

УДК 621.391

И.К. ВАСИЛЬЕВА, А.В. ПОПОВ*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского "ХАИ", Украина***ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВНЕШНИХ И СТРУКТУРНЫХ ФАКТОРОВ
НА ПОЛЯРИЗАЦИОННЫЕ ПРИЗНАКИ ОБЛАКОВ**

Приведены результаты исследования зависимости поляризационных параметров облаков от их водности, длины волны излучения, температуры среды, среднего угла наклона и степени упорядоченности частиц. Полученные результаты создают предпосылки для дальнейшего анализа информативности поляризационных признаков для радиолокационного обнаружения и распознавания гидрометеорологических образований, представляющих угрозу для безопасности полетов.

облака, структурные факторы, поляризационные параметры, математическая модель**Введение**

Одной из проблем при решении задач оперативного обнаружения и распознавания классов гидрометеорологических образований (ГМО), представляющих угрозу для безопасности полетов по данным дистанционного зондирования (ДЗ) является статистический характер поляризационных признаков (ПП), обусловленный пространственно-временной неоднородностью физической структуры ГМО. При интерпретации радиолокационных данных необходим анализ статистических свойств поляризационной матрицы рассеяния (ПМР) и выявление зависимостей ПП отраженных сигналов от структурных параметров ГМО и аэрологических воздействий. Отсутствие в полном объеме данных ДЗ для специфических типов ГМО, погрешности измерения и количественной оценки параметров ГМО, неточности калибровки РЛС обуславливают необходимость моделирования процессов отражения ЭМВ с учетом распределения частиц по размерам, концентрациям, формам, углам наклона, эффективной диэлектрической проницаемости, длины волны излучения, температуры окружающей среды. Для этих целей была разработана программа моделирования, позволяющая рассчитывать в приближении Рэлея элементы ПМР \dot{S} [1] для полидисперсных, хаотически ориентированных сфероидальных частиц и формировать на их основе ПП.

Моделирование проводилось для 10 классов облаков: St – слоистых, Sc – слоисто-кучевых, Cu – кучевых, Ns-As-d, Ns-As-n, Ns-As-p – слоисто-дождевых и высоко-слоистых (содержащих капли, игольчатые и пластинчатые кристаллы соответственно), Cb – кучево-дождевых, Cb-s – грозových, Ci-n и Ci-p – перистых. Варьируемыми параметрами являлись водность облака, математическое ожидание (МО) и среднеквадратическое отклонение (СКО) угла наклона частиц β , длина ЭМВ λ , температура среды t . По результатам моделирования определялось среднее выборочное значение ПП и строилась его зависимость от входного параметра модели. Выполнялась аппроксимация гистограмм ПП Sb-распределением Джонсона [2] и находились вторичные оценки МО и СКО ПП. На основании анализа полученных данных делалось заключение о степени влияния фактора на ПП.

1. Поляриметрические признаки ГМО

Исследование зависимостей проводилось для 67 ПП, среди которых можно выделить следующие:

– абсолютные амплитудные:

1) HH , HV , VV – модули \dot{S}_{ij} в ортогонально-линейном (h, v) поляризационном базисе, дБ [1]:

$$\dot{S} = \begin{bmatrix} S_{hh} \exp(j\varphi_{hh}) & S_{hv} \exp(j\varphi_{hv}) \\ S_{vh} \exp(j\varphi_{vh}) & S_{vv} \exp(j\varphi_{vv}) \end{bmatrix}; \quad (1)$$

– относительные амплитудные:

1) CDH, CDV – коэффициенты деполяризации при Н и V-зондировании, дБ [3];

2) CAS – коэффициент асимметрии, дБ [3];

3) CAN – коэффициент анизотропии [3];

– абсолютные мощностные:

1) $|R_{ij}|$ – модули элементов ковариационной матрицы рассеяния (КМР), дБ [4];

2) EV_1, EV_2 – модули собственных чисел ПМР Λ_1 и Λ_2 , дБ [3];

3) SFC – коэффициент параметра формы [1];

4) Y_1 – параметр средней мощности, дБ:

$$Y_1 = 0,25 \cdot (R_{11} + R_{33} + \dot{R}_{13} + \dot{R}_{31}); \quad (2)$$

5) Y_2 – параметр дисперсии мощности, дБ:

$$Y_2 = 0,25 \cdot (R_{11} + R_{33} - \dot{R}_{13} - \dot{R}_{31}) + R_{22}; \quad (3)$$

