле, когда по климатическим данным отмечается наиболее активная грозовая деятельность.

Значения $H_{макс}$ гроз в основном значительно превышают (средний уровень массовой кристаллизации капель); $\Delta H = H_{макс} - H_{t_{-22}} = 2{,}9$ км. Только в 7,4 % случаев $H_{макс}$ не достигает высоты изотермы —22 °С. Максимальные значения $\overline{\Delta H}$ превышают 10 км.

Как видно из табл. 1, распределение ΔH в различных синоптических ситуациях аналогично распределению $H_{макс}$: максималь-

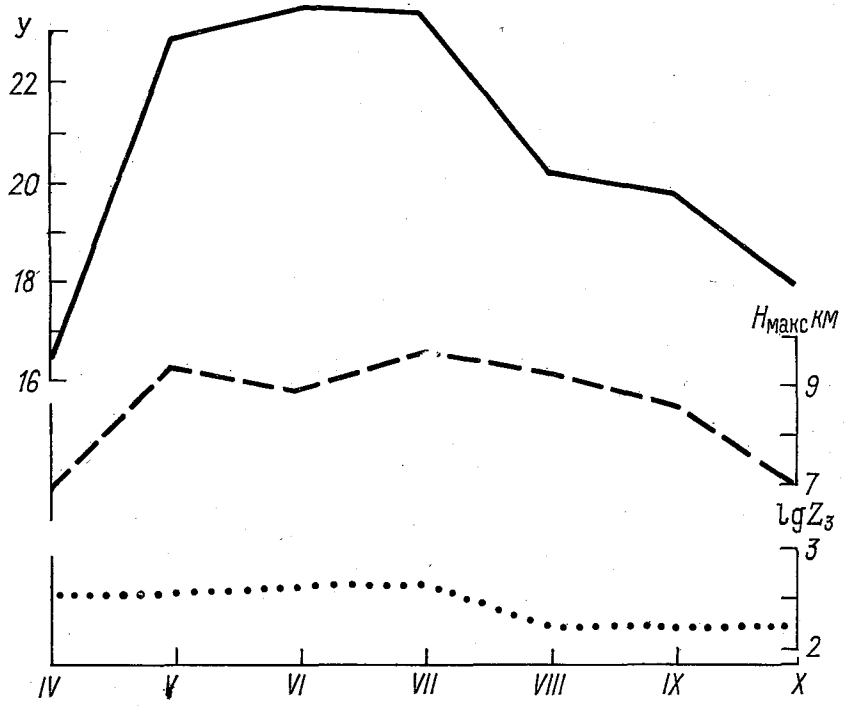


Рис. 1. Годовой ход средних значений радиолокационных характеристик грозовых кучево-дождевых облаков в районе Киева за апрель—октябрь 1971—1975 гг.

ные значения ΔH отмечались на фронтах окклюзии и стационарных фронтах, а при внутримассовых процессах и на вторичных холодных фронтах значения $\overline{\Delta H}_{макс}$ ниже средних.

Активизация конвективных процессов, как правило, связана с неустойчивой стратификацией атмосферы [4]. Однако по данным радиозондирования не всегда можно судить о возможности развития гроз. Так, сопоставление 1578 случаев фактических гроз в радиусе 100 км около ст. Борисполь с данными радиозондирования в Киеве (расстояние примерно 30 км) показало, что в 8,5 % случаев грозы наблюдались при устойчивой стратификации атмосферы (при этом учитывались лишь те случаи гроз, когда разница между временем фиксирования грозы и временем выпуска

радиозонда не превышала трех часов). Следует заметить, что при прохождении фронтов окклюзии и вторичных холодных фронтов устойчивая стратификация атмосферы не наблюдалась, а при прохождении теплых фронтов устойчивая стратификация отмечалась в 28,3 % случаев.

1. Сопоставление $H_{макс}$ гроз с уровнем конвекции ($\Delta H_{конв} = H_{макс} - H_{конв}$) показало, что в основном радиоэхо грозовых облаков достигает уровня конвекции ($\Delta H_{конв} = -0{,}6$), а в 36,6 % случаев превышает его. Как видно из табл. 1, наименьшие значения $\overline{\Delta H_{конв}}$ отмечались при внутримассовом развитии гроз в антициклоническом поле у земли.

При активном развитии грозовой деятельности мощные конвективные токи приводят к тому, что $H_{макс}$ нередко достигает уровня тропопаузы ($H_{тр}$), а иногда и превышает его. Так, из 1751 рассмотренного случая 7,4 % $H_{макс}$ грозовых Cb превысило $H_{тр}$. Максимальные значения $\Delta H_{тр} = (H_{тр} - H_{макс})$ по абсолютной величине и количеству случаев отмечались на фронтах окклюзии.

2. По сравнению со средними значениями $H_{макс}$ средние значения отражаемости ($\lg Z_2$ и $\lg Z_3$) изменяются сравнительно мало в различных синоптических условиях (см. табл. 1). Очень сглажен и годовой ход $\lg Z_3$ (см. рис. 1). Однако диапазон значений $\lg Z_2$ и $\lg Z_3$, отмеченных в грозовых Cb, очень широк: от нулевых значений до $\lg Z = 5{,}4$. В преобладающем большинстве случаев гроз значение $\lg Z_3$ изменялось от 1,1 до 3,0. При $\lg Z_3 \leqslant 1{,}0$ отмечено лишь 5,6 % фактических гроз, а при $\lg Z_3 > 3{,}0$ — 24,3 % случаев гроз. Как видно из табл. 1, средние значения $\lg Z_2$ примерно на одну ступень выше, чем $\lg Z_3$.

3. Комплексный радиолокационный критерий грозоопасности кучево-дождевых облаков (Y), рассчитанный для фактических гроз, изменялся в очень широком диапазоне: от 5 до 50 и более. В основном (83,8 %) грозы наблюдались при $Y = 11 \div 41$. Значения $Y > 41$ наблюдались у 5,5 % гроз. Почти всегда эти грозы сопровождались сильными ливнями с градом. Значения $Y < 7$ наблюдались в 2,3 % случаев. Все эти грозы были неправильно интерпретированы и представлены на радиолокационных картах как радиолокационные ливни или Cb без явлений. В 8,4 % случаев грозы наблюдались при значениях $Y = 7 \div 11$.

Среднее значение Y над центральными районами Украины за рассматриваемый период несколько выше Y для Союза [1] (22,7 по сравнению с 19,1). В годовом ходе значения Y для грозовых облаков имеют хорошо выраженный максимум в период с мая по июль. Наиболее низкие значения Y отмечены в апреле (16,2) и октябре (17,8).

4. Средняя площадь ($\overline{S}$) покрытия экрана ИКО МРЛ радиоэхом грозоопасных облаков в радиусе 110 км составила 18 % (из 44 радиолокационных ячеек 30×30 км, занимающих территорию района аэродрома, в среднем 8 ячеек были заняты грозоопасными очагами). Средние площади радиоэха гроз для фронтальных раз-

делов несколько больше, чем для внутримассовых. Максимальные случаи покрытия территории радиоэхом грозоопасных Cb отмечались при прохождении в районе аэродрома теплых фронтов (55,4 %), стационировании фронта с грозами над рассматриваемой территорией (66,9 %) и при внутримассовых процессах развития конвективной облачности в циклоническом поле (при циклонической кривизне изобар у земли) — 53,1 %.

В суточном ходе максимальные площади покрытия радиоэхом с грозоопасными Cb отмечались в период 15—21 ч, минимальные — в 06—09 ч.

Характеристика ширины радиоэха фронтальных разделов с грозами. Ширина радиоэха облачности, связанной с фронтальными разделами, на которых отмечались грозы, колебалась в широких пределах (от 50 до 500 км). Средняя ширина радиоэха d для всех грозовых фронтальных разделов 273,5 км. Максимальные значения d имеют фронты окклюзии, у которых 87,5 % имели $d = 300$ км.

В суточном ходе наиболее узкие полосы радиоэха обусловлены фронтами с грозами, проходящими район аэродрома в период 6—12 ч, а в период 15—18 ч примерно 39 % фронтов с грозами имели $d > 300$ км.

Соотношение ширины радиоэха перед линией фронта ($d_{\text{п. фр}}$) к ширине радиоэха за линией фронта ($d_{\text{з. фр}}$) при приближении фронта к станции и удалении его от нее различно. При приближении фронта к МРЛ коэффициент $K = \frac{d_{\text{п. фр}}}{d_{\text{з. фр}}} \geqslant 1{,}5$, для фронтов окклюзии $\overline{K} = 3{,}2$, а для теплых фронтов $\overline{K} = 2{,}9$.

При удалении фронта от МРЛ значение K приближается к единице, сохраняя соотношение больше единицы только на теплых фронтах ($K = 1{,}2$). Для вторичных фронтальных разделов это соотношение уменьшается до 0,8.

Полученные результаты могут быть использованы синоптиками для уточнения положения приземной линии грозового фронта при приближении его к пункту наблюдений и удалении от станции [1].

Перемещение радиоэха грозовых облаков. Сопоставление направления и скорости перемещения грозоопасных ячеек с направлением и скоростью ведущего потока (определяемого на AT_{700} и AT_{500}) позволило выявить некоторые закономерности, которые могут быть использованы синоптиками при прогнозе грозы над определенным районом.

Около 90 % грозоопасных ячеек отклоняются от направления ведущего потока на угол до 50°. Отмечены случаи очень резкого отклонения движения радиоэха грозовых Cb от направления ведущего потока ($d_{\text{в. п}}$) : 2,5 % грозоопасных очагов отклонялось от $d_{\text{в. п}}$ на угол свыше 90 %. Средние углы отклонения 26°.

Следует отметить, что 53,8 % грозоопасных ячеек отклоняется от ведущего потока вправо. Без учета углов отклонения $\alpha = \pm 25°$

вправо отклоняется почти $^2/_3$ грозоопасных очагов (65,6 % случаев). При этом средние углы отклонения вправо больше, чем средние углы отклонения влево. С увеличением скорости ведущего потока углы отклонения уменьшаются. Так, при слабых скоростях ведущего потока $v_{в.п} < 15$ км/ч средние углы отклонения равны влево 22,1°, вправо 39,8°, а при $v_{в.п} > 60$ км/ч средние углы отклонения соответственно составляют 19,8 и 24,6°.

Углы отклонения d радиоэха от $d_{в.п}$ уменьшаются с увеличением $H_{макс}$ грозовых Cb. При $H_{макс} < 6$ км средние углы отклонения влево составляют 27,7°, вправо — 32,7°, а при $H_{макс} > 10$ км соответственно составляют 21,7 и 25,4°. (При таких α отклонение следует считать минимальным, так как значения $\alpha \leqslant 25°$ находятся в пределах точности измерений направления перемещения и радиоэха, и ведущего потока.)

Сопоставление скорости перемещения радиоэха гроз $v_{рэ}$ со скоростью ведущего потока $v_{в.п}$ выявило, что при разных скоростях ведущего потока изменяется не только величина отклонения, но и его знак. Так, при $v_{в.п} \leqslant 15$ км/ч в 98 % случаев радиоэхо грозовых Cb движется быстрее, чем наблюдается скорость ведущего потока. Это можно объяснить тем, что в направлении ведущего потока осуществляется не только непосредственный перенос облачности, но и ее распространение за счет эволюции. При $v_{в.п}$, равном 20—35 км/ч, большинство (70,6 %) грозоопасных ячеек начинает двигаться медленнее, чем наблюдается скорость ведущего потока. Средняя величина «отставания» $v_{рэ}$ от $v_{в.п}$ составила 7 км/ч.

Интересно отметить, что при увеличении $v_{в.п}$ до 20—35 км/ч радиоэхо внутримассовых гроз движется медленнее $v_{в.п}$ в 90 % случаев, тогда как на теплых фронтах радиоэхо грозовых Cb двигалось быстрее, чем наблюдались скорости ведущего потока, а в зоне холодных фронтов с волнами «опережение» $v_{рэ}$ по отношению к $v_{в.п}$ наблюдалось в 58,3 % случаев.

При возрастании скорости ведущего потока до 60 км/ч и более все грозоопасные ячейки двигались медленнее, чем наблюдалась скорость ведущего потока. При этом среднее уменьшение $v_{рэ}$ составило 32,4 км/ч. Наибольшее «отставание» радиоэха грозоопасных Cb отмечено на фронтах окклюзии (42,5 км/ч) и на теплых фронтах (38,3 км/ч).

Сопоставление направления перемещения радиоэха грозоопасных очагов ($d_{рэ}$) с направлением движения фронта ($d_{фр}$) показало, что грозоопасные ячейки существенно отклоняются от направления движения фронта. Средние углы отклонения $d_{рэ}$ от $d_{фр}$ составляют около 50°. Из 121 рассмотренного случая 76 % ячеек отклонилось влево от направления движения фронта. Лучше всего эта закономерность прослеживалась в зоне холодных фронтов и вторичных холодных фронтов: соответственно 78,4 и 84,0 % отклонений $d_{рэ}$ от $d_{фр}$ влево. Меньше всего эта зависимость прослеживались в зоне теплых фронтов, где влево отклонилось 55,6 % грозоопасных ячеек.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Брылев Г. Б., Низдойминога Г. Л. Использование радиолокационных данных в синоптической практике/Методическое пособие.— Л.: Гидрометеоиздат, 1977.

2. Брылев Г. Б., Низдойминога Г. Л., Степаненко В. Д. Вопросы практического применения радиолокационной метеорологической информации. Сер. метеорология. Информационный центр, Обнинск, 1978.

3. Брылев Г. Б., Сергиенко Е. П. Особенности оперативных данных радиолокатора МРЛ-1 о грозах и ливнях.— Труды ГГО, 1975, вып. 328.

4. Минакова Н. Е. Результаты анализа радиолокационных данных по распознаванию ливней и гроз.— Труды Гидрометцентра СССР, 1974, вып. 136.

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

А. М. Гудыма, А. В. Завдовьев, А. Г. Линев

ПРИМЕНЕНИЕ ПРОМЫШЛЕННЫХ ЭВМ ДЛЯ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ В РЕАЛЬНОМ МАСШТАБЕ ВРЕМЕНИ ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧ ШТОРМОПОВЕЩЕНИЯ

Анализируя процесс наблюдений в режиме штормоповещения, можно выделить четыре основных этапа, отличающихся задачами, решаемыми на каждом этапе, средствами, использующимися для решения этих задач. Из них только два — этап первичной обработки сигнала и этап получения необходимого для интерпретации объема количественных характеристик — связаны с режимом работы МРЛ, поэтому только в этом случае автоматизирующий комплекс аппаратуры работает в «реальном» масштабе времени.

Использование промышленных ЭВМ для автоматизации радиолокационных метеорологических наблюдений обладает следующими преимуществами:

— возможностью изменения алгоритмов обработки;

— унификацией средств автоматизации при решении различных задач;

— уменьшением стоимости разработки и времени внедрения.

Однако при работе в реальном масштабе времени возникают существенные трудности в выборе типа ЭВМ, связанные с тем, что быстродействие промышленных ЭВМ, как правило, значительно меньше быстродействия специализированных вычислительных устройств, имеющих параллельную структуру (состоящих из ряда параллельно работающих узлов).

Выбор типа ЭВМ и варианта сопряжения ее с МРЛ определяется объемом решаемых задач, возможностями ЭВМ, требованиями к оперативности получения информации.

Существует несколько вариантов использования ЭВМ для обработки радиолокационной метеорологической информации, но, как правило, эти варианты предусматривают использование буферных накопительных устройств, куда заносятся результаты первичной обработки сигнала в реальном масштабе времени; обработка же, т. е. получение необходимого объема количественных характери-

стик для интерпретации, осуществляется после окончания наблюдений [1, 2].

Представляет интерес рассмотрение работы комплекса МРЛ — ЭВМ в реальном масштабе времени, когда первичная информация, поступающая от МРЛ через устройство первичной обработки, не накапливается, а обрабатывается во время между двумя приемами первичной информации. Такой вариант сопряжения требует наименьший объем ЗУ и обеспечивает наибольшую оперативность (наименьшее время обработки). Исследования проводились для конкретного типа ЭВМ (М-6000), сопряженной с устройством первичной обработки ААОМ.

