

В.Х.Корбан, д.т.н., О.В.Корбан, к.г.н., Л.Н.Дегтярева

РАСПОЗНАВАНИЕ ГРАДОВЫХ И ЛИВНЕВЫХ ОБЛАКОВ ПО ПОЛЯРИЗАЦИОННЫМ ПАРАМЕТРАМ ЭХО-СИГНАЛОВ

В статье показана возможность распознавания градовых и ливневых облаков по поляризационным параметрам эхо-сигналов.

***Ключевые слова:** градовые и ливневые облака, поляризационные параметры, матрица рассеяния.*

Введение. Известно [1], что с кучево-дождевыми облаками связаны такие опасные явления погоды, как шквалы, грозы, смерчи, град, ливни. До настоящего времени существуют значительные трудности в распознавании опасных явлений погоды с высокой достоверностью из-за несовершенства радиотехнических методов и средств. Информативность параметров эхо-сигналов, используемых в сетевых МРЛС, не позволяет получить достоверную информацию о динамических процессах, протекающих в процессе развития кучево-дождевого облака. Наиболее полную характеристику состояния развивающегося конвективного облака могут дать радиолокационные метеорологические поляриметры. Однако в теоретических и экспериментальных разработках различных авторов для распознавания ОЯП используется частичный поляризационный анализ эхо-сигналов от облаков и осадков, что не позволяет решить задачу распознавания и прогноза с высокой достоверностью [2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14]. По нашему мнению, для решения задачи радиолокационного распознавания необходимо использовать в качестве информативных энергетические параметры Стокса. Обоснование и экспериментальное подтверждение поляризационного метода изложено в материале данной статьи.

Научная новизна статьи заключается в том, что впервые для распознавания ОЯП использованы действительные энергетические коэффициенты матрицы Стокса, несущие всю физическую информацию о структуре и динамике развивающегося конвективного облака, вплоть до его диссипации.

Достоверность и эффективность рассмотренной в статье методики подтверждена приведенными экспериментальными результатами радиолокационного исследования кучево-дождевых облаков и распознавания ОЯП, связанных с исследуемыми облаками.

Изложение основного материала. Основой радиолокационного метода является описание поляризационных свойств облаков и осадков матрицей коэффициентов, характеризующих изменение поляризационных параметров отраженной электромагнитной волны в линейном, круговом и эллиптическом базисах. Наибольшей информативностью обладает параметрический метод, который позволяет провести полный поляризационный анализ отраженной от облаков и осадков электромагнитной волны и измерить все 16 коэффициентов поляризационной матрицы рассеяния на четырех поляризациях излучаемой волны.

Поляризационный метод распознавания конвективных облаков базируется на использовании модели их отражающих свойств в виде поляризационной матрицы рассеяния:

$$T = \begin{bmatrix} 0,5(S'_0 + S''_0) & 0,5(S'_0 - S''_0) & S'''_0 - 0,5(S'_0 + S''_0) & S''''_0 - 0,5(S'_0 + S''_0) \\ 0,5(S'_1 + S''_1) & 0,5(S'_1 - S''_1) & S'''_1 - 0,5(S'_1 + S''_1) & S''''_1 - 0,5(S'_1 + S''_1) \\ 0,5(S'_2 + S''_2) & 0,5(S'_2 - S''_2) & S'''_2 - 0,5(S'_2 + S''_2) & S''''_2 - 0,5(S'_2 + S''_2) \\ 0,5(S'_3 + S''_3) & 0,5(S'_3 - S''_3) & S'''_3 - 0,5(S'_3 + S''_3) & S''''_3 - 0,5(S'_3 + S''_3) \end{bmatrix} \left| \frac{P_{сф}}{E_0} \right|^2, \quad (1)$$

где S_0, S_1, S_2, S_3 - параметры Стокса отраженной волны,
 $P_{сф}$ - дипольный момент сферы,
 E_0 - напряженность электрического поля.