6) $|Y_3|$ – модуль \dot{Y}_3 , дБ:

$$\text{Re } \dot{Y}_3 = (R_{33} - R_{11}) / [4 \cos 2\langle\beta\rangle \exp(-2\langle D_\beta \rangle)];$$

$$\text{Im } \dot{Y}_3 = \text{Im } \dot{R}_{31} / [2 \cos 2\langle\beta\rangle \exp(-2\langle D_\beta \rangle)], \quad (4)$$

где $\langle \bullet \rangle$ – усреднение по ансамблю; $\langle \bar{\beta} \rangle$ – оценка среднего угла наклона частиц:

$$\langle \bar{\beta} \rangle = 0,5 \arctg [2 \text{Re}(\dot{R}_{21} + \dot{R}_{32}) / (R_{33} - R_{11})]; \quad (5)$$

$\langle D_\beta \rangle$ – оценка дисперсии угла наклона частиц:

$$\langle D_\beta \rangle = -\frac{1}{8} \ln \frac{R_{11} + R_{33} - R_{13} - R_{31} - 4R_{22}}{(R_{11} + R_{33} - R_{13} - R_{31} + 4R_{22}) \cos 4\langle\beta\rangle}; \quad (6)$$

7) $Z_{h,v}$ – параметры отражаемости, дБЗ [5];

8) Z_{dp} – разностная отражаемость, дБЗ [5];

9) H_{dr} – дифференциальная отражаемость градового сигнала, дБ [4, 5];

– относительные мощностные, например:

1) TAN – параметр истинной анизотропии [3];

2) AN – параметр асимметричности, дБ:

$$AN = 10 \lg \left[\frac{(|\dot{S}_{hh}| - |\dot{S}_{vv}| + 2|\dot{S}_{hv}|) |\dot{S}_{hh}|}{(|\dot{S}_{hh}| + |\dot{S}_{vv}|) |\dot{S}_{vv}|} \right]; \quad (7)$$

3) HGM – модуль параметра γ , град [6];

4) EP_1, EP_2 – модули фазовых собственной поляризации, дБ [1, 3];

5) I_1 – отношение параметров Y_2 и Y_1 , дБ [4];

6) $|I_2|$ – модуль отношения \dot{Y}_3 и Y_1 , дБ [4];

7) DDT – отношение детерминанта и следа ПМР, дБ [1];

8) $\langle \sigma_\beta \rangle$ – оценка СКО угла наклона, град:

$$\langle \sigma_\beta \rangle = \sqrt{\langle D_\beta \rangle}; \quad (8)$$

9) Z_{dr} – дифференциальная отражаемость [5];

10) $LDR_{h,v}$ – линейные деполяризационные отношения, дБ [5];

– фазовые, в том числе:

1) аргументы \dot{S}_{ij} и R_{ij} , рад;

2) разности фаз [1]:

$$FH = 180(\varphi_{hh} - \varphi_{hv}) / \pi; \quad FV = 180(\varphi_{vh} - \varphi_{vv}) / \pi; \quad (9)$$

3) EF_1, EF_2 – аргументы Λ_1 и Λ_2 , рад [1];

4) EFS – сумма EF_1 и EF_2 , град [1];

5) EFD – разность EF_1 и EF_2 , град [1];

6) HGF – аргумент параметра γ , град [6];

7) DTA – аргумент детерминанта ПМР, град;

8) DPS – дифференциальный фазовый сдвиг, град [5];

– поляризации эллипса, или угловые ПП:

1) ELH, ELV, ORH, ORV – углы эллиптичности и ориентации отраженных сигналов при Н- и V-поляризации зондирования [1, 3];

2) ZE_1, ZE_2, ZO_1, ZO_2 – углы эллиптичности и ориентации нулевого сигнала [1, 3];

3) EE_1, EE_2, EO_1, EO_2 – углы эллиптичности и ориентации собственной поляризации [1, 3].

Выражение (5) было получено на основании зависимостей элементов КМР от угла наклона:

$$\langle \sin 2\beta \rangle = \frac{\text{Re}(\dot{R}_{21} + \dot{R}_{32})}{4 \text{Re } \dot{Y}_3}; \quad \langle \cos 2\beta \rangle = \frac{\dot{R}_{33} + \dot{R}_{11}}{4 \text{Re } \dot{Y}_3}. \quad (10)$$

Использование функции $\arctg(2\beta)$ налагает условие $\beta \in [-\pi/2, \pi/2]$, которое, в общем случае, не соблюдается. Возвращаемое значение функции определяется знаками числителя и знаменателя (5), при этом информация о знаках отсутствует, так как не известно значение $4 \text{Re } \dot{Y}_3$ в (2). Поэтому при ин-