Исходной информацией, поступающей с устройства первичной обработки, являются:

— 300 четырехразрядных двоичных слов, соответствующих средним значениям мощности отраженных сигналов в элементе осреднения 1 км$\times$1°;

— 4 десятиразрядных двоичных слова, соответствующих синусу и косинусу угла места и азимута.

В результате обработки формируется для каждой ячейки представления $\Delta X \times \Delta Y$ максимальный вертикальный профиль, представляемый пятью значениями отражаемости в слоях высотой $H = 2$ км (0—2, 2—4 км и т. д.) и максимальным значением высоты ($H_{\max}$).

Блок-схема алгоритмов обработки представлена на рис. 1.

Ввод данных с устройства первичной обработки осуществляется через сопряжение типа $2K$ канала прямого доступа в память с использованием дуплексного регистра.

После ввода данных в память ЭВМ производится подготовка рабочего массива, включающая формирование адресных констант, начального адреса массива обработанной информации, шага изменения адреса по координатам и т. д.

На следующем этапе вычислений производится расчет начальных значений контрольных (реперных) точек, в которых осуществляется изменение координат X, Y и высоты H, коррекция отраженного сигнала на квадрат расстояния, коррекция высоты на кривизну Земли. Расчет проводится по следующим формулам:

$$X_{\text{нач}} = \frac{\Delta X}{\cos \varepsilon \cdot \sin \varphi} + X_0,$$

$$Y_{\text{нач}} = \frac{\Delta Y}{\cos \varepsilon \cdot \cos \varphi} + Y_0,$$

$$H_{\text{нач}} = \frac{\Delta H}{\sin \varepsilon},$$

$$H_{\text{нач. кр}} = \frac{R_{\text{гор. нач}}}{\cos \varepsilon},$$

где ΔX и ΔY — размеры ячейки представления по координатам X и Y; ΔH — дискрета изменения высоты; X_0 и Y_0 — координаты

центра зоны обработки (если радиолокатор расположен в центре зоны обработки, то $X_0 = Y_0 = 0$); $R_{гор.\ нач}$ — горизонтальная дальность, соответствующая изменению высоты за счет кривизны Земли на одну дискрету высоты.

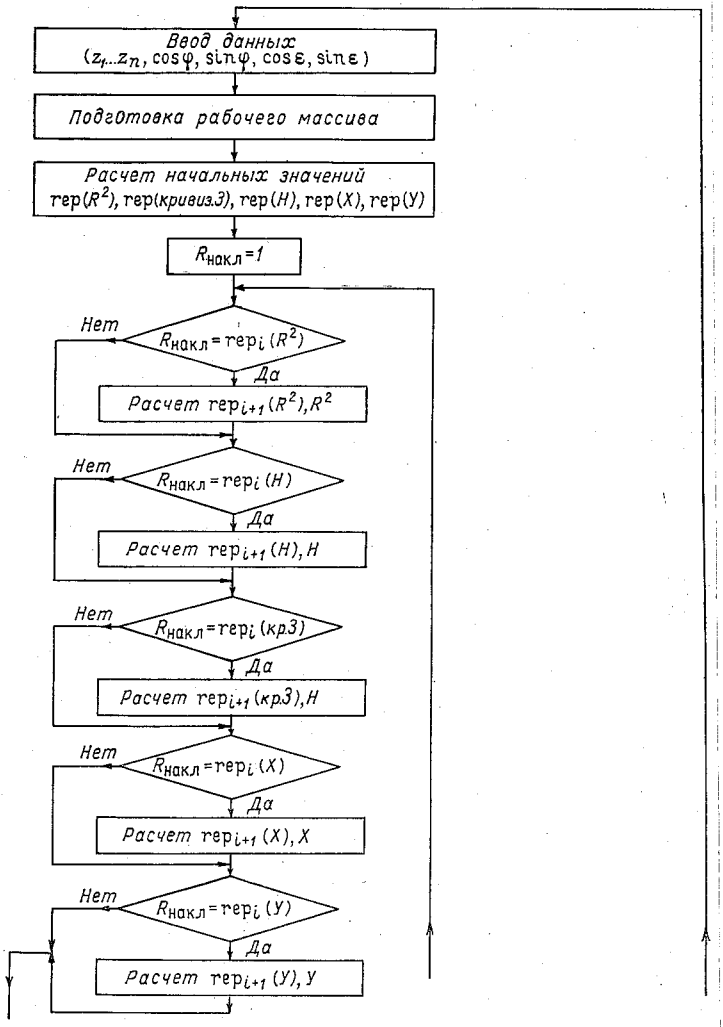


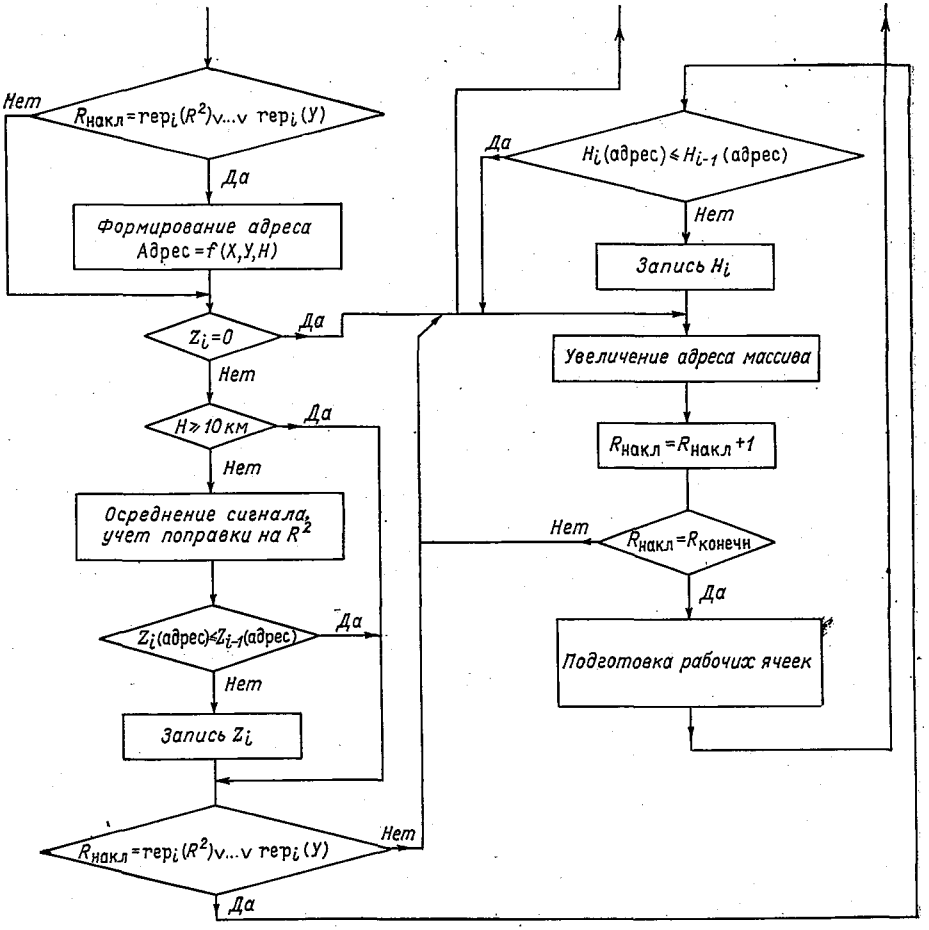
Рис. 1. Блок-схем

Значения ΔX и ΔY, X_0 и Y_0 задаются оператором перед началом работы.

После расчета реперных точек осуществляется вычисление координат X, Y и H элемента осреднения следующим образом. Производится сравнение текущего значения счетчика наклонной даль-

ности R_i последовательно с каждым из рассчитанных реперных значений.

При совпадении значения счетчика наклонной дальности R_i с каким-либо реперным значением производится соответствующее изменение вычисляемой величины (кода коррекции на расстояние, кода высоты, значения составляющих адреса по координатам X и Y) и рассчитывается новое реперное значение для этой вели-



алгоритма обработки.

чины. В случае изменения значений высоты и координат X, Y производится формирование адреса ячейки представления. Таким образом, до начала обработки самого сигнала определен адрес ячейки представления и слой высоты, к которому относится данный объем осреднения.

Следующим шагом обработки является проверка сигнала на нуль. В случае отсутствия отраженного сигнала ($Z_i = 0$) происходит переход на окончание цикла обработки. Если мощность отраженного сигнала не равна 0, а высота элемента осреднения больше или равна 10 км, то обработка отраженного сигнала не производится, а осуществляется только сравнение высоты радиоэха с определенным ранее значением высоты.

В случае когда не выполняются условия $Z_i = 0$ и $H \geqslant 10$ км, производится коррекция сигнала на расстояние, сравнение вычисленного значения отражаемости с ранее полученным значением для данного слоя высоты и запись большего значения отражаемости по соответствующему адресу.

После вычисления и сравнения отражаемости производится определение высоты радиоэха в том случае, когда в результате вычисления координат изменилось хотя бы одно значение координат X и Y или высоты. Если координаты не изменились, то после обработки отражаемости обеспечивается переход на конец цикла. В конце цикла обработки изменяется (увеличивается на единицу) адрес массива, где хранятся исходные данные о средних значениях мощности отраженных сигналов, увеличивается на единицу содержимое счетчика наклонной дальности $R_{накл}$.

Если не обработан весь введенный массив первичной информации ($R_{накл} < R_{конеч}$), то осуществляется переход на расчет координат для следующего элемента осреднения и цикл обработки повторяется. Если обработан весь массив ($R_{накл} = R_{конеч}$), то осуществляется переход на начало программы (на ввод следующего массива исходной информации).

Затраты времени на обработку данных измерений по выбранной программе в зависимости от радиуса обзора $R_{обз}$ представлены в табл. 1.

Таблица 1

$R_{обз}$ км	300	200	150	100
$t_{обр}$ мс	45	31	24	16

Учитывая, что время между двумя тактами поступления первичной информации составляет 26,4 мс, из табл. 1 следует, что ЭВМ М-6000 позволяет обрабатывать данные в реальном масштабе времени только в ограниченном радиусе обзора ($R_{обз} \leqslant 150$ км).

Рассмотренный вариант программы мало зависит от структуры сигнала. В табл. 2 представлена зависимость времени обработки от коэффициента заполнения ($\Delta X = \Delta Y = 18$ км, $R_{обз} = 180$ км).

Таблица 2

$K_{зап}$ %	100	90	70	50	40	10	0
$t_{обр}$ мс	28	27	25	23	22	21	20

Очевидно, что основное время (примерно равное $0{,}6t_{обр}$) затрачивается на преобразование координат, т. е. определение принад-

лежности элемента измерения к определенной ячейке представления и определенному слою высоты. Объем ОЗУ ЭВМ оказывает влияние на величину радиуса обзора в зависимости от размеров ячейки представления. В табл. 3 отражена такая зависимость для объема ОЗУ 16*К*.

Таблица 3

$R_{обз}$ км	40	60	80	100	120	140	160	180
$\Delta X \cdot \Delta Y$ км	2×2	3×3	4×4	5×5	6×6	7×7	8×8	9×9

Представленные в статье результаты позволяют сделать вывод о принципиальной возможности использования промышленных ЭВМ для обработки информации в реальном масштабе времени при решении задач штормоповещения. Выбранный тип ЭВМ и рассмотренные варианты программы обработки обеспечивают возможность обработки отраженного сигнала в ограниченном радиусе обзора.

Увеличение радиуса обзора возможно за счет совершенствования программ обработки, изменения (увеличения) пространственного объема осреднения и использования ЭВМ с большим быстродействием.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Осадкомерный радиолокационный комплекс на базе МРЛ-2 и алгоритм обработки радиолокационных данных об осадках/Г. П. Берюлев, В. А. Евпряков, Ю. В. Мельничук и др.— В кн.: Труды 4-го Всесоюзного совещания по радиометеорологии. Л.: Гидрометеоиздат, 1978, с. 150—154.

2. Система автоматического ввода и обработки радиолокационной информации/В. К. Иванов, А. Г. Ильин, А. В. Кочин, А. Б. Шупяцкий.— В кн.: Труды 4-го Всесоюзного совещания по радиометеорологии. Л.: Гидрометеоиздат, 1978, с. 155—159.

С. М. Гальперин, В. Н. Стасенко, Н. И. Крохин, В. Д. Плотников

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СТАНЦИЙ ПРИ ПРОВЕРКЕ ТОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ГРОЗОПЕЛЕНГАТОРОВ-ДАЛЬНОМЕРОВ

В настоящее время большое внимание уделяется внедрению инструментальных средств обнаружения грозовых облаков. Разрабатываются однопунктные пассивные радиотехнические средства — автоматические грозопеленгаторы-дальномеры (АГПД), предназначенные для определения местоположения (азимут и дальность) атмосферных разрядов (АР) [1]. Дальномерная часть этих устройств основана на анализе амплитуд атмосфериков как функции расстояния или соотношения компонентов E и H электромагнитного излучения АР. Такие АГПД могут быть использованы как в автономном режиме, так и в режиме совместной работы с РЛС, обнаруживающими облака и осадки.

В некоторых случаях оценка как общей работоспособности, так и точностных характеристик разрабатываемых АГПД осуществлялась на основе сопоставления данных, выдаваемых ими, с неинструментальными (визуально-слуховыми) наблюдениями за грозами, проводимыми метеорологическими станциями и постами, или с показаниями МРЛ-1. По этим наблюдениям невозможно с необходимой точностью определить место и время возникновения АР в облаках.

Известно, что РЛС метрового и длинноволнового участка дециметрового диапазонов радиоволн позволяют обнаружить ионизированные каналы АР и определить удаление их радиоэха с точностью до $\pm(1\div1{,}5)$ км [2]. В связи с этим, нами для проверки АГПД использовалась РЛС метрового диапазона типа П-12. Одновременно осуществлялся прием собственного электромагнитного излучения АР в диапазоне рабочих частот АГПД, а также проводились традиционные наблюдения с помощью МРЛ-1. На рис. 1 приведен пример синхронной регистрации АГПД и РЛС П-12 молниевых разрядов. На равномерно движущейся перед индикатором РЛС П-12 с яркостной модуляцией фотопленке фиксируются радиоэхо АР, в двоичном коде координаты азимута и дальности срабатывания АГПД, секундные метки времени, количество и номера

кадров дополнительной регистрации формы импульсов (РФИ) ЭМИ разрядов в СДВ диапазоне.

Такая проверка общей работоспособности и точностных характеристик АГПД обеспечивало следующее:

— при неподвижно установленной антенне РЛС П-12 на грозовой очаг определить удаление каждого зафиксированного АГПД

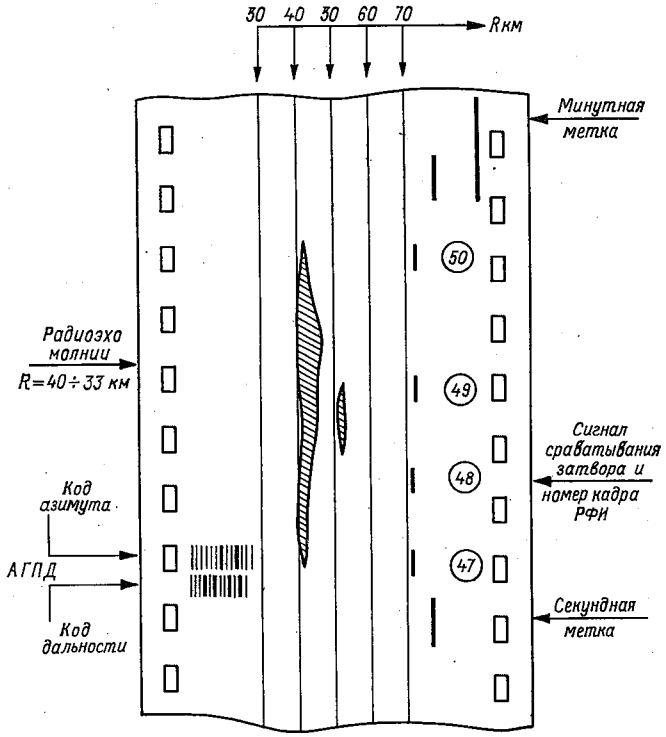


Рис. 1. Запись синхронной регистрации молниевых разрядов АГПД и РЛС П-12.