Так как отраженная от облаков и осадков электромагнитная волна является частично-поляризованной, то ее статистическая структура в совпадающие моменты времени характеризуется четырьмя статистически зависимыми параметрами Стокса, плотности вероятностей которых определяются с помощью соответствующих формул [15]:

$$\begin{aligned} W(S_0) &= \int_0^{S_0} W_1(E^2, S_0 - E^2) dE, \\ W(S_3) &= \int_{-\infty}^{\infty} W_1(E^2, S_3 + E^2) dE, \\ W(S_1) &= \int_{-\infty}^{\infty} W_1(S_1, S_2) dS_2, \\ W(S_2) &= \int_{-\infty}^{\infty} W_1(S_1, S_2) dS_1, \end{aligned} \quad (2)$$

где $W_1(S_1, S_2) = \int_0^{\infty} W_1[E_1, E_2 = f_1(S_1, S_2, E_1)] \delta = f_2(S_1, S_2, E_1) \left| \frac{\partial(E_1, E_2, \delta)}{\partial(E_1, S_1, S_2)} \right| dE_1$.

Для радиолокационного распознавания градовых и ливневых облаков по параметрам Стокса будем использовать правило максимума правдоподобия, при котором отраженный сигнал относится к той форме облаков, для которой функция правдоподобия больше. В качестве признаков распознавания применим параметры Стокса. В соответствии с правилом максимума правдоподобия необходимо проверить выполнение условия

$$\frac{W(\lg S_0, S_1, S_2, S_3 / Cb_2)}{W(\lg S_0, S_1, S_2, S_3 / Cb_n)} \geq 1. \quad (3)$$

Для решения задачи распознавания градовых и ливневых облаков необходимо знать законы распределения $W(\lg S_0, S_1, S_2, S_3 / Cb_2)$ и $W(\lg S_0, S_1, S_2, S_3 / Cb_n)$.

Распределение параметров Стокса в кучево-дождевых облаках описывается логарифмическим нормальным законом. Поэтому левую часть выражения (3) можно представить в следующем виде

$$\frac{W(\lg S_0, S_1, S_2, S_3 / Cb_2)}{W(\lg S_0, S_1, S_2, S_3 / Cb_l)} = \frac{\frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_2}} \cdot e^{-(\lg S_0, S_1, S_2, S_3 - m_2)^2}}{\frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_l}} \cdot e^{-(\lg S_0, S_1, S_2, S_3 - m_l)^2}}, \quad (4)$$

где $\lg S_0, S_1, S_2, S_3$ - измеренные ПМРЛ параметры Стокса,

m_2, m_l - математические ожидания логарифмов параметров Стокса,

σ_2^2, σ_l^2 - дисперсии логарифмов параметров Стокса.

После соответствующих преобразований выражение (3) сводится к виду

$$\frac{\sigma_l}{\sigma_2} e^{a(\lg S_0, S_1, S_2, S_3)^2 + b \lg(S_0, S_1, S_2, S_3) + c} \geq 1, \quad (5)$$

где a, b, c - коэффициенты, рассчитываемые по формулам [16]

$$a = \frac{\sigma_2^2 - \sigma_l^2}{2\sigma_2^2\sigma_l^2}, \quad b = \frac{m_2\sigma_l^2 - m_l\sigma_2^2}{\sigma_2^2\sigma_l^2}, \quad c = \frac{m_l^2\sigma_2^2 - m_2^2\sigma_l^2}{2\sigma_2^2\sigma_l^2}. \quad (6)$$

Если измеренные значения параметров Стокса таковы, что выполняется (5), то принимаем решение Cb_2 , то в противном случае принимаем решение Cb_l .

С помощью изготовленного экспериментального радиолокационного поляриметра за период с 1979 по 1988 гг. в северном Причерноморье проведено распознавание градовых и ливневых облаков по 4-м поляризационным параметрам Стокса.

Технология поляризационной локации конвективных облаков состояла в последовательном излучении электромагнитной волны линейной вертикальной поляризации, линейной горизонтальной, линейной с наклоном вектора в 45° и волны круговой поляризации. Прием осуществлялся двух ортогональных составляющих эхо-сигналов с измерением для каждой поляризации излучаемой волны 4-х параметров Стокса и разности фаз между ними. При этом проводились вертикальные разрезы кучево-дождевого облака от стадии роста до стадии диссипации.