терпретации SFC нужно иметь в виду следующее. Во-первых, может иметь место неправильное восстановление $\bar{\beta}$ (смещение оценки МО на -90°), обусловленное как выходом случайных значений β за пределы $[-\pi/2, \pi/2]$, так и неопределенностью знаков числителя и знаменателя дроби (5). Во-вторых, искажается вид закона распределения углов наклона, при этом возможно как достаточно точное восстановление $\bar{\beta}$ (если происходит симметричное отражение участков функции распределения относительно МО β), так и существенное смещение оценки $\bar{\beta}$, что особенно наглядно проявляется для игольчатых кристаллов (рис. 1). При этом нормальный закон распределения β с параметром $\bar{\beta} = 90^\circ$ вырождается в закон арксинуса с МО $\langle \bar{\beta} \rangle \approx 0^\circ$.

Ошибочное восстановление $\bar{\beta}$ приводит к искажению оценки СКО углов наклона (6, 8); тем не менее, по величине $\langle \sigma_\beta \rangle$ можно сделать качественный вывод о степени упорядоченности частиц ГМО. Так, известно, что при наличии мощного электрического поля, характерного для грозовых облаков, частицы имеют тенденцию ориентироваться вдоль силовых линий, т.е. их упорядоченность возрастает. С другой стороны, β определяется рядом аэрологических параметров (направление и скорость потоков воздуха, атмосферное давление, влажность), не учитываемых моделью, поэтому идентификация класса ГМО по $\langle \bar{\beta} \rangle$ может быть ошибочной.

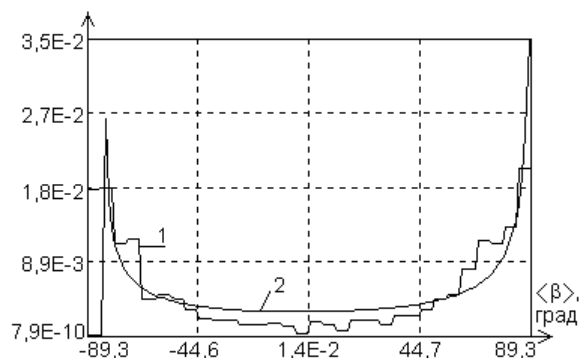


Рис. 1. Гистограмма (1) и плотность распределения оценки среднего угла наклона для Ns-As-n

Зависимость ПП от длины волны

Величины абсолютных амплитудных и мощностных ПП (за исключением параметров отражаемости и SFC) обратно пропорциональны λ^2 и λ^4 , соответственно (рис. 2). Отклонения от средних значений $Z_{h,v}$, Z_{dp} максимальны для капельных облаков (± 1 дБЗ) и минимальны для кристаллических ($\pm 0,1$ дБЗ), что объясняется изменением диэлектрической проницаемости воды в зависимости от длины ЭМВ. SFC с увеличением λ возрастает на 29 ... 30 дБ. Относительные ПП практически не зависят от λ ; небольшие отклонения от среднего (до 0,5 дБ) наблюдаются для капельных облаков.

Колебания фазовых ПП относительно среднего значения носят скачкообразный характер, при этом диапазон изменения МО обычно не превышает нескольких градусов, т.е., можно считать данные параметры не зависящими от λ . При этом средние значения большинства фазовых ПП близки к 0 рад.

Зависимости угловых ПП от λ также не наблюдается. МО ELH , ELV и ORH близки к 0° , МО ORV – около 90° . ZE_1 и ZE_2 противоположны по знаку; для капельных негрозовых облаков и Ci-n, Ns-As-n $ZE_1 \approx 25 \dots 28^\circ$, для остальных классов $ZE_1 \approx 17 \dots 19^\circ$. МО ZO_1 и $ZO_2 \approx 45^\circ$. МО EO_1 для капельных негрозовых облаков принимает значения около 60° , а для остальных – в диапазоне $20 \dots 25^\circ$. МО EO_2 максимально для Cb-s ($\approx 10^\circ$) и минимально для Cb и Ci-n, Ns-As-n ($-59 \dots -58^\circ$).

