

25.00.29
УДК 551. 510

ФИЗИКА АТМОСФЕРЫ И ГИДРОСФЕРЫ

Жакамихов Х. М.,
Калов Х.М.,
Кешева Л.А.

Федеральное государственное бюджетное учреждение
Высокогорный геофизический институт, Россия
kesheva.lara@yandex.ru

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГРАДООПАСНОСТИ РАЗВИВАЮЩИХСЯ КОНВЕКТИВНЫХ ОБЛАКОВ ДЕПОЛЯРИЗАЦИЕЙ РАССЕЯННОГО СВЕТА ОБЛАЧНЫМИ И ДОЖДЕВЫМИ КАПЛЯМИ

Введение.

В настоящее время существует много работ, посвященных проблеме прогноза града, основанных на анализе реальной стратификации атмосферы, спутниковых и радиолокационной информации. В последние годы получили значительное развитие поляризационные методы исследования структуры облаков и осадков.

Материалы и методы исследований.

Эти методы основаны на изменении поляризации отраженного сигнала при рассеянии радиоволн различными частицами облаков. Одним из инструментов для таких исследований является метеорологический радиолокационный поляриметр с рабочим углом рассеяния 90° . В литературе имеется много работ, проведенных с помощью радиолокационного поляриметра. В основном эти работы являются теоретическими и экспериментальными. Здесь мы попытаемся провести численное исследование конвективных облаков на их градоопасность деполяризацией рассеянного света облачными и дождевыми каплями при угле рассеяния 90° , найти критериальное число деполяризации для сантиметровых длин волн. В связи с этим данная работа посвящена такому исследованию конвективных облаков для конкретных стратификаций атмосферы.

Результаты исследований и их обсуждение.

На основе струйной модели конвекции проведено численное исследование развивающихся конвективных облаков на их градоопасность по функциям Ми для сантиметровых длин волн. Показано, что величина деполяризации максимальна при угле рассеяния 90° и почти постоянна до некоторой высоты в облаке, а потом уменьшается. А при других значениях угла рассеяния деполяризация уменьшается при рассеяниях вперед и назад, стремясь к нулю. Получены значения критериальных чисел деполяризации при угле рассеяния 90° для рассматриваемых облаков в первом приближении.

Выводы.

Рассмотрена возможность определения градоопасности облака численным деполяризационным методом, определив критериальные значения деполяризации рассеянного света облачными и дождевыми каплями для данных сантиметровых длин волн. Установлено, что по нашим расчетам, рассматриваемые облака являются градоопасными и их критериальное число деполяризации $D_{90} \leq 0,12$. Для полного решения этой задачи нужен анализ расчетов множества облаков. Величина деполяризации максимальна и почти постоянна при угле рассеяния 90° для рассматриваемых длин волн. А при других значениях угла рассеяния величина деполяризация уменьшается при рассеяниях вперед и назад, стремясь к нулю.

Ключевые слова:

деполяризация рассеянного света, электромагнитное излучение, теория рассеяния Ми, параметры Стокса, интенсивность, параметры поляризации, модель конвективного облака, степень поляризации рассеянного света

Zhakamikhov Kh.M., High Mountain Geophysical Institute,
Kalov Kh. M., Russia
Kesheva L.A. kesheva.lara@yandex.ru

Numerical Study of the Hail Hazard of Developing Convective Clouds by Scattered Light Depolarization by Cloud Drops and Raindrops

Introduction. Currently there are many works devoted to the problem of forecasting hail, based on the analysis of real stratification of the atmosphere, satellite and radar information. In recent years polarization methods have been significantly developed to study the clouds and precipitation structure.

Materials and methods of the research. These methods are based on a change in the polarization of the reflected signal during scattering of radio waves by various particles of the clouds. One of the tools for such studies is a meteorological radar polarimeter with a working scattering angle of 90° . There are many works carried out using a radar polarimeter in the literature. Basically, these works are theoretical and experimental. Here we will try to conduct a numerical study of convective clouds for their hail hazard by scattering light scattered by cloud drops and raindrops at a scattering angle of 90° , to find the critical number of depolarization for centimeter wavelengths. In this regard, this work is devoted to the study of convective clouds for specific stratifications of the atmosphere.