Для определения укажем формальные границы между стадиями эволюции облака, считая, что стадия роста протекает с момента обнаружения радиоэха до достижения максимальных значений радиолокационной отражаемости в переохлажденной части облака, а стадия зрелости – с момента достижения максимума радиолокационной отражаемости переохлажденной части облака к моменту достижения его максимального значения в теплой части, после которого наблюдается устойчивое уменьшение Z_{max} .

В режиме излучения линейно поляризованной волны с наклоном вектора в 45° измерялась также и дифференциальная отражаемость Z_{DR} в зондирующем объеме, ограниченном шириной диаграммы направленности антенны и пространственной протяженностью импульса. Стробирующий импульс перемещался по дальности до 185 км. Его перемещение отмечалось на экранах индикаторов МРЛ. Мгновенные значения отраженных ортогональных составляющих эхо-сигналов измерялись с точностью до 0,25 дБ. Количество импульсов осреднения в одной

реализации составило 256. Серия вертикальных разрезов проводилась не более 12 мин. На один радиолокационный разрез затрачивалось до 50 с. Продолжительность наблюдений за отдельным облаком в зависимости от характера его развития составляла от 2 мин до 1 часа.

В дни наблюдений фиксировались также данные вида выпадающих осадков, и измерялся размер града. Проведенный анализ данных поляризационных наблюдений за облаками в теплый период 1981 года показал, что фазовое состояние выпадающих осадков в большинстве случаев определялось высотой размещения нулевой изотермы. Анализ поляризационной структуры эхо-сигналов сделаем на примере вертикального распределения параметров Стокса для стадии зрелости двух конкретных случаев градовых и ливневых облаков.

На рис.1 и 2 представлен радиолокационный разрез кучево-дождевого облака с вертикальным распределением параметров Стокса, наблюдавшегося 9 июля 1981 г., с которого в 18 час 32 мин выпадал град размером от 0,4 до 0,6 см. Верхняя граница радиоэха превышала уровень 11,5 км, зона повышенной водности расположилась в области отрицательных температур, а зона повышенной радиолокационной отражаемости ($\text{dBZ} \geq 45 \text{ dB}$) находится выше нулевой изотермы. В теплой части облака $Z_{DR} \geq 1,2 \text{ dB}$. В верхней части облака Z_{DR} имеет отрицательные и нулевые значения.