АР и, следовательно, определить достоверность срабатывания каждой градации дальности пеленгатора-дальномера;

— определить форму ЭМИ атмосферных разрядов, вызывающих срабатывание АГПД;

— осуществить сопоставление количества АР, обнаруживаемых АГПД и РЛС П-12;

— сопоставить координаты АР, выдаваемые АГПД, с полем радиоэха облаков МРЛ-1.

В результате совместной работы указанных РТС было установлено, что АГПД не только обнаруживает грозовые облака, но и представляет информацию о тенденции эволюции молниевой активности в них. В среднем отношение числа зафиксированных разрядов с помощью амплитудного АГПД к числу обнаруженных

РЛС П-12 составляет 0,4—0,6. Для грозопеленгатора с E—H-дальномером это отношение равно 0,15—0,2. В связи с тем, что П-12 обнаруживает не только разряды облако—земля, но и облако—облако, можно считать, что эти устройства обнаруживают только сильноточные АР между облаком и землей. При сопоставлении данных с полем радиоэха МРЛ-1, полученного при нескольких углах места антенны, оказалось, что в поле радиоэха облаков и осадков и в зону $R \leqslant 10$ км от края радиоэха попадает до 90 % всех срабатываний E—H-АГПД. Необходимо, однако, отметить, что степень такого совпадения изменяется в зависимости от того, является ли данное грозовое облако внутримассовым или частью фронтального раздела. Очевидно, здесь сказываются существующие различия в динамической структуре и ходе электрической активности во фронтальных и внутримассовых грозах.

Предложенная методика сопоставления каждого атмосферного разряда с координатами, выдаваемыми АГПД, позволит производить достоверную оценку точностных характеристик аналогичных разрабатываемых пеленгационно-дальномерных устройств.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бару Н. В., Кононов И. И., Соломоник М. Е. Радиопеленгаторы-дальномеры ближних гроз.— Л.: Гидрометеоиздат, 1976.

2. Гальперин С. М., Степаненко В. Д., Осетров А. С. Радиолокационное обнаружение молний.— Труды ГГО, 1974, вып. 301, с. 81—88.

3. Методика исследования гроз радиотехническими средствами/С. М. Гальперин, В. Д. Степаненко, В. Н. Егоров и др.— В кн.: Труды I Всесоюзного симпозиума по атмосферному электричеству. Л.: Гидрометеоиздат, 1976, с. 161—170.

4. Файзулин Н. А., Кононов И. И., Плотников В. Д. Импульсный электромагнитный грозодальномер ближней зоны.— Труды ГГО, 1975, вып. 358, с. 116—123.

Б. Н. Литвак, Ю. А. Мельник, В. А. Петрушевский,
Л. А. Серебров, Ю. С. Филаретов, Г. Ф. Шевела,
В. Л. Шмулевич

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ СРЕДСТВ ОТОБРАЖЕНИЯ ДЛЯ НАЗЕМНЫХ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ РАДИОЛОКАТОРОВ

Введение

Эксплуатируемые в настоящее время наземные метеорологические радиолокаторы (МРЛ), как правило, имеют в своем составе «темновые» индикаторы, выполненные на ЭЛТ с длительным послесвечением люминофора. Недостатки индикаторов этого типа общеизвестны. Тем не менее в литературе опубликованы лишь отрывочные сведения, отражающие перспективы усовершенствования индикаторных устройств указанных МРЛ.

В данном случае прежде всего требуются подробные сведения о психофизиологии процесса зрительного восприятия информации оператором радиотехнической аппаратуры в производственных условиях. Необходимы также детальные светотехнические характеристики изображения на экране. Соответствующие исследования, однако, далеки от завершения.

С другой стороны, было бы ошибочно недооценивать накопленный опыт разработки и эксплуатации МРЛ и их индикаторных устройств. Этот опыт позволяет уже сегодня, опираясь на имеющиеся данные эргономики, сформулировать основные требования к средствам отображения для МРЛ и стационарных метеорологических систем. На этой основе в свою очередь могут быть рассмотрены варианты технических решений и ожидаемые показатели новой аппаратуры. Сформулированные требования, естественно, должны уточняться по мере развития радиолокационной метеорологии и разрешения соответствующих вопросов психофизиологии, эргономики и промышленной гигиены.

При использовании современных МРЛ большинства типов оценка метеообстановки осуществляется оператором-метеорологом визуально, а съем данных с экрана и последующая их обработка — вручную. В результате автоматизации МРЛ функции обслуживающего персонала станут иными. Однако и в дальнейшем

человек-оператор будет активно участвовать в процессе обработки и применения метеорологической информации. Поэтому в настоящей статье основное внимание уделено факторам, влияющим на зрительную работоспособность оператора-метеоролога. В этой связи принято, что индикатор в общем случае должен обеспечивать совмещение и «яркостное» отображение сигналов, поступающих от МРЛ и других источников метеоданных.

1. Основные требования к индикаторным устройствам наземных метеорологических радиолокаторов

В настоящее время распространены передвижные МРЛ. Существуют также стационарные системы сбора, обработки и отображения метеорологической информации. Во втором случае, естественно, состав аппаратуры щире, а функции оператора-метеоролога сложнее. С другой стороны, условия стационарных метеорологических систем позволяют глубже и полнее учесть требования эргономики, в том числе относящиеся к светотехническому обеспечению рабочего места оператора. Вопросы промышленной гигиены, естественно, заслуживают самого пристального внимания и в случае передвижных МРЛ.

Из накопленного опыта разработки и эксплуатации наземных МРЛ различных типов следует, что перспективные средства отображения должны обеспечивать:

— оптимальные условия для выполнения оператором-метеорологом различных зрительных работ (анализ отображаемой на экране метеообстановки, снятие метеоданных с экрана и их обработка, заполнение рабочих журналов, передача сообщений по каналам связи, переключение органов управления и т. п.);

— возможность изменения «памяти» индикатора в пределах, обеспечивающих формирование «немигающего» изображения на экране;

— отображение динамики метеообстановки (направление перемещения облачности, изменения ее плотности и т. д.), в том числе выделение контуров метеообразований и воспроизведение «предыстории» текущей метеообстановки;

— отсутствие на экране «вспышек» яркости, мельканий изображения, неравномерности поля изображения и других дефектов, обусловленных свойствами индикатора;

— воспроизведение максимально возможного числа градаций интенсивности входного радиолокационного сигнала;

— совмещение различной информации — аналоговых сигналов, буквенно-цифровых формуляров, знаков, линий пеленга, карт местности и т. п.;

— кодирование цветом информации, поступающей от различных источников, и формирование дополнительных градаций изображения за счет промежуточных цветов при отображении аналоговых сигналов.

Аппаратура должна быть унифицированной и иметь блочную конструкцию, допускающую варьирование состава (и соответст-

венно решаемых задач) при разработке новых передвижных МРЛ и стационарных систем сбора, обработки и отображения метеорологической информации.

Разрешающая способность индикатора не должна существенно ухудшать общую разрешающую способность МРЛ. Далее, аппаратура должна обеспечивать оперативное документирование изображений, формируемых на экране. Наконец, должна быть предусмотрена трансляция изображений метеообстановки, обработанных оператором-метеорологом, в заинтересованные подразделения и службы, в том числе в службу управления воздушным движением.

Поясним происхождение сформулированных выше требований.

Как уже отмечалось, функции оператора-метеоролога МРЛ многообразны, причем наблюдения за экраном сочетаются с выполнением зарисовок, записей и других операций. В поле зрения оператора, следовательно, оказываются объекты, яркость которых различна. Одно из важнейших требований эргономики, однако, состоит в том, что зрительная работа не должна сопровождаться частой и глубокой переадаптацией зрения.

Нормы освещенности рабочих мест операторов радиотехнических средств в настоящее время отсутствуют, хотя потребность в этих нормах ощущается все более остро. С целью определения порядка величин будем ориентироваться на чертежно-графические и счетные работы. В данном случае, согласно нормам [6], освещенность на рабочем столе должна составлять 300—500 лк. Эта цифра однозначно определяет тип индикатора: последний должен быть «яркостным».

Обоснованность ориентации на яркостный индикатор подтверждается положительным опытом [1, 3, 5] эксплуатации аппаратуры отображения метеоданных на цветном и черно-белых телевизионных экранах. Далее, два «яркостных» индикатора наземных МРЛ упомянуты в обзоре [2]. Один из этих индикаторов выполнен на потенциалоскопе с видимым изображением, другой — на цветном телевизионном кинескопе.

Для наземных МРЛ характерным числом оборотов антенны является $N = 1 \div 10$ об/мин. При этом на экране темпового индикатора слитное изображение метеообразований отсутствует, что затрудняет действия оператора-метеоролога. Работу последнего можно существенно облегчить, если избавить его от необходимости сохранять в своей памяти затухающее изображение. Минимальной скорости обзора ($N = 1$ об/мин) соответствует требуемая продолжительность памяти не менее 60 с; при значении $N = 5$ об/мин необходима память не менее 12 с. Оператор должен иметь возможность регулировать продолжительность памяти.

Скорость и направление перемещения облачности принято определять по характерным точкам радиоэха. В настоящее время с этой целью оператор-метеоролог вручную снимает с экрана индикатора контуры облачности и выполняет затем необходимые

графические построения и расчеты. Желательность автоматизации этого процесса несомненна.

Далее, из очевидных соображений следует, что оперативность использования метеоинформации возрастет, если предысторию метеообстановки можно будет восстанавливать не по записям (зарисовкам, фотоснимкам), а по панорамным изображениям на экране ЭЛТ. Для этой цели в составе МРЛ должны быть предусмотрены специальные средства, позволяющие сохранять и предъявлять по запросу оператора отдельные «кадры» изображений предыдущей метеообстановки. Должны также индицироваться (через заданные промежутки времени) изменения границ метеообразований. Разработка устройств, обеспечивающих решение указанных задач, создает реальные предпосылки для дальнейшей автоматизации процесса обработки метеоинформации.

В настоящее время на практике съем информации производится с экрана диаметром $D \approx 30$ см. Для демонстрации метеообстановки пилотам в процессе их предполетной подготовки желательно иметь более крупный (демонстрационный) экран. По мере автоматизации процесса обработки информации требования к размерам экранов индикаторов МРЛ, вероятно, будут изменяться.

Требования, предусматривающие равномерность поля изображения, отсутствие «вспышек» яркости и мельканий являются общепринятыми. Совмещение разнотипной информации на одном экране и цветовое ее кодирование предусматривается в современной и тем более перспективной аппаратуре отображения.

Более специфичным является требование воспроизведения на экране возможно большего числа градаций интенсивности входного радиолокационного сигнала. Это требование определяется, по крайней мере, двумя факторами: сложной (в смысле перепадов плотности) структурой метеообразований и необходимостью формирования детального их аналога на экране. В реальных условиях операторы существующих наземных МРЛ, как правило, наблюдают двух- и трехградационные изображения. С другой стороны, из опыта эксплуатации МРЛ следует, что для идентификации метеообразований необходимо воспроизводить не менее четырех градаций, не считая яркости фона. Например, должно быть предусмотрено различение зон слабой, умеренной, сильной и очень сильной облачности. Очагам зарождения гроз могут соответствовать отметки типа точечных. Отсюда вытекает требование тщательного учета светотехнических факторов при выборе типа индикатора и компоновке рабочего места оператора. Дополнительным ресурсом являются возможность использования оттенков цветного изображения.

2. Принцип построения и некоторые показатели аппаратуры отображения

К изложенным выше требованиям необходимо добавить еще одно, достаточно существенное: предложения, предусматривающие совершенствование индикаторных устройств МРЛ, должны соот-

ветствовать реальным возможностям современной техники индикации, а также учитывать существование образцов-прототипов, освоенных промышленностью.

С учетом этих соображений предпочтение в настоящей работе отдано индикации телевизионного типа, реализуемой путем графеконного преобразования аналоговых радиолокационных и других

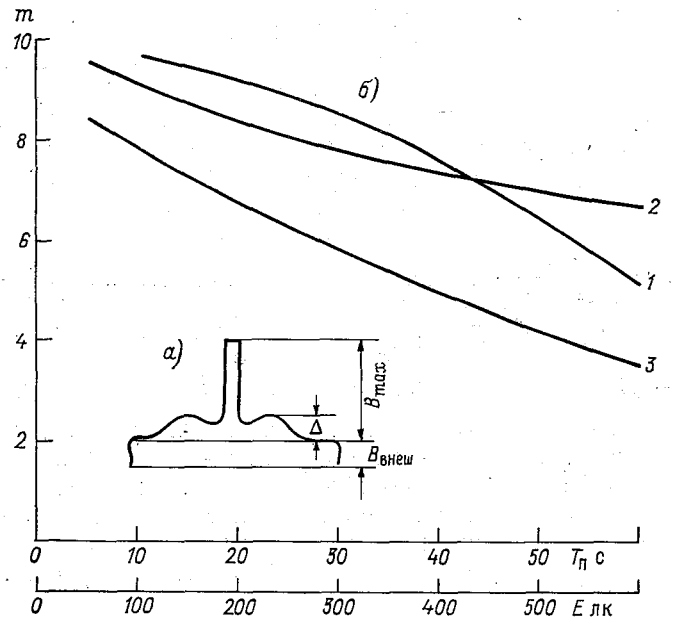


Рис. 1. Яркостный сигнал (*а*) и зависимость числа градаций (*б*) от электрического режима преобразователя и внешних условий.

1 — m ($T_п$), *2* и *3* — m ($E_{внеш}$) при наличии и в отсутствие светофильтра соответственно.

сигналов. Способ положительно зарекомендовал себя в системах управления воздушным движением (см., например, [4]). Он же был использован при разработке стационарной системы сбора, обработки и отображения метеорологической информации [5].

Как уже отмечалось, в случае МРЛ большое значение имеет воспроизведение на экране градаций интенсивности радиолокационного сигнала. Из опыта разработки и эксплуатации графеконных преобразователей следует, что они в производственных условиях обеспечивают воспроизведение четырех-пяти градаций яркости, не считая «фона» изображения. С целью уточнения этого обстоятельства были выполнены измерения и расчеты. Их результаты представлены на рис. 1. Там же схематически изображена структура яркостного сигнала на экране кинескопа.

Принято, что динамический диапазон преобразователя $K = \frac{U_{max}}{U_{min}}$, где U_{max} и U_{min} — максимальное и минимальное значения сигнала на входе графекона, которым соответствуют различимые изменения яркости отметки на телевизионном экране. Число градаций яркости $m = \frac{\ln K}{\ln(1+\gamma)}$, где γ — контрастная чувствительность зрения. Здесь и ниже предполагается, что зависимость между электрическим сигналом и яркостью экрана является линейной.

Кривая *1* на рис. 1 соответствует электрическому сигналу на выходе преобразователя; $T_п$ — продолжительность памяти. В реальных производственных условиях видимость изображения ухудшается за счет засветки экрана индикатора внешними источниками. С учетом этого фактора динамический диапазон преобразователя $K_э = \frac{1+P}{P+G}$, а число градаций яркости $m_э = \frac{\ln K_э}{\ln(1+\gamma)}$. В этих выражениях $P = \frac{B_{внеш}}{B_{max}} = \frac{\rho E_{внеш}}{\pi B_{max}}$, $G = \frac{1}{1+n}$, а $n = \frac{B_{max}-\Delta}{\Delta}$, $B_{внеш}$ — яркость экрана, обусловленная внешней засветкой, B_{max} — максимальное значение яркости экрана (максимальная яркость отметки), $E_{внеш}$ — внешняя освещенность в плоскости экрана, ρ — коэффициент отражения экрана или системы экран — светофильтр, Δ — неравномерность яркости фона изображения (рис. 1 *а*). При наличии светофильтра максимальное значение яркости равно τB_{max}, где τ — коэффициент пропускания светофильтра.

При выполнении расчетов было принято, что $B_{max} = 150$ кд/м², $n = 5$, $\tau = 0{,}5$, $\rho = 0{,}5$ и 0,075. Расчет показывает, что при освещенности $E_{внеш} = 500$ лк возможно наблюдение семи градаций яркости. Принятое значение яркости B_{max} соответствуют имеющимся черно-белым кинескопам и перспективным цветным кинескопам.

Варианты построения перспективной аппаратуры отображения рассмотрим применительно к стационарным системам и передвижным МРЛ.

В первом случае в качестве прототипа может быть использована аппаратура, рассмотренная в работах [1, 3, 5]. С целью расширения ее возможностей необходимо предусмотреть воспроизведение кадров предыдущей метеообстановки. Кроме того, в состав аппаратуры должно быть введено устройство, позволяющее отображать изменение конфигурации метеообразований и их положения в пространстве. Структурная схема показана на рис. 2.