Results of the study and their discussion. On the basis of the jet convection model, a numerical study of developing convective clouds for their hail hazard by the Mie functions for centimeter wavelengths was carried out. It was shown that the depolarization value is maximum at the scattering angle of 90° and is almost constant to a certain height in the cloud, and then decreases. Depolarization decreases in scattering forward and backward, tending to zero, for other values of the scattering angle. The values of the critical numbers of depolarization at the scattering angle of 90° were obtained for the clouds in question as a first approximation.

Conclusions. The possibility of determining the hail hazard of the cloud by the numerical depolarization method is considered, determining the critical values of the scattered light depolarization by cloud drops and raindrops for given centimeter wavelengths. It was established that according to our calculations, the clouds in question are hail hazardous and their critical number of depolarization is $D_{90} \leq 0,12$. For a complete solution to this problem, an analysis of the calculations of many clouds is needed. The value of depolarization is maximum and almost constant at the scattering angle of 90° for the considered wavelengths. And for other values of the scattering angle, the depolarization decreases with scattering forward and backward, tending to zero.

Key words: scattered light depolarization, electromagnetic radiation, Mie scattering theory, Stokes parameters, intensity, polarization parameters, convective cloud model, scattered light polarization.

Введение

В настоящее время существует много работ, посвященных проблеме прогноза града, основанных на анализе реальной стратификации атмосферы, спутниковых и радиолокационной информации [1, 2, 6, 7, 10, 11]. В последние годы получили значительное развитие поляризационные методы исследования структуры облаков и осадков [3, 12]. Эти методы основаны на изменении поляризации отраженного сигнала при рассеянии радиоволн различными частицами облаков.

Одним из инструментов для таких исследований является метеорологический радиолокационный поляриметр с рабочим углом рассеяния 90° . В литературе имеется много работ, проведенных с помощью радиолокационного поляриметра. В основном эти работы являются теоретическими и экспериментальными. Здесь мы попытаемся провести численное исследование конвективных облаков на их градоопасность деполяризацией рассеянного света облачными и дождевыми каплями при угле рассеяния 90° , найти критерияльное число деполяризации для сантиметровых длин волн. В связи с этим данная работа посвящена такому исследованию конвективных облаков для конкретных стратификаций атмосферы.

Материалы и методы исследований

Для численного исследования конвективного облака на градоопасность деполяризацией рассеянного света облачными и дождевыми каплями нужны такие его параметры, как размеры и концентрации облачных капель с момента его зарождения до любого его уровня, для чего используем струйную модель конвекции [7, 8]. Эта модель, разработанная в ВГИ, хорошо зарекомендовала себя при расчетах основных термодинамических и микрофизических параметров градового облака при естественном его развитии и искусственном воздействии на него. Решая уравнения модели с основными функциями по теории рассеяния Ми [4, 5], для конкретных стратификаций атмосферы (Мин. Воды за 9 июля 2011 и за 7 июня 2012 гг.), можно провести численное исследование конвективного облака на градоопасность деполяризацией рассеянного света облачными частицами. Так как исследование проводится для жидкой фазы облака, расчеты по модели проводим до момента начала спонтанной кристаллизации дождевых капель.

Элементы нормированной матрицы рассеяния Стокса [5] для однослойных частиц в случае полидисперсных систем можно записать в виде:

$$P_j(\vartheta, m, \rho) = \frac{N\lambda^2}{\pi\beta_{pac}(n(r), m, \rho)} \int_{r_1}^{r_n} f(r) i_j(\vartheta, m, \rho) dr \quad (1)$$

($j=1, 2, 3, 4$)

где $\rho = 2\pi r/\lambda$ – параметр рассеяния;
 m – комплексный показатель преломления;
 λ – длина волны;
 ϑ – угол рассеяния;
 r – радиус частицы;
 N – концентрация частиц;
 $f(r)$ – функция распределения облачных капель;
 $n(r)$ – концентрация, приходящаяся на одну градацию;
 $\beta_{pac}(n(r), m, \rho)$, – объемный коэффициент рассеяния;
 $i_j(\vartheta, m, \rho)$ – элементы нормированной матрицы рассеяния Стокса для отдельных частиц.