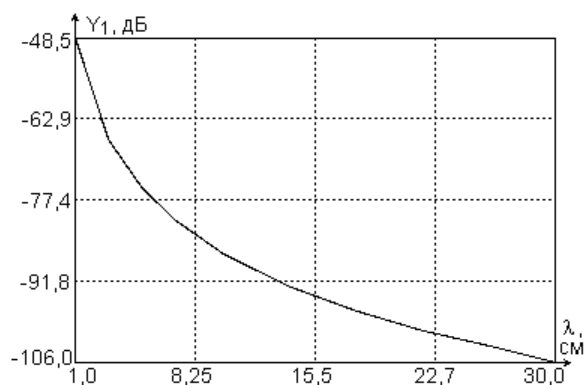


Рис. 2. Вид зависимости абсолютных ПП ГМО от длины волны

Анализ полученных результатов показал, что по значениям МО относительных ПП можно выделить три группы ГМО: 1) капельные негрозовые облака, 2) грозовые облака и облака с пластинчатыми кристаллами, 3) облака с игольчатыми кристаллами. В то же время, по значениям МО угловых ПП кучевые облака и облака с игольчатыми кристаллами можно отнести к одному классу ГМО, зато различаются грозовые облака и облака с ледяными пластинками. Делать какие-либо выводы о классе ГМО, основываясь на фазовых ПП затруднительно, так как они принимают близкие значения для всех моделируемых ГМО. Однако это заключение не является окончательным, так как основывается на модельных данных, полученных в предположении равномерного распределения на интервале $[0; 2\pi]$ углов φ для учета фазового сдвига $\exp(-j\varphi)$ сигналов, отраженных от частиц со случайными пространственными координатами и для исследования информативности фазовых ПП необходимо привлечение данных ДЗ.

Зависимость ПП от температуры

Диапазон изменения температуры для капельных облаков был принят $t = 0 \dots 30^\circ\text{C}$, для кристаллических: $-40 \dots -10^\circ\text{C}$. Результаты моделирования показали, что t практически не влияет на МО ПП. Из фазовых ПП самыми чувствительными к t являются FH , FV (отклонения от среднего составляют $\pm 1^\circ$) и EF_1 , EF_2 ($\Delta_{\max} = \pm 2^\circ$) (табл. 1), при этом какой-либо зависимости МО ПП от t не наблюдается.

Влияние МО угла наклона на ПП

Для анализа степени влияния угла β на значения ПП для всех классов облаков, кроме Сi-n, Ns-As-n, был принят диапазон варьирования $\bar{\beta} = 0 \dots 50^\circ$; для игольчатых кристаллов – $40 \dots 90^\circ$.

Из абсолютных ПП наиболее чувствительны к $\bar{\beta}$ R_{22} (для Сb-s $\Delta_{\max} = \pm 5$ дБ), $|R_{12}|$, $|R_{23}|$ ($\Delta_{\max} =$

$\pm 2,7$ дБ), Z_{dp} ($\Delta_{\max} = \pm 2,5$ дБ). Из относительных ПП наиболее сильно реагируют на изменение $\bar{\beta}$ $LDR_{h,v}$ ($\pm 5,5$ дБ), EP_1 и EP_2 ($\Delta_{\max} = \pm 3,4$ дБ и $\pm 3,9$ дБ). При изменении $\bar{\beta}$ МО фазовых ПП FH , FV могут смещаться от 3 до $11 \dots 14^\circ$; максимальный диапазон изменения МО EF_1 и EF_2 составляет 14 и 12° , соответственно. МО DPS лежат в интервале от $-0,3$ (для Сi-n) до $0,2^\circ$ (для Сb-s и Ns-As-p); отклонения от среднего не превышают 1° . Диапазон изменения большинства угловых ПП при варьировании $\bar{\beta}$ составляет несколько градусов.

К ПП, чувствительным к $\bar{\beta}$, относятся $\langle\beta\rangle$, EO_1 и EO_2 (табл. 2, 3). Зависимости МО EO_1 , полученные по оценкам параметров закона распределения Джонсона, представлены на рис. 3 а, б. Зависимость $\langle\beta\rangle$ от $\bar{\beta}$ имеет сложный характер: от почти линейной (либо возрастающей, либо убывающей) до немонотонной (рис.4, а, б).