Предложено разместить на рабочем месте оператора три индикатора телевизионного типа: один цветной и два черно-белых. Принято, что число строк разложения увеличено до 1125. Как было показано в работе [3], эта мера обеспечивает существенное улучшение «качества» изображения.

Индикатор с цветным экраном выполняет в основном те же функции, что и цветной индикатор ранее созданной системы [1, 5]. Приблизительно аналогична и процедура обработки информации. Полученная оператором-метеорологом карта метеообстановки, однако, не утрачивается при очередном обновлении метеоданных на экране, а предварительно поступает в канал оперативного запоминания. Эта карта (или кадр предыдущей обстановки)

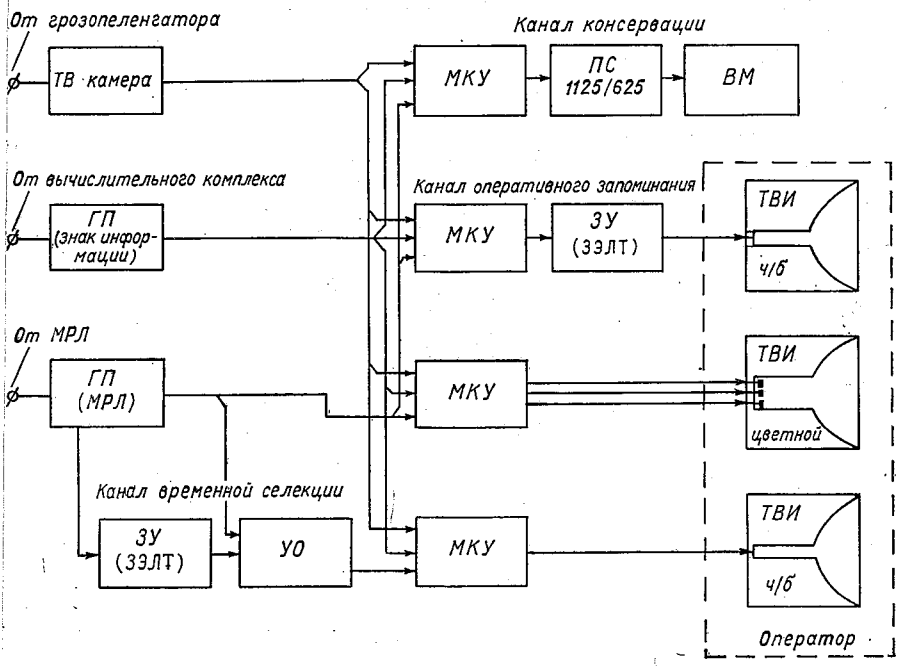
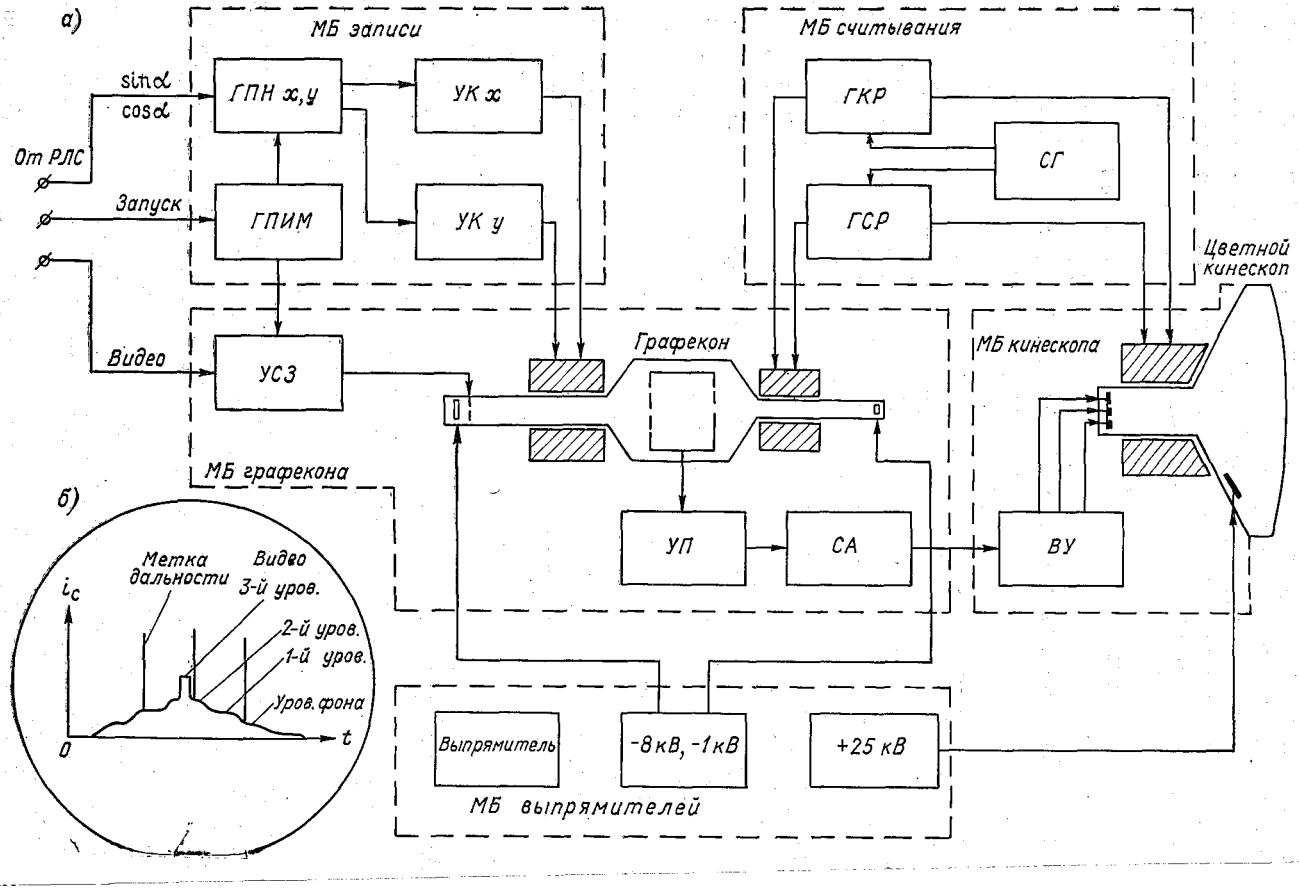


Рис. 2. Структурная схема аппаратуры отображения для стационарной системы сбора, обработки и отображения метеорологической информации.

ТВ камера — телевизионная камера, ГП — графекон преобразования, МКУ — микшернокоммутационное устройство, ЗУ — запоминающее устройство, УО — устройство обработки, ПС — преобразование стандарта, ВМ — видеомагнитофон, ТВИ — телевизионный индикатор.

воспроизводится на одном из черно-белых экранов. Одновременно телевизионные сигналы транслируются всем заинтересованным потребителям. Принято, что элементом памяти является однолучевой потенциалоскоп, обеспечивающий в течение 10—15 мин непрерывное воспроизведение сигнала, записанного однократно. Такая продолжительность памяти соответствует времени, необходимому оператору-метеорологу для обработки очередной группы метеоданных, которые воспроизводятся на цветном экране взамен метеоданных предыдущего кадра.

Изображение, характеризующее динамику метеообстановки, формируется путем вычитания сигналов, соответствующим двум


а)
МБ записи
МБ считывания
sinα
cosα
От РЛС
Запуск
Видео
ГПН x,y
УК x
ГПИМ
УК y
УСЗ
ГКР
СГ
ГСР
Цветной кинескоп
Графекон
МБ кинескопа
МБ графекона
УП
СА
ВУ
б)
Метка дальности
Видео
3-й уров.
2-й уров.
1-й уров.
Уров. фона
i_c
0
t
Выпрямитель
-8кВ, -1кВ
+25 кВ
МБ выпрямителей

последовательным циклам съема метеоданных. И в этом случае элементом памяти является однолучевой потенциалоскоп.

Рассмотренный вариант построения аппаратуры позволяет использовать для сравнительного анализа лишь два последовательных кадра метеообстановки. Возможности системы индикации возрастут, если в ее состав будет введено устройство «консервации» сигналов метеообстановки. Такое устройство показано схематически на рис. 2. С целью использования стандартного видеомагнитофона предусмотрен преобразователь стандарта 1125/625 строк. Таким образом, повторно метеообстановка воспроизводится на стандартном телевизионном растре.

Обратимся теперь к существующим наземным МРЛ, оборудованным «темновыми» индикаторами. В данном случае прототипом более совершенного идикаторного устройства может служить индикатор-преобразователь, разработанный ранее для систем управления воздушным движением. Черно-белый кинескоп последнего целесообразно заменить цветным кинескопом. Функциональная схема представлена на рис. 3. Принято, что выходной сигнал графекона поступает на трехуровневый амплитудный селектор. В конечном итоге на экране кинескопа формируется изображение, промежуточные цвета которого характеризуют интенсивность метеообразований.

В заключение можно сделать следующие выводы.

1. Основные требования к перспективным средствам визуального отображения метеорологической информации предусматривают: яркостную индикацию разнотипных метеоданных (аналоговые отметки, буквенно-цифровые формуляры и знаки, вспомогательная информация), совмещаемых на одном экране; возможность изменения памяти с учетом темпа обновления информации; кодирование разнотипной информации по цвету; воспроизведение максимально возможного числа градаций интенсивности аналоговых сигналов за счет градаций яркости изображения и промежуточных цветов; визуализацию кадров предыдущей метеообстановки; трансляцию изображений метеообстановки, обработанной оператором-метеорологом, различным потребителям.

Яркость изображения и другие его характеристики, а также размеры экрана должны соответствовать требованиям эргономики. Аппаратура должна быть унифицированной и иметь блочную конструкцию, позволяющую варьировать ее состав в автономных МРЛ и стационарных системах.

2. Перечисленные выше требования могут быть реализованы на основе цветной телевизионной индикации с использованием

Рис. 3. Структурная схема индикатора-преобразователя с цветным кинескопом *(а)* и выходной сигнал графекона *(б)* передвижной МРЛ.

МБ — *моноблок*, ГПН — генератор *пилообразного напряжения*, ГПИМ — *генератор* прямоугольных импульсов и меток, ГКР — генератор кадровой развертки, ГСР — генератор строчной развертки, СГ — синхрогенератор, УСЗ — усилитель сигнала записи, УК — усилитель координатный, УП — усилитель предварительный, СА — селектор амплитудный, ВУ — видеоусилитель трехканальный.

аналоговых устройств промежуточной памяти и элементов цифровой техники. Создание и внедрение указанной аппаратуры позволит повысить эффективность передвижных МРЛ и стационарных метеорологических систем, а также улучшить условия труда операторов-метеорологов.

3. Развитие ранее созданной аппаратуры индикации стационарных систем сбора, обработки и отображения метеорологической информации возможно за счет использования дополнительных устройств обработки сигналов и увеличения числа строк разложения до 1125. На рабочем месте оператора-метеоролога должны быть предусмотрены три экрана: один цветной и два черно-белых. На цветном экране целесообразно отображать обобщенную обстановку, на одном из черно-белых экранов — кадры предыдущей обстановки, на втором черно-белом экране следует индицировать изменения формы и расположения метеообразований. Возможности аппаратуры индикации возрастут, если в ее состав будут введены устройства магнитной памяти, обеспечивающие запоминание и воспроизведение различных кадров метеообстановки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аппаратура отображения обобщенной метеорологической информации на цветном и черно-белом телевизионных экранах/Б. Н. Литвак, В. К. Михайлов, Э. А. Новичев и др.— См. наст. сб.

2. Брылев Г. Б., Низдойминога Г. Л., Степаненко В. Д. Вопросы практического применения радиолокационной метеорологической информации.— Обнинск, Информационный центр, 1978.

3. Буквенно-знаковое отображение метеорологической информации на основе графеконного преобразования/Б. Н. Литвак, В. К. Михайлов, В. А. Петрушевский и др.— Труды ГГО, вып. 412, 1978.

4. Литвак Б. Н., Серебров Л. А., Шмулевич В. Л. Крупномасштабное яркостное отображение радиолокационных сигналов в аппаратуре управления воздушным движением.— В кн.: Специальные вопросы светотехники в охране труда. М.: Изд-во ВЦНИИОТ, 1975.— 70 с.

5. Петрушевский В. А., Селивестрова Н. М., Шевела Г. Ф. Аппаратура для комплексного анализа радиолокационной метеорологической информации.— Труды ГГО, 1976, вып. 385.

6. Строительные нормы и правила. Ч. II, раздел А.— М.: Стройиздат, 1972.— 14 с.

В. К. Михайлов, Л. А. Серебров, В. Л. Шмулевич

ИНФОРМАЦИОННАЯ ЕМКОСТЬ ЭКРАНА ИНДИКАТОРА МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОГО РАДИОЛОКАТОРА

Как отмечено в работе [3], индикатор МРЛ должен обеспечивать воспроизведение максимально возможного числа градаций интенсивности входного радиолокационного сигнала. Кроме того, должна быть реализована требуемая детальность изображения. С учетом указанных факторов универсальным показателем эффективности индикатора МРЛ следует считать информационную емкость его экрана. Сказанное здесь, естественно, распространяется и на другие индикаторы, предназначенные для формирования сложных полутоновых изображений.

Далее, в работе [3] показано, что перспективный индикатор МРЛ должен быть «яркостным». Это обстоятельство предопределяет использование устройства промежуточной памяти — аналогового или цифрового. Очевидно, что к индикатору и устройству промежуточной памяти должны быть предъявлены согласованные требования по информационной емкости.

Вопрос об информационной емкости визуальных средств отображения неоднократно обсуждался в литературе (см., например, [1, 2]). Однако характеристики, определяющие информационную емкость, оказались рассмотренными в отрыве от психофизических и светотехнических характеристик. В настоящей работе предпринята попытка получить расчетные соотношения, связывающие указанные характеристики, и на этой основе оценить информационную емкость экрана индикатора МРЛ.

Расчетные соотношения. В общем случае, как известно, информационная емкость

$$I = N \log_2 m, \tag{1}$$

где N — число элементов изображения, m — число градаций яркости элемента.

Значение I должно быть вычислено с учетом аппаратурных показателей индикатора, условий его использования, характеристик зрительного анализатора, свойств воспроизводимых электрических сигналов и структуры изображения.

Примем, что элементом изображения является показанное на рис. 1 одиночное световое пятно, причем распределение яркости в пределах пятна соответствует кривой Гаусса. В данном случае размер элемента зависит от отсчетного уровня яркости. Диаметр пятна будем отсчитывать на уровне второй градации $\gamma B_ф$, где γ — контрастная чувствительность зрения, $B_ф = \rho E_{вн}/\pi$ — яркость

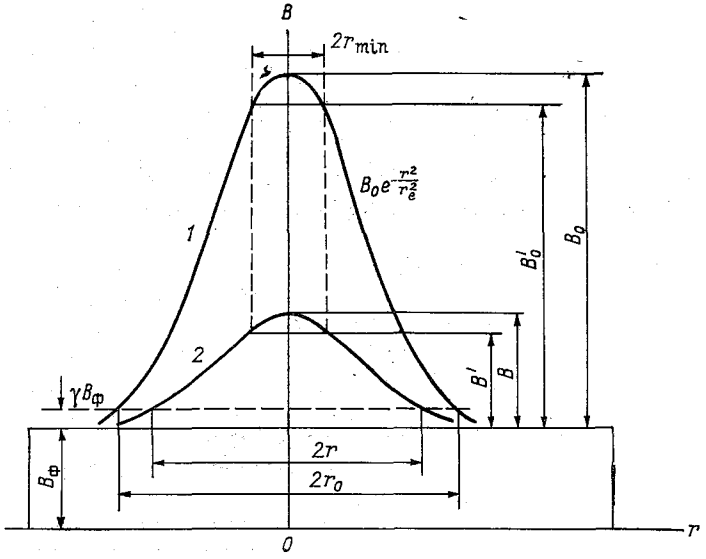


Рис. 1. Распределение яркости в световом пятне.

1 — номинальная яркость, *2* — уменьшенная яркость.

фона, $E_{вн}$ — внешняя освещенность экрана, ρ — коэффициент отражения экрана.