В случае дисперсной среды и однослойных частиц объемный коэффициент рассеяния запишется в виде

$$\beta_{pac}(n(r), m, \rho) = \pi N \int_0^r f(r) K_{pac}(m, \rho) r^2 dr, \quad (2)$$

где $K_{pac}(m, \rho)$ – фактор эффективности рассеяния отдельной частицы, который равен

$$K_{pac}(m, \rho) = \frac{\lambda^2}{2\pi^2 r^2} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) (|a_n(m, \rho)|^2 + |b_n(m, \rho)|^2), \quad (3)$$

где $a_n(m, \rho)$ и $b_n(m, \rho)$ – комплексные амплитудные коэффициенты. В случае однофазных частиц они примут вид [3]:

$$\begin{aligned} a_n(m, \rho) &= \frac{\psi'_n(m, \rho)\psi_n(\rho) - m\psi_n(m, \rho)\psi'_n(\rho)}{\psi'_n(m, \rho)\zeta'_n(\rho) - m\psi_n(m, \rho)\zeta_n(\rho)}, \\ b_n(m, \rho) &= \frac{m\psi'_n(m, \rho)\psi_n(\rho) - \psi_n(m, \rho)\psi'_n(\rho)}{m\psi'_n(m, \rho)\zeta'_n(\rho) - \psi_n(m, \rho)\zeta_n(\rho)}, \end{aligned} \quad (4)$$

где $\Psi_n(\rho)$, $\zeta_n(\rho)$ и $\Psi_n(m, \rho)$ – функции Риккати-Бесселя с действительными и комплексными переменными, а со штрихами – их производные.

Элементы нормированной матрицы рассеяния Стокса для отдельных частиц выражаются через безразмерные комплексные амплитуды рассеянного излучения $S_j(\vartheta, m, \rho)$ ($j = 1, 2$) [4] выражениями:

$$i_1(\vartheta, m, \rho) = S_1(\vartheta, m, \rho)S_1^*(\vartheta, m, \rho),$$

$$i_2(\vartheta, m, \rho) = S_2(\vartheta, m, \rho)S_2^*(\vartheta, m, \rho),$$

$$i_3(\vartheta, m, \rho) = \frac{1}{2} [S_1(\vartheta, m, \rho)S_2^*(\vartheta, m, \rho) + S_2(\vartheta, m, \rho)S_1^*(\vartheta, m, \rho)] \quad (5)$$

$$i_4(\vartheta, m, \rho) = \frac{i}{2} [S_1(\vartheta, m, \rho)S_2^*(\vartheta, m, \rho) - S_2(\vartheta, m, \rho)S_1^*(\vartheta, m, \rho)]$$

где $S_1^*(\vartheta, m, \rho)$ и $S_2^*(\vartheta, m, \rho)$ – функции комплексно-сопряженные $S_1(\vartheta, m, \rho)$ и $S_2(\vartheta, m, \rho)$,

i – мнимая единица. Для амплитуд рассеянного излучения решение Ми можно записать в симметричной форме:

$$S_1(\vartheta, m, \rho) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n+1}{n(n+1)} [a_n(m, \rho)\pi_n(\mu) + b_n(m, \rho)\tau_n(\mu)]$$

$$S_2(\vartheta, m, \rho) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n+1}{n(n+1)} [a_n(m, \rho)\tau_n(\mu) + b_n(m, \rho)\pi_n(\mu)], \quad (6)$$

где $\mu = \cos \vartheta$.

Фазовые функции $\pi_n(\mu)$ и $\tau_n(\mu)$ определены через производные от полиномов Лежандра целого порядка и вещественного аргумента

$$\pi_n(\mu) = \frac{d}{d\mu} P_n(\mu),$$

$$\tau_n(\mu) = \mu\pi_n(\mu) - (1 - \mu^2) \frac{d}{d\mu} \pi_n(\mu), \quad (-1 \leq \mu \leq 1), \quad (7)$$

где
$$P_n(\mu) = \frac{1}{2^n n!} \frac{d^n}{d\mu^n} (\mu^2 - 1)^n.$$

Используя хорошо известные рекуррентные соотношения между этими полиномами и их производными, можно найти коэффициенты $\pi_n(\mu)$ и $\tau_n(\mu)$. Отражаемость от облачных и дождевых капель рассчитывается по формуле:

$$\eta(m, \rho) = \pi \sum_{n=1}^N r^{2n} K_{op}(m, \rho) \quad (8)$$

где $K_{op}(m, \rho)$ – фактор эффективности обратного рассеяния капель, который равен

$$K_{op}(m, \rho) = \frac{1}{\rho^2} \left| \sum_{n=1}^N (2n+1) (-1)^n (a_n - b_n) \right|^2 \quad (9)$$