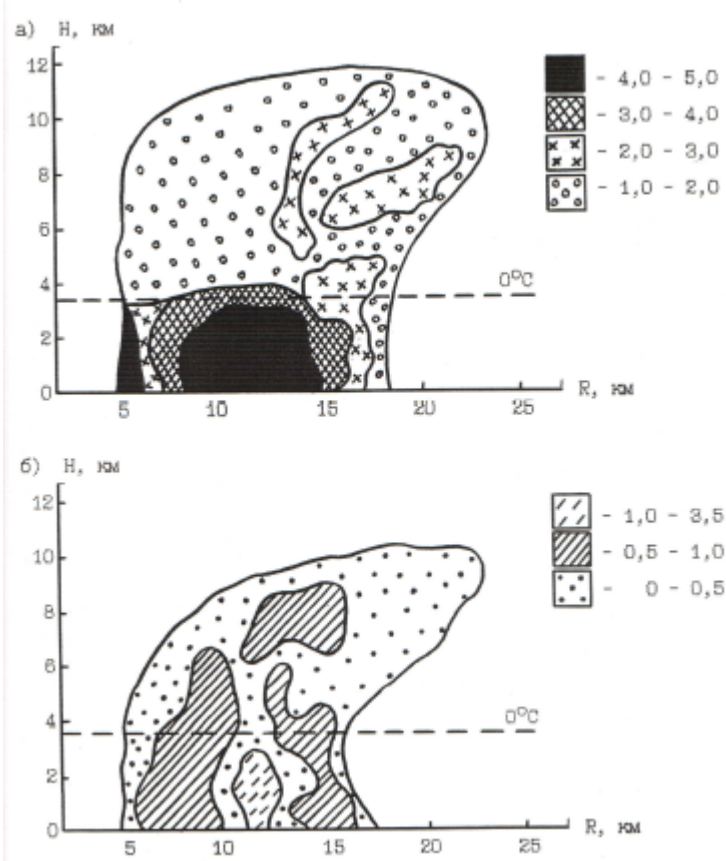


Рис.1 - Вертикальный разрез кучево-дождевого градового облака 9 июля 1981 года в 18 час 32 мин: а – распределение параметра I ; б - распределение параметра Q .

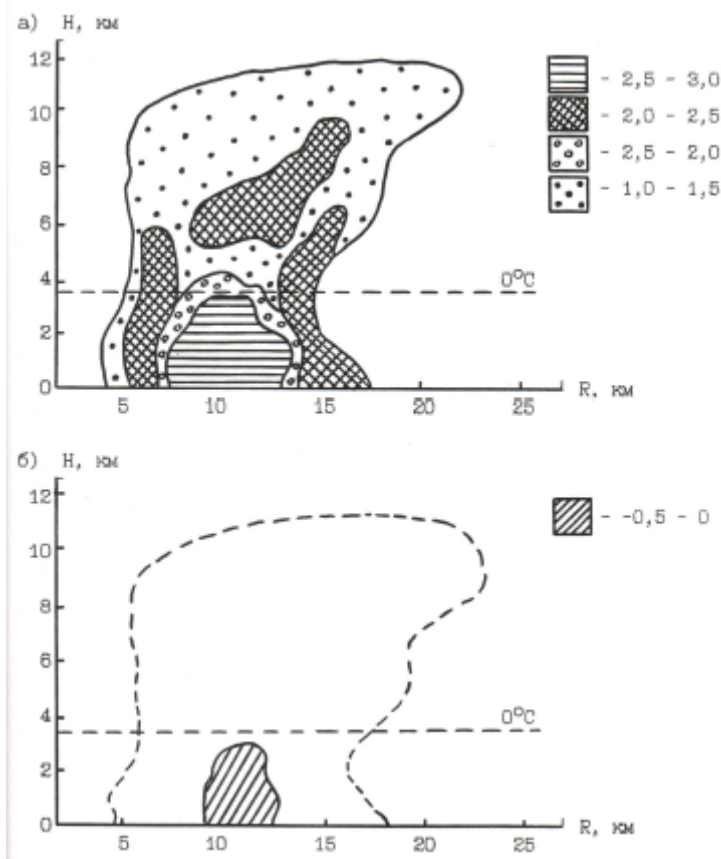


Рис.2 - Вертикальный разрез кучево-дождевого градового облака 9 июля 1981 года в 18 час 32 мин: а – распределение параметра U ; б - распределение параметра V .

К стадии зрелости значения отражаемости в облаке увеличились до 57 дБ, а высота верхней границы радиоэха достигла 12 км. На дальности 22 км наблюдается «навес» радиоэха. Верхняя граница снизилась и уменьшилась площадь области повышенной дифференциальной отражаемости в теплой части облака. Отрицательные и нулевые значения Z_{DR} переместились вниз. В области «навеса» радиоэха появились отрицательные значения Z_{DR} , что также характеризует градовое облако.

От поверхности Земли и до высоты 3,5 км выделяется зона со значениями первого параметра Стокса от 4,0 до 5,0. Выше нулевой изотермы в области «навеса» отмечаются две зоны со значениями $I = 2,0 \div 4,0$. Остальная часть радиоэха имеет значения $I = 1,5$. В тоже время вертикальное распределение второго параметра Стокса Q в градовом облаке существенно отличается от распределения параметра I (рис.1, б). Уменьшилась площадь радиоэха, т.к. отсутствуют эхо-сигналы от сферических частиц. «Навес» радиоэха здесь более ярко выраженный. Ниже уровня нулевой изотермы четко выражена зона выпадающего крупного града с горизонтальной ориентацией кристаллических частиц со значениями $Q = 3,2$. Зона осадков отличается малой интенсивностью со значениями Q близкими к нулю и две зоны крупы со значениями $Q = 0,8$. В тыловой части и в области «навеса» преобладают мелкие переохлажденные капли и ледяные кристаллы с

незначительной ориентацией в горизонтальной плоскости. Значения Q колеблются в пределах от 0 до 0,5.