Максимальное значение яркости пятна ограничим уровнем B', на котором диаметр пятна $2r_{min}$ соответствует минимальному углу α, разрешаемому глазом. Примем также, что $\gamma = \text{const}$, а флуктуации изображения, обусловленные шумами, практически не влияют на результаты наблюдений за экраном. При указанных условиях число градаций яркости

$$m = \ln\left(\frac{B'}{B_ф}\right) K^{-1}, \tag{2}$$

где

$$K = \ln(1+\gamma).$$

Допустим далее, что $E_{вн} = \text{const}$. Тогда изменение яркости пятна и числа градаций сопровождается изменением фиксируемого наблюдателем размера элемента, как это схематически изображено на рисунке. Можно показать, что при сформулированных условиях

$$m(N) = \ln(1+\gamma e^a e^{-c}) K^{-1}, \tag{3}$$

где $a=\frac{N_e}{N}$, $c=\frac{N_e}{N_{\max}}$, N_e — число элементов на отсчетном уровне яркости $\frac{B}{e}$, $N_{\max}=\frac{8{,}7\cdot 10^6 D^2}{\alpha^2 L^2}$ — число элементов на уровне яркости B', D — диаметр экрана, L — расстояние между экраном и наблюдателем, N — число элементов, соответствующих радиусу пятна r.

Максимальное число градаций соответствует наибольшей яркости пятна. Если допустить, что при увеличении этой яркости до значения B_0 фокусировка пучка сохраняется неизменной, то число элементов

$$N_0=\frac{N_e}{\ln R} \tag{4}$$

и

$$m_0=\ln(1+Re^{-c})K^{-1}, \tag{5}$$

где

$$R=\frac{\pi B_0}{\rho E_{\text{вн}}}.$$

Выражения (3)—(5) соответствуют «регулярному» размещению элементов изображения на экране. Их количество определяется размером элемента, обладающего максимальной яркостью (наибольшим числом градаций). Допустим теперь, что реализовано программное управление пучком и расположение элементов на экране зависит от их мгновенной яркости. В этом случае количество информации

$$I_{\max}=\int_0^{N^*}\log_2 m(N)\,dN=N_0\log_2 m_0+\int_{N_0}^{N^*}\log_2 m(N)\,dN. \tag{6}$$

Очевидно, что $I_{\max}$ имеет смысл предельной информационной емкости. Верхний предел интегрирования N^* соответствует минимальному числу градаций $m=2$ (табл. 1).

Таблица 1

Зависимость информационной емкости и числа элементов изображения от количества градаций яркости

Параметр	m								
	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$I_N\cdot 10^3$ дв. ед.	298	307	306	300	298	290	284	276	260
$N\cdot 10^3$ эл.	300	200	150	125	115	105	92	85	80

Результаты расчетов. При выполнении расчетов было принято, что $2r_e=D/600$, $D=400$ мм, $L=0{,}6$ м, $N_e=280\cdot 10^3$ эл., $\rho=0{,}5$, $\alpha=1{,}5'$ и $\gamma=0{,}2$.

Взаимосвязь между значениями I_N, m и N поясняется данными табл. 1. Поскольку было принято, что $\gamma = \text{const}$, эти данные безотносительны к светотехническим условиям (B_0, $E_{вн}$). Изменение величины информационной емкости в диапазоне значений $m = 2 \div 10$ не превышает 20 %. Максимальная величина I_N соответствует $m = 3$, когда на фоне, обусловленном внешней засветкой, различимы две градации яркости.

Приведенные здесь значения I_N могут быть реализованы посредством различных устройств промежуточной памяти — аналоговых и цифровых. Пусть например, необходимо обеспечить $m = 7$. В данном случае $N = 105 \cdot 10^3$ эл., что соответствует возможностям серийного графекона: требуемый диаметр пятна на уровне второй градации яркости $2r \leqslant D_м/360$, где $D_м$ — диаметр мишени.

Влияние светотехнических условий поясняется данными табл. 2. Принято, что индикатор должен обеспечивать воспроизведение десяти градаций яркости. Из результатов расчета следует, что в этом случае $N_0 = 80\,000$ эл.

Таблица 2

Информационная емкость $I_N \cdot 10^3$ дв. ед. при $N_0 = 80 \cdot 10^3$ эл. и $m \leqslant 10$

B_0 кд/м²	$E_{вн}$ лк					
	50	150	300	500	800	1000
50	275	204	151	130	55	31
150	—	275	233	198	161	141
250	—	—	264	233	200	184

Таблица 3

Предельная информационная емкость $I_{max} \cdot 10^3$ дв. ед. при $m = 2$

B_0 кд/м²	$E_{вн}$ лк					
	50	150	300	500	800	1000
50	660	550	480	360	180	40
150	700	650	610	560	490	460
250	710	690	650	650	570	540

Данные табл. 3 характеризуют предельные значения информационной емкости. В среднем эти значения в 2—3 раза больше, чем в случае «регулярной» структуры растра.

В заключение сделаем следующие выводы.

1. Полученные расчетные соотношения позволяют вычислить информационную емкость панорамного радиолокационного индикатора, в том числе индикатора МРЛ, с учетом аппаратурных показателей (разрешающей способности трубки, диаметра и яркости пятна, коэффициента отражения экрана), условий наблюдения (внешней освещенности экрана, расстояния наблюдения) и психофизических факторов (контрастной чувствительности и остроты зрения).

2. Информационная емкость экрана индикатора МРЛ составляет в типовых условиях около $2 \cdot 10^5$ дв. ед. при числе градаций яркости $m = 10$ и числе отображаемых на экране элементов около 10^5. Из этих данных, в частности, следует, что промежуточная память «яркостного» индикатора может быть реализована средствами как аналоговой, так и цифровой техники. Из аналоговых устройств предъявляемым требованиям отвечает двухлучевой потенциалоскоп, позволяющий воспроизводить необходимое количество полутонов.

3. В процессе дальнейших исследований предстоит более полно учесть приборные показатели индикатора, характеристики зрительного анализатора, свойства отображаемых сигналов и структуру изображения на экране.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гуревич С. Б. Эффективность и чувствительность телевизионных систем.— М.: Энергия, 1964.

2. Орловский Е. Л. и др. Теоретические основы электрической передачи изображений.— М.: Советское радио, 1962.

3. Перспективы развития средств отображения для наземных метеорологических радиолокаторов/Б. Н. Литвак, Ю. А. Мельник, В. А. Петрушевский и др.— См. наст. сб.

Б. Н. Литвак, В. К. Михайлов, Э. А. Новичев, В. А. Петрушевский, Л. А. Серебров, А. А. Федоров, Ю. С. Филаретов, Г. Ф. Шевела, В. Л. Шмулевич

АППАРАТУРА ОТОБРАЖЕНИЯ ОБОБЩЕННОЙ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ НА ЦВЕТНОМ И ЧЕРНО-БЕЛОМ ТЕЛЕВИЗИОННЫХ ЭКРАНАХ

В комплексах сбора, обработки и отображения метеорологической информации ответственная роль отводится индикаторным устройствам. Последние должны обеспечивать отображение обобщенной метеоинформации в форме, наиболее удобной для приема и анализа. Задача разработки такой аппаратуры была решена в системе комплексного анализа радиолокационной метеорологической информации [1].

В аппаратуре использован принцип телевизионной индикации метеоинформации, поступающей от следующих источников:

1) метеорологическая радиолокационная станция (МРЛ-1, МРЛ-2 или МРЛ-5),

2) аппаратура автоматической обработки метеоданных,

3) автоматический грозопеленгатор-дальномер.

Совмещение всех видов отображаемой информации на одном экране достигается путем преобразования ее в телевизионные сигналы с единым стандартом телевизионного разложения. Преобразование осуществляется: а) для аналоговой радиолокационной метеорологической информации при помощи запоминающей ЭЛТ типа графекон, б) для знаковой метеорологической информации, поступающей от аппаратуры обработки, при помощи специального знакопечатающего графекона, в) для информации, поступающей от грозопеленгатора, при помощи видикона путем оптического съема изображения с экрана выносного индикатора, содержащего потенциалоскопическую ЭЛТ, обладающую длительной памятью (30 мин).

Телевизионный сигнал от каждого канала преобразования поступает на соответствующий прожектор цветного масочного кинескопа. В результате на экране цветного телевизионного индикатора легко различаются изображения пеленгов на грозовые разряды (красные) на фоне радиолокационного изображения облач-

ности (отображаемой синим цветом) и совмещенные с ними знаковые формуляры (зеленые) (рис. 1). Это позволяет оператору быстро находить и выделять опасные для полетов зоны.

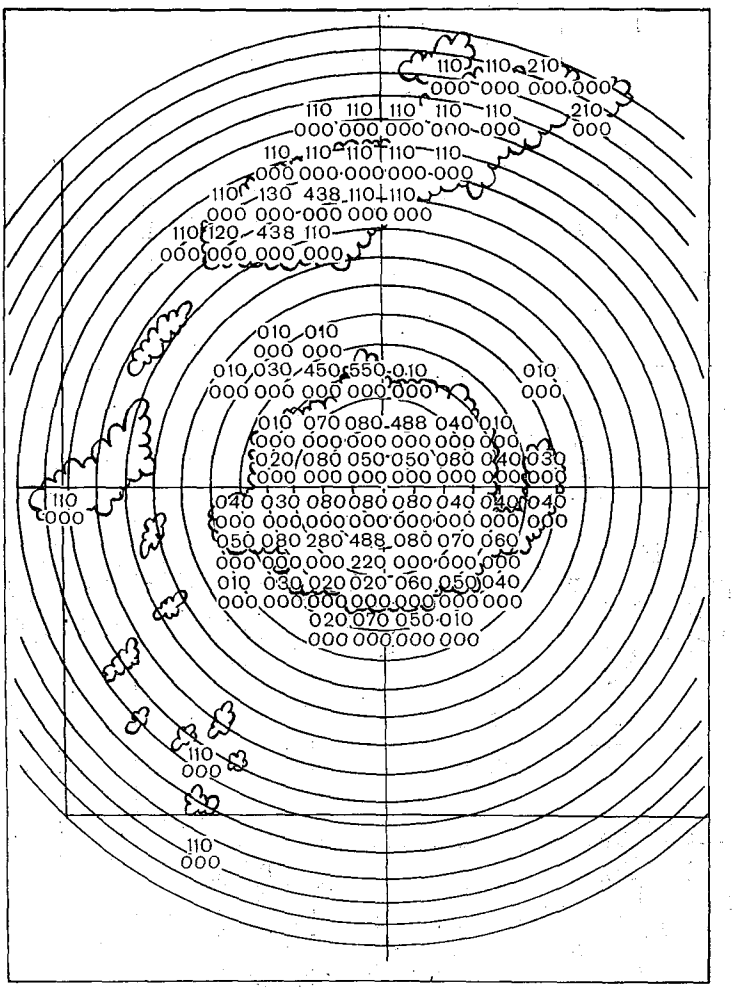
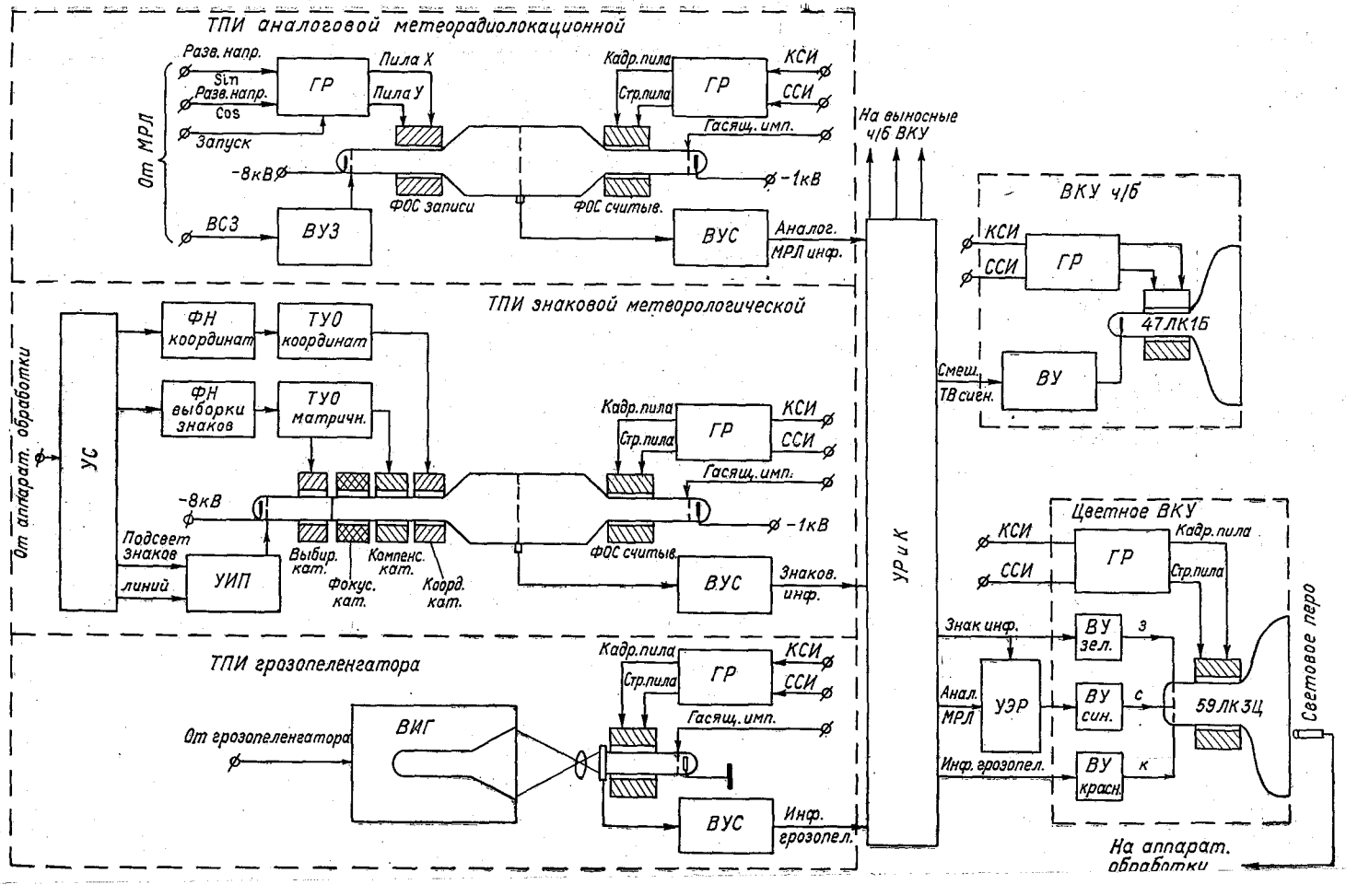


Рис. 1. Отображение метеоинформации на экране цветного телевизионного индикатора.

Наличие радиолокационного изображения в форме ИКО или ИДВ позволяет осуществить топологический принцип отображения и сохранить на экране реальное пространственное расположение метеообъектов. При этом знаковая и грозопеленгационная информация оказывается жестко привязанной к соответствующим точкам экрана.


ТПИ аналоговой метеорадиолокационной
Разв. напр.
Sin
Разв. напр.
Cos
Запуск
От МРЛ
ГР
Пила X
Пила У
Кадр. пила
Стр. пила
ГР
КСИ
ССИ
Гасящ. имп.
-8кВ
-1кВ
ФОС записи
ФОС считыв.
ВСЗ
ВУЗ
ВУС
Аналог. МРЛ инф.
На выносные ч/б ВКУ
ТПИ знаковой метеорологической
От аппарат. обработки
УС
ФН координат
ТУО координат
ФН выборки знаков
ТУО матричн.
Кадр. пила
Стр. пила
ГР
КСИ
ССИ
Гасящ. имп.
-8кВ
-1кВ
Подсвет знаков
линий
УИП
Выбир. кат.
Фокус. кат.
Компенс. кат.
Коорд. кат.
ФОС считыв.
ВУС
Знаков. инф.
ТПИ грозопеленгатора
Кадр. пила
Стр. пила
ГР
КСИ
ССИ
Гасящ. имп.
От грозопеленгатора
ВИГ
ВУС
Инф. грозопел.
УР и К
ВКУ ч/б
КСИ
ССИ
ГР
47ЛК1Б
Смеш. ТВ сиен.
ВУ
Цветное ВКУ
КСИ
ССИ
ГР
Кадр. пила
Стр. пила
Знак инф.
ВУ зел.
з
Анал. МРЛ
УЭР
ВУ син.
с
59ЛК3Ц
Инф. грозопел.
ВУ красн.
к
Световое перо
На аппарат. обработки

Помимо цветного телевизионного индикатора в состав аппаратуры отображения входят монохромные (черно-белые) телевизионные индикаторы, где совмещенное изображение образуется путем сложения сигналов на модуляторе кинескопа. При этом обеспечивается оперативный и независимый (на каждом рабочем месте) выбор полярности представления различных видов информации, что способствует повышению их визуальной различимости. Например, цифры и знаки отображаются в позитиве (т. е. черные на белом фоне), а сигналы радиоэха и грозопеленгатора — в негативе.