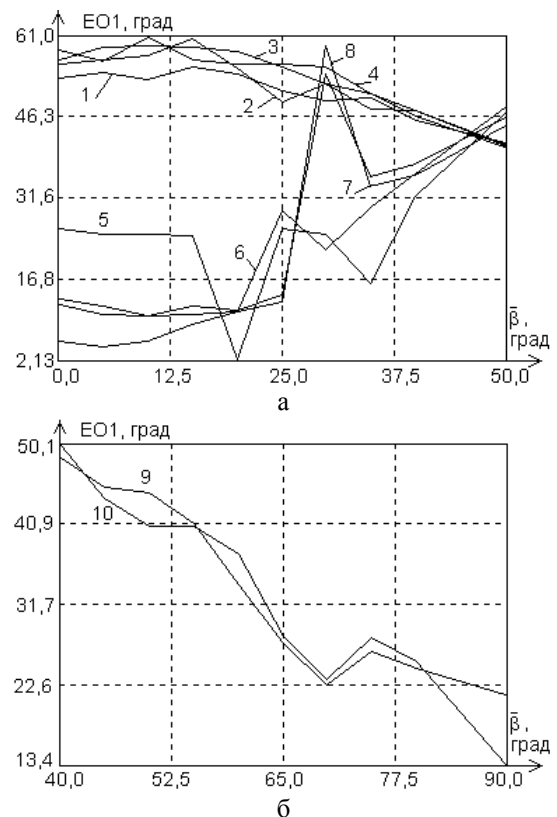


Рис. 3. Вид зависимости $EO_1(\bar{\beta})$ для облаков: 1 – St; 2 – Sc; 3 – Cu; 4 – Ns-As-d; 5 – Cb; 6 – Cb-s; 7 – Ci-p; 8 – Ns-As-p; 9 – Ci-n; 10 – Ns-As-n

Таблица 1

Влияние изменения температуры на средние значения ПП (для капельных облаков: $t = 0 \dots 30^\circ\text{C}$, для кристаллических: $t = -40 \dots -10^\circ\text{C}$)

Параметр	Среднее значение МО параметра и отклонение от среднего для облака класса:									
	St	Sc	Cu	NsAs-d	Cb	Cb-s	Ci-n	NsAs-n	Ci-p	NsAs-p
FH , град	$8,1 \pm 0,85$	$1,83 \pm 0,56$	$2,6 \pm 0,69$	$2,01 \pm 0,49$	$-1,19 \pm 0,37$	$0,97 \pm 0,86$	$2,98 \pm 0,02$	$-7,8 \pm 0,02$	$-0,48 \pm 0,19$	$7,26 \pm 0,01$
FV , град	$7,88 \pm 0,67$	$1,93 \pm 0,61$	$2,32 \pm 0,96$	$2,02 \pm 0,49$	$-1,0 \pm 0,55$	$-2,61 \pm 0,91$	$3,42 \pm 0,02$	$-7,03 \pm 0,02$	$0,18 \pm 0,01$	$4,9 \pm 0,01$
EF_1 , град	184 ± 1	183 ± 1	180 ± 2	$174 \pm 0,5$	183 ± 1	180 ± 1	174	175	180	180
EF_2 , град	187 ± 1	179 ± 1	180 ± 2	177 ± 1	$180,5 \pm 0,5$	$179,5 \pm 0,5$	173	176	179	174
EFS , град	$-4,76 \pm 0,34$	$1,17 \pm 0,3$	$-4,26 \pm 0,38$	$-2,34 \pm 0,24$	$-5,47 \pm 0,01$	$-2,76 \pm 0,67$	$-0,13 \pm 0,02$	$1,09 \pm 0,01$	$5,13 \pm 0,01$	$1,74 \pm 0,01$
DTA , град	$-4,76 \pm 0,35$	$0,81 \pm 0,29$	$-4,26 \pm 0,38$	$-2,34 \pm 0,24$	$-5,47 \pm 0,31$	$-2,63 \pm 0,58$	$-0,13 \pm 0,02$	$1,09 \pm 0,01$	$5,13 \pm 0,01$	$2,79 \pm 0,01$
EFD , град	$-4,38 \pm 0,4$	$2,19 \pm 0,57$	$-0,17 \pm 0,26$	$-4,15 \pm 0,67$	$1,94 \pm 0,46$	$5,75 \pm 0,54$	$0,89 \pm 0,01$	$-0,61 \pm 0,01$	$-7,42 \pm 5 \cdot 10^{-3}$	$1,95 \pm 0,01$
HGF , град	$4,38 \pm 0,39$	$-2,19 \pm 0,58$	$0,17 \pm 0,26$	$4,15 \pm 0,67$	$-1,94 \pm 0,46$	$-5,8 \pm 0,94$	$-0,89 \pm 0,01$	$0,61 \pm 0,01$	$7,07 \pm 5 \cdot 10^{-3}$	$-1,6 \pm 0,01$
EO_1 , град	$56,6 \pm 0,2$	$60,1 \pm 0,2$	$60,6 \pm 0,3$	$60,5 \pm 0,3$	$24,6 \pm 0,1$	$19,9 \pm 0,6$	$24,7$	$24,1 \pm 0,05$	$24,1 \pm 0,2$	$24,7 \pm 0,2$
EO_2 , град	$-31,3 \pm 0,6$	$-27,7 \pm 0,8$	$-28,2 \pm 0,3$	$-27,6 \pm 0,5$	$-58,5 \pm 0,4$	$10,5 \pm 0,5$	$-58,7 \pm 0,05$	$-58,2 \pm 0,1$	$-17,7 \pm 0,2$	$-14,1 \pm 0,1$