На рис.2,а представлено вертикальное распределение третьего параметра Стокса, а на рис.2,б - четвертого. Анализ вертикального распределения третьего и четвертого параметров Стокса в кучево-дождевом облаке, находящемся в стадии зрелости показывает, что деполяризация максимальна при круговой и линейной с наклоном вектора под углом 45° поляризациях, а минимальная – при вертикальной и горизонтальной поляризациях. В то же время небольшие значения деполяризации свидетельствуют о том, что в облаке есть смешанная фаза частиц, причем оси дождевых капель и частиц льда одинаково ориентированы и разница фаз при этом принимает большее значение, чем при чисто кристаллической фазе, но меньше, нежели при жидкой фазе. Второй и четвертый параметры Стокса являются хорошими предикторами ориентации гидрометеоров. Если Q и V близки к нулевым значениям или равны нулю, то это характеризует хаотическую ориентацию несферических кристаллических частиц.

Вертикальное распределение параметров Стокса в кучево-дождевом ливневом облаке, наблюдавшемся 13 июня 1991 года, представлено на рис.3 и 4. Радиолокационное наблюдение за облаком началось в 10 час 30 мин, когда $\delta BZ_m = 45$ дБ и $\delta BZ_m = 51$ дБ.

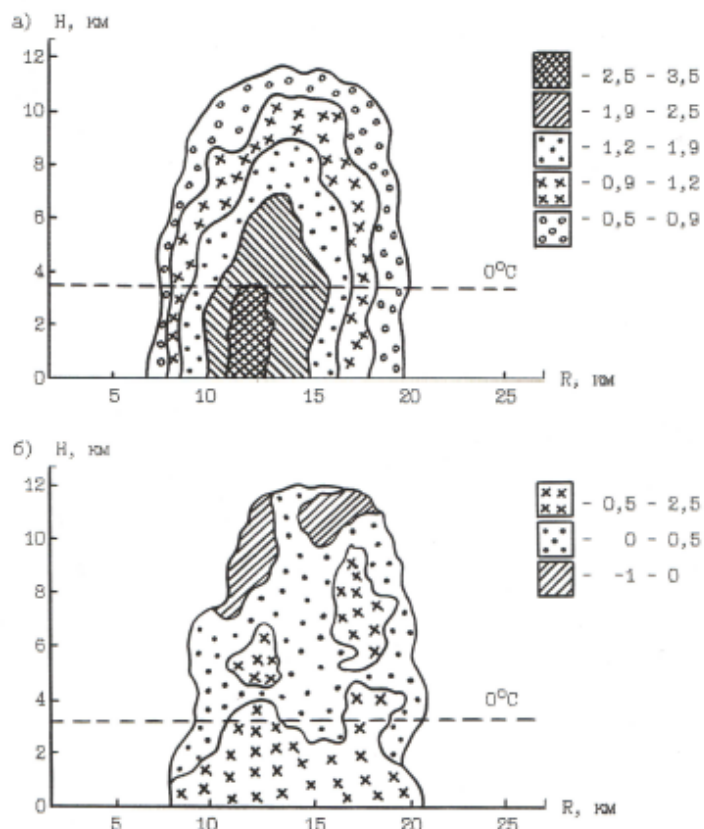


Рис.3 - Вертикальный разрез кучево-дождевого ливневого облака в 10 час 30 мин 13 июня 1991 года: а - распределение параметра I , б - распределение параметра Q .