Аппаратура отображения, построенная на основе структуры телевизионного типа, обеспечивает:

— высокую яркость и высокую контрастность изображения, которые позволяют наблюдать его в незатемненном помещении;

— простоту размножения и трансляции телевизионного сигнала;

— возможность использования магнитной видеозаписи для документирования информации;

— возможность кодирования информации в широкой цветовой гамме.

Выбор в качестве оконечного воспроизводящего устройства цветного масочного кинескопа был продиктован следующими требованиями:

1) основные цвета свечения люминофоров и число получающихся цветовых тонов должны обеспечивать уверенное цветовое различение отображаемых данных;

2) яркость и разрешающая способность примененной цветной ЭЛТ должны быть достаточными для обеспечения условий хорошей цветовой видимости и декодирования цветного изображения при нормальной внешней освещенности;

3) должна обеспечиваться возможность управления цветной ЭЛТ доступными и по возможности простыми техническими средствами.

Аппаратура отображения метеоданных содержит три преобразователя информации в телевизионный сигнал. Два из них используют запоминающие ЭЛТ класса сигнал—сигнал в качестве промежуточной памяти, согласующей темп поступления информации и ее съема с последующим воспроизведением.

Структурная схема построения каналов преобразования представлена на рис. 2. Первый преобразователь построен на запоминающей ЭЛТ — двухпрожекторном графеконе, который преобразует радиолокационное изображение кругового (в координатах

Рис. 2. Структурная схема телевизионной аппаратуры отображения метеорологической информации.

ТПИ — тракт преобразования информации, УС — устройство согласования, УРиК — устройство размножения и коммутации, ГР — генератор развертки, ВУ — видеоусилитель, ВУС — видеоусилитель считывания, ВУЗ — видеоусилитель записи, ВСЗ — видеосигнал записи, ФН — формирователь напряжения, ТУО — токовый усилитель отклонений, УИП — усилитель импульсов подсвета, ВИГ — выносной индикатор грозопеленгатора, УЭР — устройство электрической рирпроекции.

азимут—дальность) либо секторного (в координатах дальность—высота) обзора МРЛ в телевизионное. В канал преобразования входят устройства сопряжения выходных сигналов МРЛ (видеосигнала и развертывающих напряжений) с целью приведения их к виду, удобному для осуществления записи на мишени графекона. Далее следуют устройства, формирующие полный сигнал записи и развертку, соответствующую характеру движения антенны МРЛ в пространстве. Считывание сигнала осуществляется вторым электронным пучком графекона, управляемым по закону телевизионной развертки. Считывающий тракт содержит видеоусилители и развертывающие устройства.

Для преобразования знаковой информации используется графекон с профилированным записывающим пучком, получаемым в результате применения в записывающем прожекторе знаковой матрицы аналогично знакопечатающим ЭЛТ. Канал преобразования знаковой информации состоит из аппаратуры цифровой обработки эхо-сигнала от МРЛ. Коды, несущие информацию о виде знака и его адресе, преобразуются далее в токи, управляющие посредством магнитного поля записывающим пучком знакопечатающего графекона. Это управление в основном сводится к следующим трем операциям:

1) выбору соответствующего знака на матрице, т. е. приданию записывающему пучку профиля требуемого знака путем прохождения его через соответствующее профилированное отверстие матрицы;

2) неискаженному переносу данного знака на мишень;

3) координатному отклонению профилированного пучка в соответствии с поступившим кодом адреса.

Считывающий тракт знакового графекона идентичен аналоговому и содержит те же самые элементы и устройства.

Использование для отображения знаковой информации обладающего памятью знакопечатающего графекона позволило резко уменьшить частоту регенерации знаков (до 3 Гц) и, как следствие, увеличить объем отображаемой информации (до 3000 знаков), не прибегая к увеличению быстродействия тракта отклонения записывающего электронного пучка. Для сравнения напомним, что обычные алфавитно-цифровые дисплеи позволяют одновременно выводить на экран 700—800 знаков. В результате разработки канала преобразования знаковой информации была установлена возможность отображения заданного объема информации (до 400 шестизначных формуляров на квадратном растре) на экране цветного масочного кинескопа при обычном вещательном стандарте телевизионного разложения (625 строк, 50 полукадров в секунду). Необходимо отметить, что используемая знаковая матрица содержит сложные символы, принятые в метеорологии, некоторые цифры являются двойными, т. е. на одно знакоместо пишутся две цифры. Кроме того, предусмотрено «оконтуривание» формуляров, что уменьшило количество строк телевизионного разложения, отводимых для воспроизведения собственно знаков. Каждый знак

Таблица 1

Характеристика	Показатель
1. Тип развертки	Телевизионная чересстрочная, 625 строк, 50 полей в 1 с
2. Вид индикации	Цветная: тремя цветами (*R*, *G*, *B*), монохромная — черно-белая
3. Вид изображения	Аналоговое: ИКО (50, 150 и 300 км), аналоговое: ИДВ (16/40 км), координатно-знаковое
4. Источник и объем информации:	
а) эхо-сигнал метеобразований	
б) цифровые коды станций штормового кольца	20 формуляров по 6 знаков
в) цифровые коды вертикальных профилей облаков	330 формуляров по 6 знаков
г) координатная сетка	441 точка
д) контур подчеркивания опасных явлений	250 отрезков линий общей длиной 5 м
е) грозопеленгатор	200 отметок за 15-минутный интервал
ж) ручной ввод	Точечный контур опасных зон 1500 точек
5. Число знаков в строке	80
6. Число строк	40
7. Алфавит символов	Цифры, буквы, метеорологические символы — 63 вида
8. Редактирование	Знакопечатающее световое перо, стирание, замена, оконтуривание
9. Размеры знаков (высота)	5 мм — цветной индикатор, 4,5 мм — монохромный индикатор
10. Размеры экранов (диаметр)	360 мм — цветной индикатор, 330 мм — монохромный индикатор
11. Тип памяти	Магнитная «куб 3», 1024 36 р., потенциалоскопическая
12. Сопряжение с ЭВМ	Возможно
13. Документирование	Перфоратор ПЛ-150, телетайп Т-63, фотосчитывающее устройство Г-3-1500, фоторегистрация, возможна видеозапись
14. Количество индикаторов	Один цветной, два монохромных, возможно наращивание
15. Точность совмещения информации	Не хуже 5 % (определяется дискретностью формуляров)
16. Разрешающая способность аналогового тракта	0,8—1,2 % от шкалы дальности (в режиме ИКО)
17. Чувствительность приемноиндикаторного тракта	130 дБ/Вт

воспроизводится восьмью телевизионными строками, что соответствует высоте знака на экране цветного телевизионного индикатора 5 мм при общей высоте изображения 360 мм.

Для сохранения чистоты цвета знаковой информации при ее совмещении с аналоговой радиолокационной применена электронная рирпроекция путем «вытеснения» сигнала радиоэха сигналами знаков. С помощью «светового пера» и устройства выборочной обработки информации обеспечивается возможность ручного редактирования знаковой информации.

Основные технические характеристики аппаратуры отображения приведены в таблице.

В заключение следует сказать, что создан комплекс аппаратуры телевизионного отображения обобщенной метеорологической информации, обеспечивающий существенное улучшение условий работы оператора и сокращение времени обработки метеоданных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Петрушевский В. А., Селиверстова Н. М., Шевела Г. Ф.— Труды ГГО, 1976, вып. 383, с. 103—109.

Л. П. Бобылев, Г. Г. Щукин

ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ МЕТОДОВ ОПТИМАЛЬНЫХ СТАТИСТИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ В ЗАДАЧЕ РАДИОТЕПЛОЛОКАЦИОННОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЛАГОСОДЕРЖАНИЯ ОБЛАЧНОЙ АТМОСФЕРЫ

1. Одними из наиболее важных областей применения радиотеплолокационных методов зондирования атмосферы являются такие, как исследования по физике облаков, контроль за результатами активных воздействий на облачные системы с целью регулирования осадкообразования и оценка условий распространения радиоволн в тропосфере. Указанные проблемы для своего решения, кроме всего прочего, требуют создания оперативных и достаточно точных методов определения интегральных параметров влагосодержания облачной атмосферы. Возможность радиотеплолокационного определения этих параметров в настоящее время показана в ряде теоретических и экспериментальных работ [1, 2, 7, 9, 10, 11]. Однако с точки зрения широкого практического использования указанных методов остается нерешенным ряд вопросов:

1) построение оптимальных процедур определения интегральных параметров влагосодержания облачной атмосферы по характеристикам радиотеплового излучения и поглощения атмосферы;

2) определение оптимальных условий эксперимента;

3) обоснованная оценка точности методов и др.

2. При разработке радиотеплолокационных методов определения интегральных параметров влагосодержания атмосферы в рамках проблемы создания радиотехнических средств и методов контроля за результатами активных воздействий на мощные конвективные облака нужно учитывать особенности зондирования этих облаков. Эти особенности связаны с существенной горизонтальной неоднородностью полей конвективных облаков и большой изменчивостью их параметров, прежде всего водозапаса. Указанное обстоятельство заставляет отказаться от использования Солнца (или другого внеземного источника радиоизлучения) для оперативного определения полного поглощения атмосферы. Нельзя использовать

с этой целью и широко распространенный в настоящее время метод угломестных «разрезов» атмосферы, являющийся относительным методом.

Таким образом, остается лишь абсолютный, требующий тепловой калибровки радиометров метод определения влагосодержания атмосферы по измеренным значениям радиояркостной температуры.

Полное поглощение, или оптическая толщина атмосферы, τ связано с радиояркостной температурой $T_я$ соотношением из [2] (при наблюдении с поверхности Земли):

$$\tau = -\cos\theta \ln\left(1 - \frac{T_я}{T_э}\right), \tag{1}$$

где θ — зенитный угол, а $T_э$ — эффективная температура атмосферы. Ошибки определения τ обусловлены ошибками измерений $T_я$ и незнанием точного значения $T_э$, которое принимается обычно равным среднему климатическому.

Используя приближенную формулу переноса ошибок из [13], можно получить выражение для дисперсии ошибки определения τ:

$$\sigma^2_{\tau_{эксп}} \approx \frac{\cos^2\theta e^{2\sec\theta\tau_0}}{T^2_{э.\,0}} \left\{\sigma^2_{T_{я.\,эксп}} + \left(1 - e^{-\sec\theta\tau_0}\right)^2 \sigma^2_{T_э}\right\}, \tag{2}$$

где $\sigma^2_{T_{я.\,эксп}}$ — дисперсия экспериментальных ошибок измерения $T_я$, а $\sigma^2_{T_э}$ — дисперсия вариаций $T_э$. Индексом «0» обозначены средние климатические значения.

Значение ошибки определения τ, как это следует из (2), существенным образом зависит от члена $\exp(2\sec\theta\tau_0)$, т. е. от полного поглощения. В табл. 1 представлены значения $\sigma_{\tau\,эксп}/\tau_0$ для

Таблица 1

Относительные средние квадратические ошибки определения τ

Модель	$k=0$			$k=0{,}05$			$k=0{,}1$		
	0,3	0,8	3,0	0,3	0,8	3,0	0,3	0,8	3,0
Sc (лето)	0,016	0,013	0,013	0,065	0,054	0,051	0,13	0,11	0,10
Cu cong	1,42	0,048	0,019	$\gg 1$	0,13	0,063	$\gg 1$	0,25	0,12

трех значений относительной ошибки измерений радиояркостной температуры $k = \sigma_{T_{я.\,эксп}}/T_{я.\,0}$ и трех длин волн λ, равных 0,3, 0,8 и 3 см, для моделей Sc (лето) и Cu cong [3]. Как видно из табл. 1, даже при идеальных измерениях $T_я$, ошибка определения τ отлична от нуля и превышает 100 % для Cu cong на коротких длинах волн. Это является следствием «насыщения» радиояркостной температуры [3], что существенно ограничивает возможности

определения метеопараметров атмосферы по собственному радиотепловому излучению.

3. Определение интегральных параметров влагосодержания облачной атмосферы по поглощению можно рассматривать как задачу оптимального оценивания для линейных статистических моделей [12, 5, 16]. Общая линейная статистическая модель (ЛСМ) полного ранга имеет вид

$$Y = AX + \varepsilon, \tag{3}$$

где A — матрица размера $m \times n$, предполагаемая известной и называемая матрицей плана эксперимента; $Y = (y_1, y_2, \ldots, y_m)^T$ и $\varepsilon = (\varepsilon_1, \varepsilon_2, \ldots, \varepsilon_m)^T$ — вектора измерений и ошибок соответственно; $X = (x_1, x_2, \ldots, x_n)^T$ — вектор оцениваемых параметров. Предполагается, что ошибки ε распределены по нормальному закону с нулевым средним $E\{\varepsilon\} = 0$ и ковариационной матрицей B_ε. Будем считать, что ε содержит как ошибки измерений, так и ошибки модели.

Если оцениваемый вектор неслучайный, то

$$E\{Y\} = AX; \quad B_Y = B_\varepsilon, \tag{4}$$

где B_Y — ковариационная матрица вектора измерений. Для данного типа ЛСМ оптимальная оценка минимальной дисперсии (ОМД) имеет вид [16]

$$\hat{x} = (A^T B_\varepsilon^{-1} A)^{-1} A^T B_\varepsilon^{-1} y. \tag{5}$$

Ковариационная матрица оценки

$$B_{\hat{x}} = (A^T B_\varepsilon^{-1} A)^{-1}. \tag{6}$$

Этот метод оценивания целесообразно использовать в тех случаях, когда отсутствует априорная информация об искомых параметрах. В рамках рассматриваемой в данной работе задачи его можно применить для радиотеплолокационного зондирования конвективных облаков (Cu cong, Cu med), достаточная статистика по которым отсутствует [3].

В случае когда имеется априорная информация об исследуемом объекте, целесообразней применять байесовский подход к оцениванию. Соответствующая ЛСМ характеризуется случайным оцениваемым вектором

$$E\{Y\} = AE\{X\}; \quad B_Y = AB_X A^T + B_\varepsilon, \tag{7}$$

где B_X — ковариационная матрица вектора X.

Оптимальная оценка, минимизирующая риск

$$R = E\{L(x, \hat{x})\}, \tag{8}$$

где

$$L(x, \hat{x}) = (x - \hat{x})^T C (x - \hat{x}) \tag{9}$$

— квадратичная функция потерь (C — симметричная, положительно определенная матрица), имеет вид [5, 12]

$$\hat{x} = x_0 + (B_X^{-1} + A^T B_\varepsilon^{-1} A)^{-1} A^T B_\varepsilon^{-1} (y - Ax_0), \tag{10}$$

где x_0 — среднее значение вектора x. Ковариационная матрица оценки

$$B_{\hat{x}}=(B_x^{-1}+A^T B_\varepsilon^{-1} A)^{-1}. \qquad (11)$$

Этот метод можно использовать для зондирования слоистых облаков, для которых имеется достаточная статистика об их параметрах [3].