Комплексные амплитудные коэффициенты $a_n(m, \rho)$ и $b_n(m, \rho)$ являются сложными функциями длины волны, показателя преломления и геометрической структуры частиц [4, 5]. Их эффективная оценка очень важна для решения данной задачи. Расчеты этих коэффициентов проводились по алгоритму [5]. Ниже приводится выражение фактора деполаризации [5].

$$D(\vartheta, m, \rho) = \frac{P_1(\vartheta, m, \rho)P_2(\vartheta, m, \rho) - [P_3^2(\vartheta, m, \rho) + P_4^2(\vartheta, m, \rho)]}{P_1(\vartheta, m, \rho)P_2(\vartheta, m, \rho) + [P_3^2(\vartheta, m, \rho) + P_4^2(\vartheta, m, \rho)]}. \quad (10)$$

Начальный спектр размеров капель описывается обобщенным гамма – распределением [5]:

$$n(r) = Nf(r) = Ar^\alpha \exp(-Br^\gamma), \quad (11)$$

где A и B – константы. Константа B определяется модальным размером капель r_m из соотношения $B = \alpha/\gamma r_m^\gamma$ при условии, что значения параметров распределения α и γ фиксированы. Константы A и B связаны между собой соотношением:

$$A = \gamma NB^{\frac{\alpha+1}{\gamma}} \left[\Gamma\left(\frac{\alpha+1}{\gamma}\right) \right]^{-1}. \quad (12)$$

Здесь для функции распределения размеров капель в облаке мы брали $\alpha = 2$, $\gamma = 1$, $r_m = 3$ мкм, $N = 400$ см⁻³.

Для проведения расчетов переходим в теории Ми от интегрирования к суммированию, поскольку этого требует дискретность распределения капель в струйной модели конвективного облака, в данном случае брали тридцать градаций облачных капель от 1 до 30 мкм. Согласно постановке задачи, расчеты по модели для рассматриваемых характеристик проведены до высоты 6 км при значениях длин волн: 3,2; 7,5; 10,0; 17,0 см. Результаты этих расчетов приводятся на рисунках и в таблицах.

Результаты и их обсуждение

Основные результаты расчетов приведены на рис. 1, 2 и в табл. 1, 2. На рисунке 1 дано для второго облака (07.06.2012 г.) изменение спектра облачных капель в восходящей облачной струе в результате их конденсационно-коагуляционного роста. Как видно из этого рисунка кривые спектры облачных капель расширяются в сторону больших размеров.

А на рисунке 2 даны для того же облака изменение кривых депolarизации рассеянного света облачными и дождевыми каплями для четырех длин волны и высоты в облаке в зависимости от угла рассеяния. Как видно из рис. 2 величина депolarизации максимальна при угле рассеяния 90° и очень слабо зависит от длины волны и высоты в облаке. При других значениях угла рассеяния депolarизация уменьшается в облаке, стремясь к нулю при углах рассеяния 0° и 180°.

В таблице 1 приводятся результаты расчетов основных параметров двух облаков, рассчитанные по струйной модели облачной конвекции. Верхняя строка относится к первому облаку, а нижняя – ко второму. Как видно из этих результатов по величине основных параметров эти облака являются