К 11 часам радиолокационная отражаемость достигла в переохлажденной части максимального значения, равного 50 дБ. С этого момента облако перешло в стадию зрелости, при которой радиолокационная отражаемость в теплой части облака достигла значения, равного 56 дБ. Из облака выпадал ливневой дождь с интенсивностью от 0,1 до 20 мм/час. Верхняя граница радиоэха достигла высоты 11 км. Нижняя часть облака характеризуется зоной, имеющей наибольшее значение первого параметра Стокса, связанного с ливневым характером выпадающих осадков. Это и подтверждает вертикальное распределение второго параметра Стокса. Выше нулевой изотермы в области отрицательных температур есть еще 2 зоны с повышенными значениями Q , связанные с выпадением тающего града. Положительные значения Q указывают на преобладающую ориентацию больших осей падающих капель дождя в горизонтальной плоскости. В верхней части облака преобладают значения Q близкие к нулю, характерные для областей, содержащих кристаллы хаотически ориентированных в пространстве. В самой верхней части облака есть две зоны с отрицательными значениями Q , связанные с преобладающей вертикальной ориентацией ледяных частиц. Вертикальная ориентация ледяных частиц указывает, вероятно, на наличие грозового разряда в этой части облака.

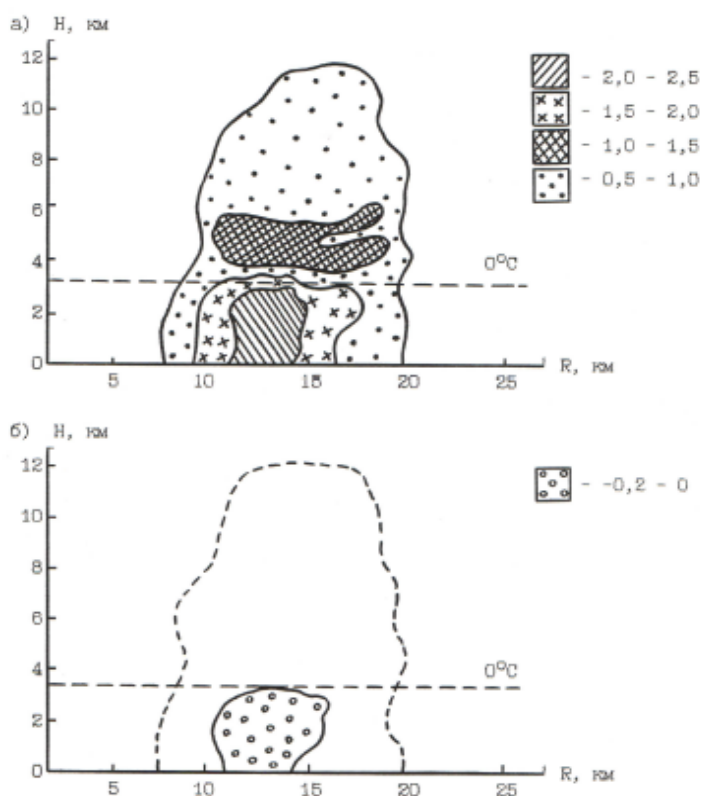


Рис.4 - Вертикальный разрез кучево-дождевого ливневого облака в 10 час 30 мин 13 июня 1981 года: а - распределение параметра U , б - распределение параметра V .

Анализ вертикального распределения третьего и четвертого параметров Стокса, представленного на рис.4 указывает также на ливневой характер кучево-дождевого облака. Диапазон изменения параметра U находится в пределах $0,5 \div 2,5$, а параметра V - $-0,2 \div 0,0$. Это связано со значительным поглощением эхо-сигнала дождевыми каплями и

незначительным фазовым сдвигом между ортогональными компонентами. Четко выделяется зона ливневых осадков значительной интенсивности и две зоны с меньшей интенсивностью выше уровня нулевой изотермы (рис.4) отмечается зона выпадающего града, который успевает растаять в теплой части облака. Сравнивая вертикальное распределение параметров Стокса градовых и ливневых облаков, следует отметить, что на практике приходится встречать типы облаков, находящихся на стадии развития на границах между ливневыми и градовыми. Причин, по которым облако не достигает градовой стадии, очевидно много. Это причины, связанные с термодинамикой процесса, условиями и рельефом подстилающей поверхности, динамикой самого процесса. Поэтому для практики прогноза, как видно с анализа радиолокационной структуры градовых (рис.1. и 2) и ливневых (рис.3 и 4) облаков, наиболее информативными поляризационными параметрами могут быть параметры Стокса, по которым можно строить прогноз градоопасности с оправдываемостью более 98 %.