4. Выражение для оптической толщины облачной атмосферы

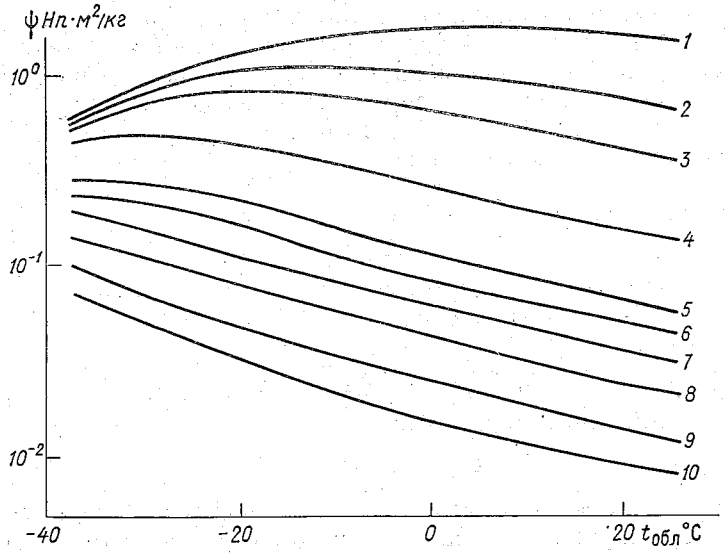


Рис. 1. Зависимость ψ от температуры облаков для разных длин волн.

Кривая	1	2	3	4	6	6	7	8	9	10
λ см	0,22	0,37	0,52	0,85	1,32	1,55	1,8	2,2	2,7	3,5

в радиодиапазоне ($\lambda = 0{,}2 \div 3$ см) имеет вид [1, 14]

$$\tau(\lambda) \approx a(\lambda)\, Q + \psi(\lambda,\ T_{э.\,обл})\, W + \tau_к(\lambda), \qquad (12)$$

где Q и W — интегральное содержание H_2O и водозапас облаков; a и ψ — эффективные значения удельных коэффициентов поглощения H_2O и жидкокапельной влаги облаков; $\tau_к$ — оптическая толщина O_2; λ — длина волны; $T_{э.\,обл}$ — эффективная температура облаков.

Поглощение в облаках существенно зависит от их температуры $T_{э.\,обл}$. На рис. 1 показаны зависимости ψ от температуры облаков для нескольких длин волн, построенные по формулам из [14]. При расчетах принималось, что рассеянием на капельках воды облаков в радиодиапазоне можно пренебречь [1].

Незнание $T_{э.\,обл}$ может привести, особенно для мощных облаков (см. ниже), к большим ошибкам в определении Q и W. В работе [8] показаны принципиальные возможности оценки $T_{э.\,обл}$ по ра-

диотеплолокационным измерениям. Следовательно, можно сформулировать два типа задач: двухпараметрическую (определение Q и W) и трехпараметрическую (определение Q, W и $T_{э.\ обл}$). С этой точки зрения уравнение (12) нелинейно относительно $T_{э.\ обл}$. Для его линеаризации воспользуемся разложением в ряд Тэйлора в окрестности средних климатических (для слоистых облаков) или наиболее вероятных (для Cu) значений $T_{э.\ обл}$, Q и W и ограничимся линейными членами разложения:

$$\Delta\tau(\lambda) = a_0(\lambda)\,\Delta Q + \psi(\lambda,\ T_{э.\ обл.\ 0})\,\Delta W + W_0 \frac{\partial\psi(\lambda,\ T)}{\partial T}\bigg|_{T_{э.\ обл.0}} \Delta T_{э.\ обл} + \Delta\tau_к + \varepsilon_{л.\ \tau}. \qquad (13)$$

В этом выражении знак Δ обозначает отклонение величины от среднего значения, $\varepsilon_{л.\ \tau}$ — ошибка линеаризации. С точностью до второго порядка малости эта ошибка равна

$$\varepsilon_{л.\ \tau} \approx \frac{\partial^2\tau}{\partial T^2_{э.\ обл}}\bigg|_0 \frac{(\Delta T_{э.\ обл})^2}{2}, \qquad (14)$$

или

$$\varepsilon_{л.\ \tau} \approx W_0 \frac{\partial^2\psi}{\partial T^2_{э.\ обл}}\bigg|_0 \frac{(\Delta T_{э.\ обл})^2}{2}. \qquad (15)$$

Так как $\Delta T_{э.\ обл}$ распределена нормально с нулевым средним, то $(\Delta T_{э.\ обл})^2$ распределена по закону χ^2 [13] со средним $\sigma^2_{T_{э.\ обл}}$, и поэтому среднее значение ошибки линеаризации равно

$$\bar{\varepsilon}_{л.\ \tau} \approx W_0 \frac{\partial^2\psi_0}{\partial T^2_{э.\ обл}} \cdot \frac{\sigma^2_{T_{э.\ обл}}}{2}. \qquad (16)$$

В табл. 2 приведены оценки относительной ошибки $\varepsilon_{л.\ \tau}/\tau_0$ для длин волн λ, равных 0,3, 0,8 и 3 см, для моделей Sc (лето) и Cu cong [3]. Как следует из табл. 2, ошибка линеаризации не превышает 4 % во всем диапазоне длин волн $\lambda = 0{,}2 \div 3$ см. При ее вычислении производная $\partial^2\psi/\partial T^2$ рассчитывалась исходя из аналитических выражений для ψ, приведенных в работе [14]. Для примера

Таблица 2

Относительная ошибка линеаризации выражения для оптической толщины облачной атмосферы

Модель	λ см		
	0,3	0,8	3,0
Sc (лето)	—0,002	0,002	0,002
Cu cong	—0,03	0,01	0,04

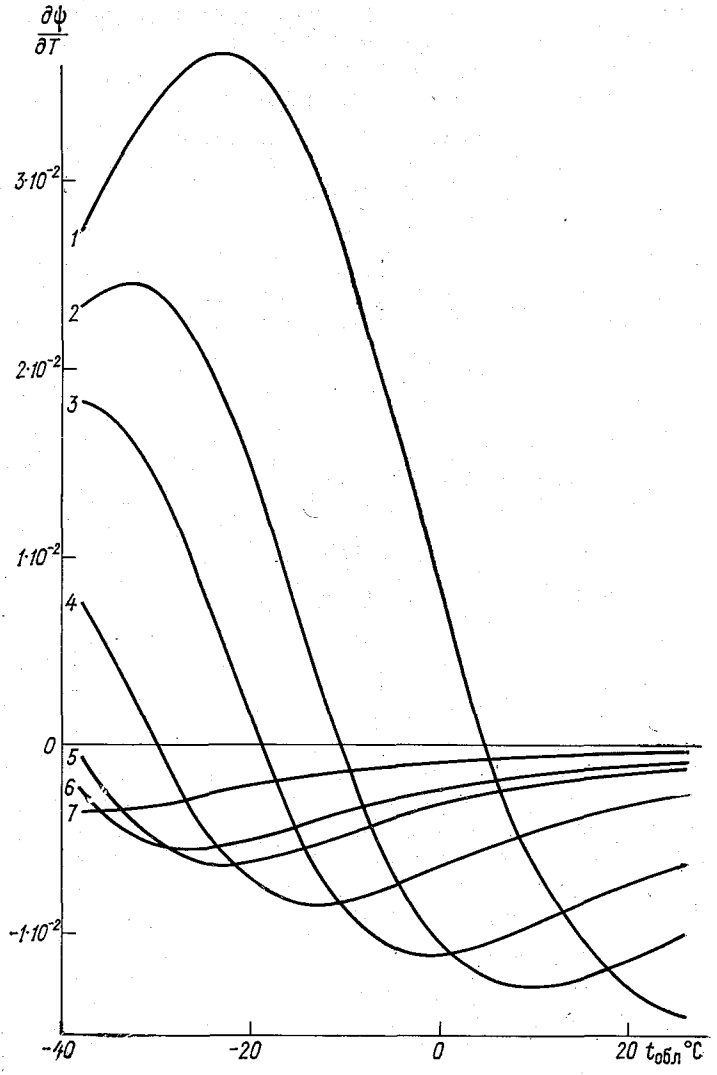


Рис. 2. Зависимость производной $\partial\psi/\partial T$ от температуры облаков для разных длин волн.

Кривая . . .	*1*	*2*	*3*	*4*	*5*	*6*	*7*
λ см	0,22	0,37	0,52	0,85	1,32	1,55	2,7

на рис. 2 приведены графики зависимости первой производной $\partial\psi/\partial T$ от температуры облаков, рассчитанной для нескольких длин волн.

5. Ошибки ε состоят из ошибок измерений оптической толщины $\varepsilon_{и.\,\tau}$, ошибок модели $\varepsilon_{м.\,\tau}$ и ошибок, обусловленных флуктуациями оптической толщины за счет турбулентных пульсаций температуры и влажности атмосферы $\varepsilon_{тур.\,\tau}$ [4]:

$$\varepsilon = \varepsilon_{и.\,\tau} + \varepsilon_{м.\,\tau} + \varepsilon_{тур.\,\tau}. \tag{17}$$

Ошибки определения τ проанализированы ранее. Ошибки модели обусловлены вариациями поглощения в кислороде, а для двухпараметрической задачи еще и вариациями $T_{э.\,обл}$:

$$\varepsilon_{м.\,\tau} = \begin{cases} \Delta\tau_к & \text{— трехпараметрическая задача,} \\ \Delta\tau_к + \varepsilon_{T\tau} & \text{— двухпараметрическая задача.} \end{cases} \tag{18}$$

Ошибка $\varepsilon_{T\tau}$ имеет вид (см. (13)):

$$\varepsilon_{T\tau} = W_0 \frac{\partial\psi}{\partial T}\Big|_{T_{э.\,обл.\,0}} \Delta T_{э.\,обл}. \tag{19}$$

Считая ошибки $\Delta\tau_к$ и $\varepsilon_{T\tau}$ независимыми, можем написать выражение для дисперсии $\varepsilon_{м.\,\tau}$:

$$\sigma^2_{м.\,\tau} \approx \begin{cases} \sigma^2_{\tau_к} & \text{— трехпараметрическая задача,} \\ \sigma^2_{\tau_к} + W_0^2 \left[\frac{\partial\psi}{\partial T}\right]_0^2 \sigma^2_{T_{э.\,обл}} & \text{— двухпараметрическая задача.} \end{cases} \tag{20}$$

Расчеты $\varepsilon_{тур.\,\tau}$, выполненные по методике, изложенной в [4], показали, что величина ее СКО имеет тот же порядок, что и СКО ошибки модели для Sc и пренебрежимо мала по сравнению с $\sigma_{м.\,\tau}$ для Cu cong, поэтому в последнем случае ее можно не учитывать.

С помощью формулы (20) можно оценить влияние ошибки, связанной с неизвестным значением $T_{э.\,обл}$, при решении двухпараметрической задачи. В табл. 3 представлены величины отноше-

Таблица 3

Отношение дисперсии ошибки, обусловленной неизвестными значениями $T_{э.\,обл}$, к дисперсии оптической толщины

Модель	λ см				
	0,2	0,3	0,8	1,35	3,0
Sc (лето)	$4\cdot10^{-5}$	$2{,}8\cdot10^{-3}$	0,03	10^{-3}	0,06
Cu cong	0,06	$2\cdot10^{-5}$	0,19	0,25	0,27

ния дисперсии этой ошибки к дисперсии оптической толщины, полученной при расчетах статистических характеристик радиотеплового

излучения [3], для Sc (лето) и Cu cong $(\sigma^2_{T\tau}/\sigma^2_\tau)$[1]. При этом в качестве оценки дисперсии τ для Cu cong приняты величины, полученные с помощью расчетов по формуле (13) для наиболее вероятных значений параметров Cu cong [3]. Как следует из табл. 3, ошибка $\varepsilon_{T\tau}$ мала для Sc и достаточно велика для Cu cong. Отсюда можно сделать вывод, что при зондировании слоистых облаков незнание $T_{\text{э. обл}}$ не приводит к существенным ошибкам в определении Q и W, а для Cu cong эти ошибки могут быть существенными.

Использование выражения (13) для линейной модели позволяет сделать весьма важные качественные оценки возможностей определения Q, W и $T_{\text{э. обл}}$ по поглощению для различных моделей облачной атмосферы. Считая вклады вариаций Q, W и $T_{\text{э. обл}}$ в поглощение независимыми, можно записать выражение для дисперсии τ в виде

$$\sigma^2_\tau \approx \sigma^2_{\tau Q} + \sigma^2_{\tau W} + \sigma^2_{\tau T} + \tilde{\sigma}^2_\varepsilon, \tag{21}$$

или

$$\sigma^2_\tau \approx a_0^2\sigma^2_Q + \psi_0^2\sigma^2_W + W_0^2\left(\frac{\partial\psi_0}{\partial T}\right)^2 \sigma^2_{T_{\text{э. обл}}} + \tilde{\sigma}^2_\varepsilon, \tag{22}$$

где $\sigma_{\tau Q}$, $\sigma_{\tau W}$, $\sigma_{\tau T}$ — СКО вариаций τ, обусловленных вариациями Q, W и $T_{\text{э. обл}}$; $\tilde{\sigma}^2_\varepsilon$ — дисперсия ошибок без учета вклада вариаций $T_{\text{э. обл}}$. Для двухпараметрической задачи величину $\sigma^2_{\tau Q} + \sigma^2_{\tau W}$ можно рассматривать как сигнал, а $\sigma^2_{\tau T} + \tilde{\sigma}^2_\varepsilon$ как шум. Аналогичные величины для трехпараметрической задачи: $\sigma^2_{\tau Q} + \sigma^2_{\tau W} + \sigma^2_{\tau T}$ — сигнал, $\tilde{\sigma}^2_\varepsilon$ — шум. Очевидно, что для трехпараметрической задачи отношение сигнал/шум больше, чем для двухпараметрической.

На рис. 3 представлены спектральные зависимости отношения сигнал/шум (F), а также величин $F_Q = \sigma^2_{\tau Q}/\tilde{\sigma}^2_\varepsilon$, $F_W = \sigma^2_{\tau W}/\tilde{\sigma}^2_\varepsilon$ и $F_\tau = \sigma^2_{\tau T}/\tilde{\sigma}^2_\varepsilon$ для трехпараметрической задачи для Sc (лето) (рис. 3 *а*, *б*) и Cu cong (рис. 3 *в*, *г*). Для Sc (лето) при $K = 0$ $F \gg 1$ практически во всем диапазоне спектра, кроме линий поглощения O_2. Частные отношения F_Q, F_W также много больше единицы в этих же спектральных интервалах. Значение $F_T > 1$ лишь в диапазонах $\lambda \approx 0{,}9$ см и $\lambda \approx 2$ см. Максимумы этих отношений находятся на $\lambda \approx 1{,}35$ см (Q), $\lambda \approx 0{,}32$ см (W) и $\lambda \approx 0{,}9$ см ($T_{\text{э. обл}}$), которые и можно рассматривать в качестве возможных оптимальных длин волн для решения двух- и трехпараметрических задач.

---

[1] Все использованные в данной работе для различных оценок статистические характеристики радиотеплового излучения облачной атмосферы взяты из [3].