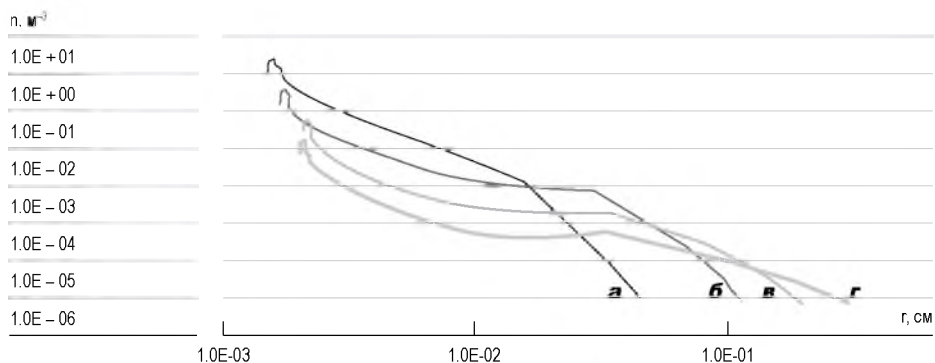
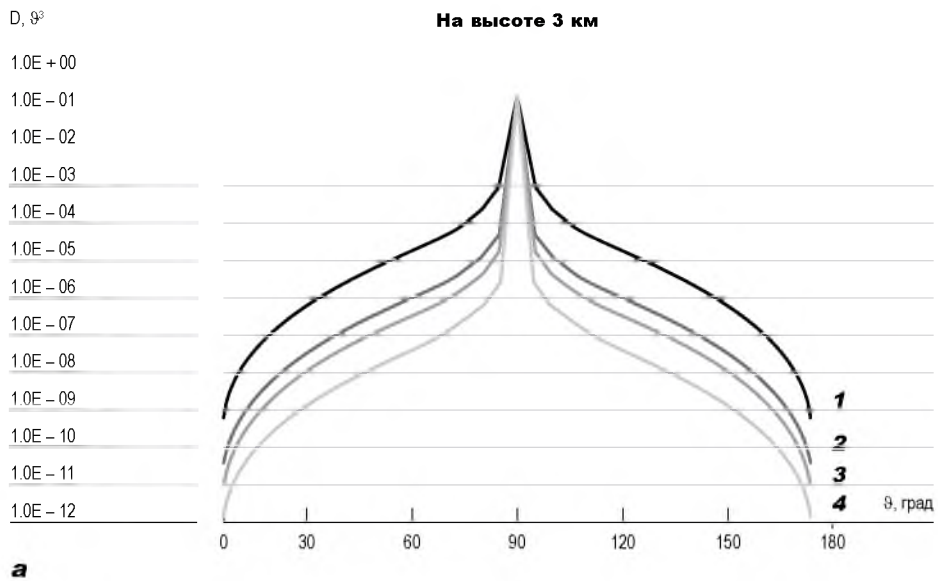


Рис. 1. Изменение спектра облачных капель в развивающемся конвективном облаке на высотах: 3(а), 4(б), 5(в), и 6(г) км.
 Fig.1. Changes in the spectrum of cloud droplets in a developing convective cloud at altitudes of 3(a), 4(b), 5(c), and 6 (d) km.

градоопасными в соответствии с работами [1, 7, 9, 10, 11], но разные по мощности. Далее приведем деполаризационный подход исследования градоопасности облаков. В таблице 2 даны результаты рассеянного света облачными каплями при угле рассеяния 90° и отражаемости для двух стратификаций атмосферы. Верхняя строка относится к первой стратификации (09.07.2011 г.), а нижняя – ко второй (07.06.2012 г.). Здесь приводятся результаты расчетов для тех длин волн, которые чаще используют в физике облаков. Как видно из таблицы в первых колонках для всех длин волн двух облаков деполаризации увеличиваются до определенной высоты в облаке, а сами значения для каждого случая почти совпадают для всех длин волн, имеет место релейское рассеяние, а потом уменьшаются с высотой в облаке. Это связано с изменением спектра облачных капель на этих высотах, он существенно расширяется в сторону больших размеров за счет коагуляционных процессов. Как видно из этой таблицы и рисунке 2 деполаризация рассеянного света облачными каплями уменьшается в рассматриваемых облаках по-разному, там, где спектр облачных капель шире деполаризация становится меньше. Очевидно, что величина фактора деполаризации зависит от природы частиц и от их распределения по размерам, а также от угла рассеяния. Как видно из таблицы 2 и рисунке 2 большая деполаризация имеет место для более узкого распределения облачных капель по размерам. Максимумы деполаризации в данных облаках находятся на высотах 2 км и 2,5 км соответственно там, где спектр капель уже в облаке. Деполаризация этих облаков при угле рассеяния 90° почти совпадают до определенной высоты (1 км) и для всех длин волн, а выше – расходятся, сильнее уменьшается в том облаке, где спектр капель шире. Анализируя результаты наших расчетов для данных облаков с учетом результатов работ [7, 10, 11] приходим к выводу, что рассматриваемые облака являются градоопасными, при этом второе облако мощнее первого. Теперь установим критериальное число градоопасности облака через деполаризации D_{90} .