О возможности распознавания градовых (18 случаев) и ливневых (20 случаев) кучево-дождевых облаков в стадии зрелости с помощью поляризационной локации можно сделать вывод и по данным табл.1 и 2, в которых приведена повторяемость N числа измерений той или иной градации параметров Стокса. Всего для градовых облаков в сезон 1981 года было проведено 1654 измерений, а для ливневых облаков – 958 серий измерений.

Таблица 1 - Выборочные характеристики распределения параметров Стокса для градовых облаков

I		Q		U		V	
Градации	Число случаев	Градации	Число случаев	Градации	Число случаев	Градации	Число случаев
1,0÷1,4	505	-0,8÷-0,41	301	0,81÷1,2	379	-0,5÷-0,1	674
1,41÷1,8	495	-0,4÷0	267	1,21÷1,6	585	-0,09÷0,3	835
1,81÷2,2	302	0÷0,4	155	1,61÷2,0	421	0,31÷0,7	145
2,21÷2,6	98	0,41÷0,8	128	2,01÷2,4	82	-	-
2,61÷3,0	35	0,81÷1,2	278	2,41÷2,8	96	-	-
3,1÷3,4	79	1,21÷1,6	245	2,81÷3,2	37	-	-
3,41÷3,8	54	1,61÷2,0	97	3,21÷3,6	42	-	-
3,81÷4,2	31	2,01÷2,4	95	3,61÷4,0	12	-	-
4,21÷4,6	25	2,41÷2,8	73	-	-	-	-
4,61÷5,0	30	2,81÷3,2	15	-	-	-	-

Таблица 2 - Выборочные характеристики распределения параметров Стокса для ливневых облаков

I		Q		U		V	
Градации	Число случаев	Градации	Число случаев	Градации	Число случаев	Градации	Число случаев
0,4÷0,8	142	-0,8÷-0,41	15	0,5÷0,9	371	-0,6÷-0,2	484
0,81÷1,2	107	-0,4÷0	18	0,91÷1,3	323	-0,19÷0,2	474
1,21÷1,6	110	0÷0,4	150	1,31÷1,7	105	-	-
1,61÷2,0	152	0,41÷0,8	142	1,71÷2,1	63	-	-
2,21÷2,4	131	0,81÷1,2	179	2,11÷2,5	54	-	-
2,41÷2,8	174	1,21÷1,6	103	2,51÷2,9	42	-	-
2,81÷3,2	95	1,61÷2,0	99	-	-	-	-
3,21÷3,6	47	2,01÷2,4	118	-	-	-	-
-	-	2,41÷2,8	134	-	-	-	-

Из анализа таблиц вытекает, что для кучево-дождевого облака средние значения параметров Стокса имеют такие величины: $I = 1,53$; $Q = 0,67$; $U = 1,85$; $V = -0,02$, а для кучево-дождевого ливневого - $I = 1,8$; $Q = 1,3$; $U = 1,17$; $V = -0,15$.

Отсюда следует, что при достигаемой с помощью ПМРЛС точности измерения, можно уверенно распознать эти два вида облаков.

Заключение. Полученная поляризационная структура конвективных облаков и связанных с ними ОЯП с использованием разработанного поляризационного метода позволяет сделать вывод о том, что поляризационные параметры эхо-сигналов облаков обладают высокой информативностью и могут успешно использоваться в моделях краткосрочного и сверхкраткосрочного методов прогноза ОЯП.