Таблица 2

Параметры, чувствительные к изменению среднего угла наклона частиц

Параметр	Диапазон изменения МО параметра для облака класса:									
	St	Sc	Cu	NsAs-d	Cb	Cb-s	Ci-n	NsAs-n	Ci-p	NsAs-p
EO_1 , град	43,8...59,4	41,5...63,4	41,8...63,3	42,7...63,6	24,7...48,9	18,2...50,3	21...49,1	20,7...48,8	24...49	25...47,8
EO_2 , град	-45,1...-29	-47,1...-25,4	-47,3...-25,1	-45,6...-24,6	-59,3...-36,5	-27,5...-18,6	-58,7...-39,8	-58,1...-39,3	-29,3...-5,32	-30,7...-1,68

Таблица 3

Результаты оценок МО угла наклона $\bar{\beta}$ по поляризационным данным

	St	Sc	Cu	NsAs-d	Cb	Cb-s	Ci-n	NsAs-n	Ci-p	NsAs-p
$\bar{\beta}$, град	0...50						40...90		0...50	
МО $\langle \bar{\beta} \rangle^1$, град	-2,48...21,3	1,06...25,4	0,19...26,8	0,84...24,3	-31,9...4,33	-41...-0,55	0,44...37	1,43...37,9	-27,3...-2,95	-29...-0,55
МО $\langle \bar{\beta} \rangle^2$, град	-2,16...24,7	-0,35...36,2	6,4...37,0	$5,9 \cdot 10^{-5}$...35,4	-32,4...19,7	$-59,1 \dots 4 \cdot 10^{-6}$	-1,7...49,3	-10^{-6} ...54,0	-37,4...11,5	-36,2...-3,4

1) по гистограмме; 2) по оценкам параметров закона распределения Джонсона

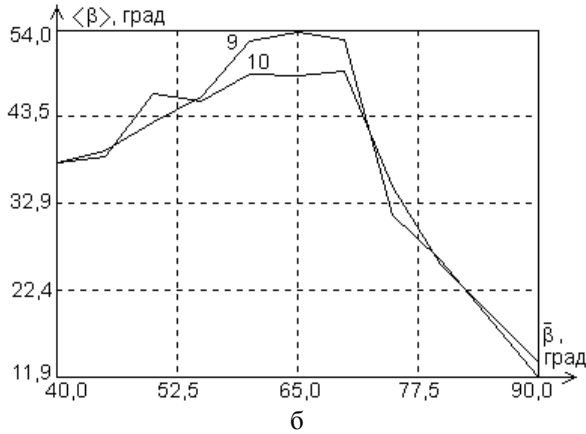
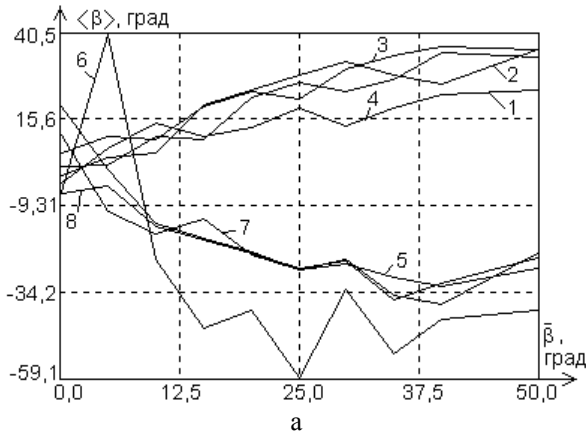


Рис. 4. Зависимость МО $\langle \beta \rangle$ от $\bar{\beta}$:

1 – St; 2 – Sc; 3 – Cu; 4 – Ns-As-d; 5 – Cb; 6 – Cb-s; 7 – Ci-p; 8 – Ns-As-p; 9 – Ci-n; 10 – Ns-As-n