Как видно из таблицы 2 для первого облака таким числом на высоте 6 км будет 0,122 при длине волны 3,2 см и 0,092 см при длине волны 17,0 см. А для второго облака эти критериальные числа достигают для этих длин волн



1 — 3,2 см **2** — 7,5 см **3** — 10,0 см **4** — 17,0 см

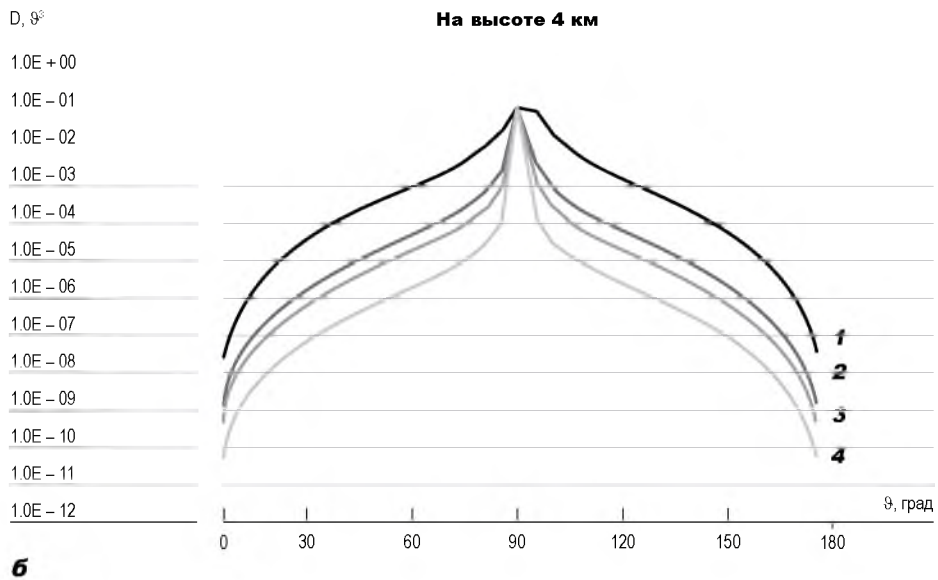
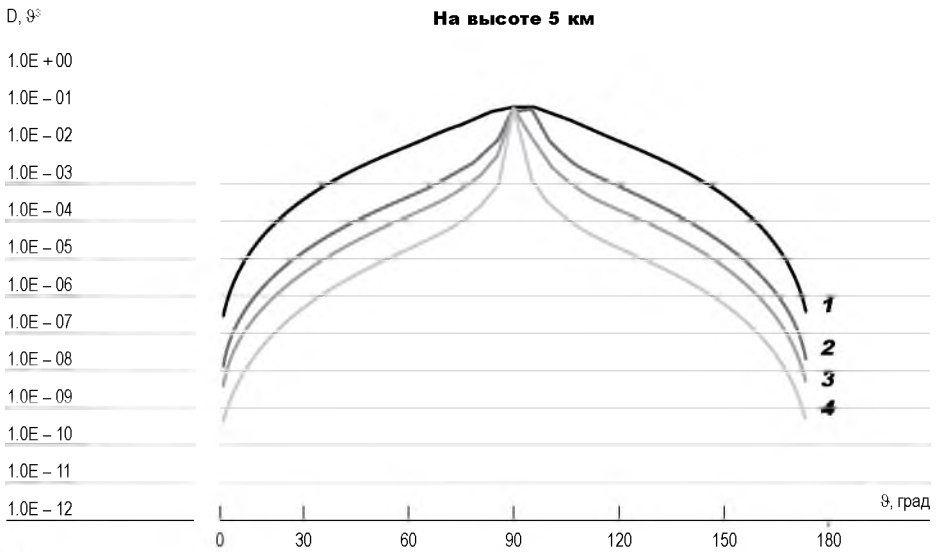


Рис. 2.

Значения фактора деполаризации на высотах 3,4,5 и 6 км в развивающемся конвективном облаке при длинах волн 3,2 (1), 7,5 (2), 10 (3) и 17 (4) см в зависимости от угла рассеяния.