Список литературы

1. Степаненко В.Д. Радиолокация в метеорологии. – Л.: Гидрометеиздат, 1973. – 343 с.
2. Богородский В.В., Канарейкин Д.В., Козлов А.И. Поляризация рассеянного и собственного радиоизлучения земных покровов. – Л.: Гидрометеиздат, 1981. – 280 с.
3. Завируха В.К. Об одном способе определения поляризационных характеристик метеорологических образований // Труды ГГО. – 1985. – Вып. 490. – С.21-24.
4. Павлов Н.Ф., Степаненко В.Д. Методика и результаты экспериментального изучения поляризационных свойств метеорологических целей // Труды Третьего Всесоюзного совещания по радиометеорологии. – М.: Гидрометеиздат, 1968. – С.75-79.
5. Шупяцкий А.Б. Радиолокационное измерение интенсивности и некоторых других характеристик осадков. – Л.: Гидрометеиздат, 1960. – 92 с.
6. Blyth, Alan M., Rasmus E. Benestad, Paul R. Krehbiel, John Latham, 1997: Observations of Supercooled Raindrops in New Mexico Summertime Cumuli // J. Atmos. Sci. – 1997. – Vol.54. – P.569-575.
7. Bernard Vonnegut. Role of cumulus downdrafts in stratosphere-troposphere exchange and in cloud electrification // Atmospheric Research. – 1997. – Vol. 43, N 2. – P.197-199.
8. Michael J. Rycroft. Radiation and water in the climate system. Remote measurements // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. – 1998. – Vol.60, N 4. – P.493-498.
9. Kenneth S. Gage, Christopher R. Williams, Paul E. Johnston, Warner L. Ecklund, Robert Cifelli, Ali Tokay, David A. Carter. Doppler Radar Profilers as Calibration Tools for Scanning Radars // Journal of Applied Meteorology. – 2000. – Vol.39, N 12. – P.2209-2222.
10. Courtney Schumacher, Robert A. Houze Jr. The TRMM Precipitation Radar's View of Shallow, Isolated Rain // Journal of Applied Meteorology. – 2003. – Vol.42, N10. – P.1519-1524.
11. Pamela L. Heinselman, Alexander V. Ryzhkov. Validation of Polarimetric Hail Detection // Weather and Forecasting. 2006. – Vol.21, N 5. – P.839-850.
12. Xudong Liang. An Integrating Velocity-Azimuth Process Single-Doppler Radar Wind Retrieval Method // Journal of Atmospheric and Oceanic Technology. – 2007. – Vol.24, N 4. – P.658-665.
13. P. Tabary, J. Desplats, K. Do Khac, F. Eidelman, C. Gueguen, J.-C. Heinrich. The New French Operational Radar Rainfall Product. Part II: Validation // Weather and Forecasting. – 2007. – Vol.22, N 3. – P.409-427.
14. Jianxin Wang, David B. Wolff. Comparisons of Reflectivities from the TRMM Precipitation Radar and Ground-Based Radars // Journal of Atmospheric and Oceanic Technology. – 2009. – Vol.26, N 5. – P.857-875.
15. Поздняк С.И., Мелитицкий В.А. Введение в статистическую теорию поляризации радиоволн. – М.: Изд. «Сов.радио», 1974. – 478 с.
16. Билетов М.В., Кузьменко В.П., Павлов Н.Ф., Цивенко Н.В. Радиометеорология. – М.: Воениздат, 1984. – 208 с.

Розпізнавання градових і зливових хмар за поляризаційними параметрами луно-сигналів.

Корбан В.Х., Корбан О.В., Дегтярьова Л.М.

В статті показана можливість розпізнавання градових і зливових хмар за поляризаційними параметрами луно-сигналів.

Ключові слова: градові і зливі хмари, поляризаційні параметри, матриця розсіювання.

Recognition of cumulus and storm clouds on polarizing parameters of echo-signals.

Korban V.Ch., Korban O.V., Degtjarjeva L.N.

In the article recognition possibility of cumulus and storm clouds is shown on polarizing parameters of echo-signals.

Keywords: cumulus and storm clouds, polarizing parameters, a matrix Dispersion.