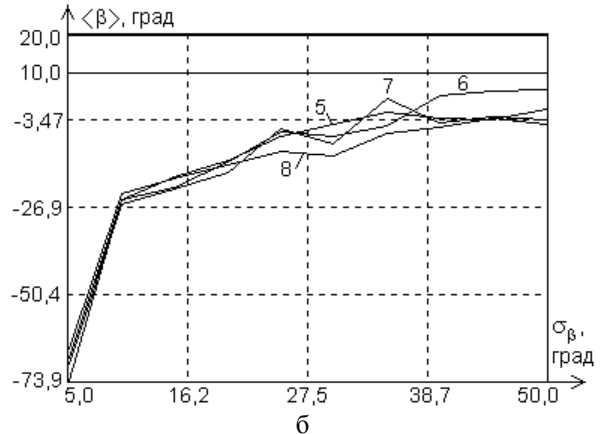
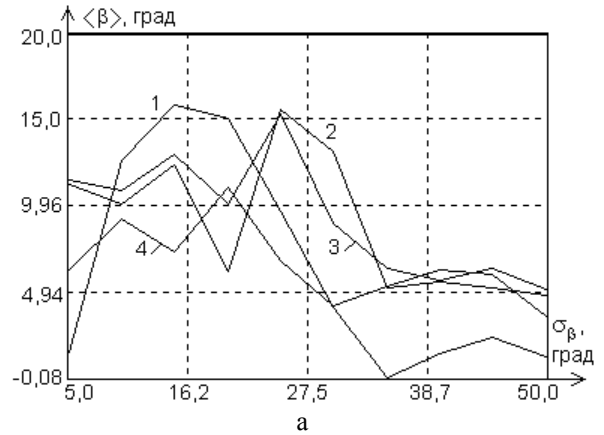


Рис. 5. Зависимость МО $\langle \sigma_\beta \rangle$ от σ_β :

1 – St; 2 – Sc; 3 – Cu; 4 – Ns-As-d; 5 – Cb; 6 – Cb-s; 7 – Ci-p; 8 – Ns-As-p

Влияние СКО угла наклона на ПП

Зависимость ПП от СКО угла наклона частиц σ_β исследовалась на интервале 5 ... 50°. Наиболее чувствительны к σ_β EO_1 и EO_2 ; отклонения их МО от среднего значения достигают $\pm 11,5^\circ$ (для Cb) и $\pm 24,5^\circ$ (Cb-s). Оценка $\bar{\beta}$, как отмечалось выше, получается смещенной, если $\beta \notin [-\pi/2, \pi/2]$, т.е. с ростом σ_β погрешность оценки МО угла наклона должна возрастать (рис. 5, а). Однако для Cb-s ($\bar{\beta} = 10^\circ$) и Cb, Ci-p, Ns-As-p ($\bar{\beta} = 20^\circ$) наблюдается обратное (рис. 5, б), что объясняется ошибочным определением оценки $\bar{\beta}$ по (5). Зависимость $\langle \sigma_\beta \rangle$ от σ_β имеет нелинейный характер; с увеличением σ_β от 5 до 50° МО $\langle \sigma_\beta \rangle$ для всех моделируемых классов облаков возрастает от 8 ... 9 до 15°.

Зависимость ПП от водности ГМО

Для исследования были выбраны типичные диапазоны значений водности LWC , $г/м^3$: для St – 0,05 ... 0,25, Sc и Ns-As-d – 0,2 ... 1, Cu – 0,5 ... 3, Cb – 1 ... 5, Cb-s – 3 ... 7, Ci-n – 0,01 ... 0,1, Ns-As-n и Ci-p – 0,05 ... 0,5, Ns-As-p – 0,1 ... 1. Установлено, что отклонения МО абсолютных ПП не превышают 12 дБ. Зависимости Z_h от водности показаны на рис. 6, а, б, а трансформация плотности распределения при изменении водности Cb-s от 3 до 7 $г/м^3$ – на рис. 7.

Относительные ПП еще менее чувствительны к величине LWC . Наибольшие отклонения от среднего показывают $LDR_{h,v}$, I_1 ($\Delta_{max} = \pm 2$ дБ). Диапазон изменения МО ряда фазовых ПП (FH , EF_1 , EFS , DTA , HGF) может достигать от 4 до 23°. Из угловых ПП наиболее восприимчивы к значению LWC EO_1 ($\Delta_{max} = \pm 2,7^\circ$) и EO_2 ($\Delta_{max} = \pm 5,2^\circ$).