1 — 3,2 см **2** — 7,5 см **3** — 10,0 см **4** — 17,0 см

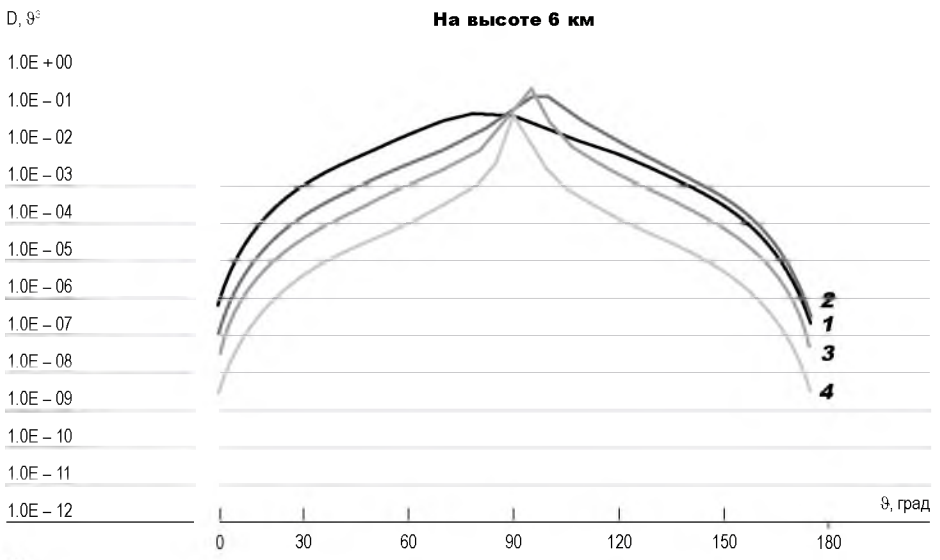


Fig. 2. Depolarization factor values at altitudes of 3,4,5 and 6 km in a developing convective cloud at wavelengths 3,2 (1), 7,5 (2), 10 (3) and 17 (4) cm depending on the scattering angle.

Таблица 1. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ДВУХ ОБЛАКОВ ПО СТРУЙНОЙ МОДЕЛИ ОБЛАЧНОЙ КОНВЕКЦИИ. ВЕРХНЯЯ СТРОКА ОТНОСИТСЯ К ПЕРВОМУ ОБЛАКУ (09.07.2011 Г.), А НИЖНЯЯ – КО ВТОРОМУ (07.06.2012 г.)
Table 1. Results of calculations of the main parameters of two clouds using the jet model of cloud convection. The top line refers to the first cloud (09.07. 2011), and the bottom refers to the second (07.06. 2012)

| z, км | W, м/с | R, км | q, г/кг | T, °C | S, г/кг | ρ , кг/м ³ | ω , г/м ³ | E, м ² /с ² |
|-------|--------|-------|---------|-------|---------|----------------------------|-----------------------------|-----------------------------------|
| 0,0 | 1,50 | 5,00 | 0,334 | 17,3 | 9,98 | 1,031 | 0,34 | 2,0 |
| | 2,00 | 5,00 | 0,334 | 18,2 | 13,10 | 1,031 | 0,34 | 2,0 |
| 0,5 | 3,66 | 3,83 | 1,28 | 14,8 | 9,01 | 0,980 | 1,25 | 6,7 |
| | 4,31 | 3,67 | 1,39 | 16,0 | 12,00 | 0,980 | 1,36 | 9,3 |
| 1,0 | 6,84 | 2,92 | 2,17 | 12,2 | 8,06 | 0,932 | 2,02 | 23,4 |
| | 5,68 | 3,21 | 2,36 | 13,6 | 10,91 | 0,931 | 2,20 | 16,1 |
| 1,5 | 8,55 | 2,73 | 2,98 | 9,5 | 7,13 | 0,886 | 2,64 | 36,6 |
| | 6,52 | 3,12 | 3,27 | 11,1 | 9,83 | 0,884 | 2,89 | 21,2 |
| 2,0 | 8,63 | 2,83 | 3,70 | 6,6 | 6,22 | 0,842 | 3,11 | 37,2 |
| | 7,40 | 3,06 | 4,10 | 8,6 | 8,76 | 0,840 | 3,44 | 27,4 |
| 2,5 | 10,29 | 2,71 | 4,35 | 3,6 | 5,36 | 0,801 | 3,48 | 53,0 |
| | 9,38 | 2,83 | 4,86 | 5,8 | 7,72 | 0,798 | 3,88 | 44,0 |
| 3,0 | 12,76 | 2,54 | 4,92 | 0,4 | 4,54 | 0,761 | 3,75 | 81,4 |
| | 11,75 | 2,65 | 5,55 | 3,0 | 6,72 | 0,758 | 4,20 | 69,0 |
| 3,5 | 14,79 | 2,47 | 5,41 | -2,9 | 3,78 | 0,724 | 3,91 | 109,3 |
| | 14,19 | 2,52 | 6,15 | 0,0 | 5,74 | 0,720 | 4,43 | 100,7 |
| 4,0 | 16,15 | 2,47 | 5,79 | -6,5 | 3,09 | 0,688 | 3,99 | 130,4 |
| | 16,51 | 2,44 | 6,65 | -3,3 | 4,85 | 0,685 | 4,55 | 136,3 |
| 4,5 | 16,93 | 2,52 | 6,10 | -10,2 | 2,45 | 0,654 | 3,99 | 143,4 |
| | 18,49 | 2,42 | 7,02 | -6,8 | 4,07 | 0,651 | 4,57 | 170,9 |
| 5,0 | 17,42 | 2,59 | 6,35 | -14,0 | 1,88 | 0,622 | 3,95 | 151,7 |
| | 19,78 | 2,45 | 7,34 | -10,4 | 3,33 | 0,618 | 4,57 | 195,6 |
| 5,5 | 17,65 | 2,68 | 6,59 | -17,8 | 1,34 | 0,591 | 3,90 | 155,8 |
| | 20,48 | 2,51 | 7,69 | -13,8 | 2,58 | 0,587 | 4,52 | 209,8 |
| 6,0 | 17,75 | 2,79 | 6,91 | -21,4 | 0,73 | 0,560 | 3,87 | 157,5 |
| | 20,86 | 2,60 | 8,16 | -17,0 | 1,74 | 0,556 | 4,54 | 217,6 |