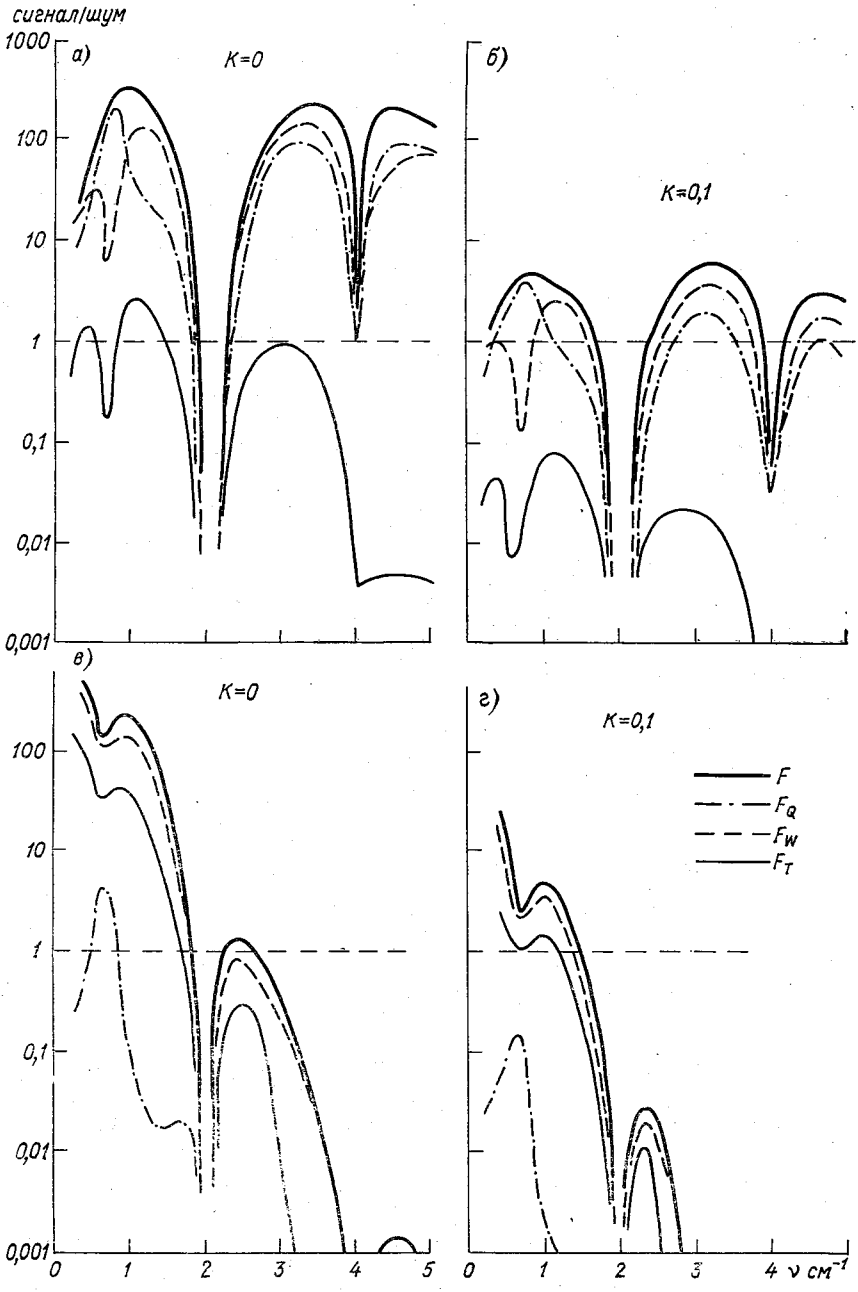


Рис. 3. Спектральная зависимость отношений сигнал/шум в трехпараметрической задаче для Sc (лето) (*а*, *б*) и для Cu cong (*в*, *г*) при разных *K*.

Для $K=0{,}1$ значение $F_T \ll 1$ во всем диапазоне и решение трехпараметрической задачи затрудняется.

Для Cu cong при $K=0$ для решения рассматриваемых задач пригоден участок спектра $\lambda \geqslant 0{,}8$ см, однако выявляется существенный момент, связанный с тем, что $F_Q \ll 1$ во всем диапазоне, кроме $\lambda \approx 1{,}35$ см. Выделить длины волн для определения W и $T_{\text{э. обл}}$ из приведенных графиков невозможно, так как не существует в рассматриваемом диапазоне спектра разнесенных максимумов F_W и F_T, что может привести к плохой обусловленности матриц оценивания $(A^T B_\varepsilon^{-1} A)^{-1}$ и $(B_X^{-1} + A^T B_\varepsilon^{-1} A)^{-1}$. Для того чтобы этого избежать, необходимо привлекать длины волн $\lambda > 3$ см. При невозможности решения трехпараметрической задачи осложняется и решение двухпараметрической, так как в этом случае шум возрастает и F_Q будет меньше единицы во всем спектральном диапазоне. В этом случае неучтенные вариации $T_{\text{э. обл}}$ будут превышать вариации поглощения в H_2O.

Наконец, при $K=0{,}1$ определение Q вообще невозможно, так как $F_Q \ll 1$ во всем спектральном диапазоне. В этом случае (при больших ошибках измерения $T_{\text{я}}$) в данном диапазоне спектра ($\lambda \approx 0{,}8 \div 3$ см) возможно лишь решение однопараметрической задачи определения W или при переходе к $\lambda > 3$ см — решение двухпараметрической задачи определения $T_{\text{э. обл}}$ и W.

6. Выбор оптимальных комбинаций длин волн для решения двух- и трехпараметрических задач производился по максимизации величины

$$I = \begin{cases} 1 - \dfrac{1}{2}\left[\dfrac{\sigma^2_{\hat{Q}}}{\sigma^2_Q} + \dfrac{\sigma^2_{\hat{W}}}{\sigma^2_W}\right] \text{ — двухпараметрическая задача,} \\[2ex] 1 - \dfrac{1}{3}\left[\dfrac{\sigma^2_{\hat{Q}}}{\sigma^2_Q} + \dfrac{\sigma^2_{\hat{W}}}{\sigma^2_W} + \dfrac{\sigma^2_{\hat{T}_{\text{э. обл}}}}{\sigma^2_{T_{\text{э. обл}}}}\right] \text{ — трехпараметрическая задача,} \end{cases} \tag{23}$$

где $\sigma_{\hat{Q}}, \sigma_{\hat{W}}$ и $\sigma_{\hat{T}_{\text{э. обл}}}$ — апостериорные неопределенности параметров Q, W и $T_{\text{э. обл}}$, а σ_Q, σ_W и $\sigma_{T_{\text{э. обл}}}$ — априорные неопределенности. При отношении апостериорной дисперсии к априорной, равном нулю, радиотеплолокационные измерения дают всю информацию об оцениваемых параметрах, а при отношении, равном единице, измерения не дают дополнительной информации к имеющейся априорной.

Рассмотренная процедура аналогична процедуре минимизации следа ковариационных матриц оценок (6) и (11).

В табл. 4 представлены полученные оптимальные комбинации длин волн для решения рассматриваемых задач, а также характеристики точности использованных методов. Точность характеризуется двумя параметрами: 1) относительной ошибкой оценки,

Таблица 4

Оптимальные длины волн и ошибки определения Q, W и $T_{э.\ обл}$ при решении 2- и 3-параметрических задач для Sc (лето)

Задача	Оптимальная комбинация λ, см	K	$T_{э.\ обл}$	${}^{\sigma}\hat{Q}/Q_0$	${}^{\sigma}\hat{W}/W_0$	${}^{\sigma}\hat{Q}/{}^{\sigma}Q$	${}^{\delta}\hat{W}/{}^{\delta}W$	${}^{\sigma}\hat{T}_{э.\ обл}/{}^{\sigma}T_{э.\ обл}$
2-параметрическая	$\lambda_1=1{,}37$ $\lambda_2=0{,}32$	0	Известно	0,02	0,07	0,08	0,11	—
	$\lambda_1=1{,}37$ $\lambda_2=0{,}3$	0	Неизвестно	0,02	0,09	0,08	0,14	—
	$\lambda_1=1{,}37$ $\lambda_2=0{,}85$	0,1	Известно	0,12	0,35	0,44	0,57	—
	$\lambda_1=1{,}37$ $\lambda_2=0{,}85$	0,1	Неизвестно	0,13	0,36	0,45	0,59	—
3-параметрическая	$\lambda_1=1{,}25$ $\lambda_2=0{,}22$ $\lambda_3=0{,}95$	0	—	0,03	0,09	0,09	0,15	0,67
	$\lambda_1=1{,}37$ $\lambda_2=0{,}3$ $\lambda_3=0{,}85$	0,1	—	0,12	0,30	0,44	0,48	0,99

равной отношению СКО оценки к среднему значению оцениваемого параметра (эти значения представлены в работе [3]) и 2) отношением СКО оценки к СКО оцениваемого параметра. Значения указанных величин приведены лишь для модели Sc (лето).

На основании анализа полученных результатов можно сделать следующие основные выводы:

1. Решение 2-параметрической задачи для слоистообразных облаков возможно. Оптимальной комбинацией длин волн для Sc (лето) является: $\lambda_1=1{,}37$ см и $\lambda_2=0{,}3$—$0{,}32$ см.

2. Решение 3-параметрической задачи для слоистообразных облаков также возможно. Однако эффективность оценки $T_{э.\,обл}$ невысокая. Оптимальными комбинациями длин волн для Sc (лето) являются: $\lambda_1=1{,}25$ см, $\lambda_2=0{,}22$ см и $\lambda_3=0{,}95$ см для $K=0$ и $\lambda_1=1{,}37$ см, $\lambda_2=0{,}3$ см и $\lambda_3=0{,}85$ см для $K=0{,}1$. При этом точность оценок Q и W при решении 3-параметрической задачи практически не повышается по сравнению с решением 2-параметрической.

3. Решение 2- и 3-параметрических задач для Cu cong невозможно. Возможно решение лишь однопараметрической задачи определения водозапаса (по радиояркостному контрасту [6, 15]). Оценивать Q можно по измерениям $T_я$ для безоблачных участков неба, имеющихся между облаками, на $\lambda=1{,}35$ [9].

В заключение следует отметить, что рассмотренные методы являются менее точными, чем при определении τ по поглощению солнечного излучения. При использовании последнего метода в исследовательских целях можно получить значительно более высокую точность оценок Q и W. В работе рассмотрено зондирование только в зените. Оценка точности методов при измерении на различных углах требует отдельного рассмотрения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аквилонова Л. Б., Кутуза Б. Г. Радиотепловое излучение облаков.— Радиотехника и электроника, 1978, т. XXIII, вып. 9, с. 1792—1806.

2. Башаринов А. Е., Гурвич А. С., Егоров С. Т. Радиоизлучение Земли как планеты.— М.: Наука, 1974.— 188 с.

3. Бобылев Л. П., Тарабукин И. А., Щукин Г. Г. Характеристики радиотеплового излучения и поглощения облачной атмосферы.— См. наст. сб.

4. Бобылев Л. П., Изюмов А. О., Щукин Г. Г. Флуктуации оптической толщины и радиояркостной температуры атмосферы в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах волн.— Труды ГГО, 1977, вып. 395, с. 47—58.

5. де Гроот М. Оптимальные статистические решения.— М.: Мир, 1974.— 496 с.

6. Исследование водозапаса облаков 3-сантиметровым радиометром/ Бобылев Л. П., Васищева М. А., Новоселов А. И. и др.— Труды ГГО, 1975, вып. 328, с. 50—55.

7. Исследование влагосодержания атмосферы методом наземной радиотеплофикации/Гурвич А. С., Ершов А. Г., Наумов А. П.— Метеорология и гидрология, 1972, № 5, с. 22—27.

8. Митник Л. М. Определение эффективной температуры жидкокапельных облачных образований по тепловому излучению атмосферы в СВЧ диапазоне.— Труды Гидрометцентра СССР, 1974, вып. 148, с. 115—125.

9. Наумов А. П. О методике определения влагосодержания атмосферы при измерениях поглощения радиоволн вблизи $\lambda = 1{,}35$ см.— ИАН СССР. Физика атмосферы и океана, 1968, т. IV, № 2, с. 170—181.

10. Рабинович Ю. И., Щукин Г. Г. Определение содержания водяного пара в атмосфере по измерению микроволнового излучения.— Труды ГГО, 1968, вып. 222.

11. Радиотепловые измерения влажности и интегральной водности облаков/Горелик А. Г., Калашников В. В., Райкова Л. С. и др.— ИАН СССР. Физика атмосферы и океана, 1973, т. 9, № 9, с. 928—936.

12. Рао С. Р. Линейные статистические методы и их применение.— М.: Наука, 1968.

13. Худсон Д. Статистика для физиков.— М.: Мир, 1967.— 242 с.

14. Щукин Г. Г., Бобылев Л. П. К вопросу определения влагосодержания облачной атмосферы по радиотепловому излучению.— В кн.: Труды Всесоюзного симпозиума по радиофизическим исследованиям атмосферы.— Л.: Гидрометеоиздат, 1977, с. 170—181.

15. Decker M. T., Dutton E. J. Radiometric observations of liquid water in thunderstorm cell.— J. Atm. Sci., vol. 27, N 5, 1970, p. 785—790.

16. Deutsch R. Estimation theory.— N. Y.: Prentice Hall, Inc., 1965.— 270 p.

СОДЕРЖАНИЕ

В. Н. Стасенко, С. М. Гальперин, В. Н. Егоров, А. Ф. Гончар. Совместное обнаружение молний с помощью РЛС метрового и дециметрового диапазонов радиоволн 3

В. А. Алексеев, С. М. Гальперин, В. Н. Стасенко, А. М. Тряхов. Измерение высот облаков с помощью радиовысотомера ПРВ-10 6

Г. Б. Брылев, А. В. Рыжков. Ошибки определения границ облаков радиолокационным методом 11

Л. П. Бобылев, И. А. Тарабукин, Г. Г. Щукин. Характеристики радиотеплового излучения и поглощения облачной атмосферы 19

А. О. Изюмов, Л. П. Бобылев, Г. Г. Щукин. Флуктуации уровня сигнала миллиметрового и субмиллиметрового диапазона волн при распространении в турбулентной поглощающей атмосфере 36

Н. Д. Попова, Г. Г. Щукин. О возможности определения интенсивности осадков методом пассивно-активной радиолокации 50

Г. Б. Брылев, Б. М. Воробьев, С. С. Грачев. Расчет характеристик конвективных облаков по данным стандартной аэрологической информации и их сравнение с результатами радиолокационных наблюдений 55

В. К. Завируха, В. Д. Степаненко. Методика и результаты наблюдений точечных радиоэхо с помощью аэродромной РЛС 64

Т. В. Иванова, В. Д. Степаненко. Анализ изменчивости радиолокационных характеристик при трансформации облачного поля . . . 68

А. С. Солонин. К вопросу применения теории распознавания образов для анализа радиолокационной метеорологической информации . . . 73

Г. Б. Брылев, А. В. Завдовьев, А. Г. Линев. Принцип использования совокупности алгоритмов при автоматизации распознавания радиоэхо гроз и осадков 80

Г. Б. Брылев, Д. М. Сонечкин, В. В. Шведов. Влияние обучающей выборки на распознавание радиоэха гроз и ливней 86

Г. Б. Брылев, А. В. Завдовьев, Г. Л. Низдойминога. Определение параметров движения радиоэха облаков и осадков на основе корреляционного анализа 93

О. Н. Руссис, В. Д. Степаненко. Некоторые особенности радиолокационного обнаружения дождей в районе Кубы 101

К. С. Жупахин, Т. В. Иванова, Н. Ф. Котов. Некоторые результаты исследования структуры очагов радиоэха от кучево-дождевых облаков и динамики их развития 105

Г. Б. Брылев, Е. П. Сергиенко, В. И. Ширяева. Радиолокационные характеристики гроз в районе Киева 110

А. М. Гудыма, А. В. Завдовьев, А. Г. Линев. Применение промышленных ЭВМ для обработки информации в реальном масштабе времени при решении задач штормоповещения 118

С. М. Гальперин, В. Н. Стасенко, Н. И. Крохин, В. Д. Плотников. Использование радиолокационных станций при проверке точностных характеристик грозоиеленгаторов-дальномеров . . . 124

Б. Н. Литвак, Ю. А. Мельник, В. А. Петрушевский, Л. А. Серебров, Ю. С. Филаретов, Г. Ф. Шевела, В. Л. Шмулевич. Перспективы развития средств отображения для наземных метеорологических радиолокаторов 127

В. К. Михайлов, Л. А. Серебров, В. Л. Шмулевич. Информационная емкость экрана индикатора метеорологического радиолокатора 137

Б. Н. Литвак, В. К. Михайлов, Э. А. Новичев, В. А. Петрушевский, Л. А. Серебров, А. А. Федоров, Ю. С. Филаретов, Г. Ф. Шевела, В. Л. Шмулевич. Аппаратура отображения обобщенной метеорологической информации на цветном и черно-белом телевизионных экранах 142

Л. П. Бобылев, Г. Г. Щукин. Об использовании методов оптимальных статистических решений в задаче радиотеплолокационного определения влагосодержания облачной атмосферы 149

Труды ГГО, вып. 430

МЕТОДЫ АКТИВНОЙ И ПАССИВНОЙ РАДИОЛОКАЦИИ В МЕТЕОРОЛОГИИ

Редактор Л. И. Штанникова. Техн. редактор Г. В. Ивкова. Корректор И. А. Крайнева. Сдано в набор 13.06.79. Подписано в печать 10.12.79. М-13290. Формат 60×90 1/16. Бум. тип. № 1. Лит. гарн. Печать высокая. Печ. л. 11. Уч.-изд. л. 11,09. Тираж 750 экз. Индекс МЛ-251. Заказ № 396. Цена 80 коп. Гидрометеоиздат, 199053, Ленинград, 2-я линия, 23.

Ленинградская типография № 8 ЛПО «Техническая книга» Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли. 190000, Ленинград, Прачечный пер., 6.