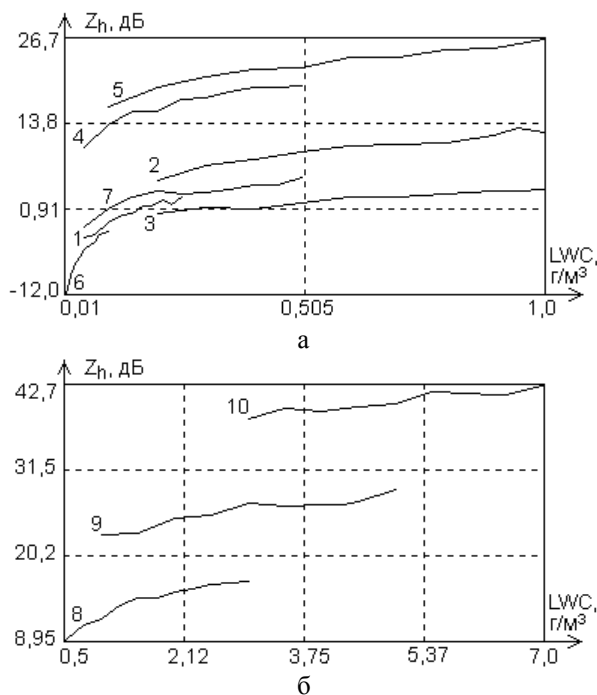


Рис. 6. Зависимость Z_h от водности облаков:
1 – St; 2 – Sc; 3 – Ns-As-d; 4 – Ci-p; 5 – Ns-As-p;
6 – Ci-n; 7 – Ns-As-n; 8 – Cu; 9 – Cb; 10 – Cb-s

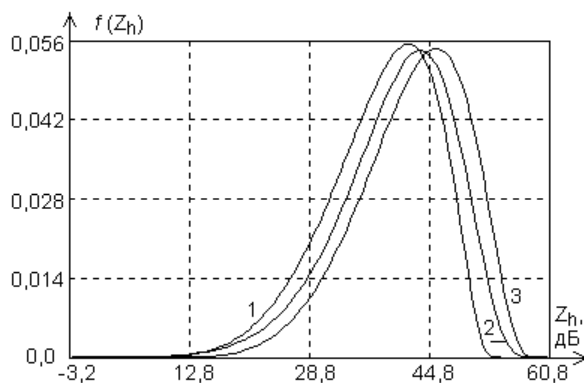


Рис. 7. Плотности распределения Z_h
для различных значений водности Cb-s:
1 – $LWC = 3 \text{ г/м}^3$; 2 – $LWC = 5 \text{ г/м}^3$; 3 – $LWC = 7 \text{ г/м}^3$

Использование зависимостей абсолютных амплитудных ПП от LWC для количественной оценки содержания жидкой воды в облаках представляется весьма проблематичным, поскольку изменения их МО при варьировании LWC по типичным для различных классов облаков значениям водности не превышают СКО законов распределения соответствующих ПП, т.е. все рассматриваемые ПП можно отнести к практически не зависящим от водности. При этом для построения статистической модели ПП нет необходимости проводить интегрирование по диапазону возможных значений LWC .

Заключение

Моделирование ПП облаков показало, что изменения t и LWC в пределах принятых диапазонов не оказывают существенного влияния на большинство ПП. Наиболее чувствительны к параметрам распределения частиц по углам наклона $\langle \bar{\beta} \rangle$, $\langle \sigma_{\beta} \rangle$, EO_1 и EO_2 . От λ зависят только абсолютные ПП. Эти зависимости известны и позволяют проводить пересчет результатов с учетом ограничений на диапазон длин волн, накладываемых методиками расчета полей рассеяния. Однако абсолютные ПП чувствительны к точности оценки импульсного объема. МО фазовых ПП для всех классов близки к 0° , а ширина законов распределения составляет 360° (кроме DPS). Таким образом, необходимо исследование информативности в первую очередь относительных и угловых ПП с использованием экспериментальных данных.

Литература

1. Канарейкин А.Б., Потехин В.А., Шишкин И.Ф. Морская поляриметрия. – Л.: Судостроение, 1968. – 328 с.
2. Хан Г., Шапиро С. Статистические модели в инженерных задачах. – М.: Мир, 1969. – 369 с.
3. Popov A.V., Pogrebnyak O. Informativity of polarimetric radar invariants // Proc. SPIE. – 2003. – Vol. 5151. – P. 74 – 84.
4. Рыжков А.В. Поляризационные методы в метеорологической радиолокации // Зарубежная радиоэлектроника. – 1993. – № 4. – С. 18 – 28.
5. Straka J.M., Zrnic D.S., Ryzhkov A.V. Bulk hydrometeor classification and quantification using polarimetric radar data: Synthesis of relations // J. Appl. Meteor. – 2000. – Vol. 39. – P. 1341 – 1372.
6. Huynen J.R. Phenomenological theory of radar targets // Electromagnetic scattering. – 1978. – P. 653 – 712.

Поступила в редакцию 30.03.05

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Г.Я. Красовский, ГНПЦ «Природа», Харьков.