приблизительно на высоте 5 км. Объединяя эти выводы можно сделать один общий вывод, что критериальным числом для этих облаков рассмотренных длин волн можно принять $D_{90} \leq 0,12$. Как видно из этих выводов чем мощнее конвективное облако, тем раньше становится оно градоопасным.

А для ливневых облаков – таким числом будет $D_{90} > 12$ при этом восходящая скорость в облаке не должна превышать 9–10 м/с и она должна быть

Таблица 2.

ЗНАЧЕНИЯ ДЕПОЛЯРИЗАЦИЙ (D_{90}) РАССЕЯННОГО СВЕТА
В РАССМАТРИВАЕМЫХ КОНВЕКТИВНЫХ ОБЛАКАХ И ОТРАЖАЕМОСТЕЙ
(η), НАИБОЛЕЕ ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДЛИНЫ ВОЛН В ОБЛАКЕ
Table 2. The values of the scattered light depolarization (D_{90}) in the convective clouds
and reflectivities under consideration (η), the most used wavelengths in the cloud

| Z, км | 3,2 | | 7,5 | | 10,0 | | 17,0 | |
|----------|----------------|--|--|--|--|--|--|--|
| | D_{90} | η | D_{90} | η | D_{90} | η | D_{90} | η |
| | 0,0 | 0,149 0,149 | $1,5 \cdot 10^{-14}$ $1,5 \cdot 10^{-14}$ | 0,150 0,150 | $5,1 \cdot 10^{-16}$ $5,1 \cdot 10^{-16}$ | 0,151 0,151 | $1,7 \cdot 10^{-16}$ $1,7 \cdot 10^{-16}$ | 0,157 0,157 |
| 0,5 | 0,184 0,174 | $6,9 \cdot 10^{-14}$ $7,5 \cdot 10^{-14}$ | 0,185 0,174 | $2,3 \cdot 10^{-15}$ $2,5 \cdot 10^{-15}$ | 0,187 0,177 | $7,5 \cdot 10^{-16}$ $7,9 \cdot 10^{-16}$ | 0,194 0,184 | $8,7 \cdot 10^{-17}$ $9,4 \cdot 10^{-17}$ |
| 1,0 | 0,198 0,194 | $1,6 \cdot 10^{-13}$ $1,8 \cdot 10^{-13}$ | 0,199 0,195 | $5,2 \cdot 10^{-15}$ $6,0 \cdot 10^{-15}$ | 0,201 0,196 | $1,7 \cdot 10^{-15}$ $1,9 \cdot 10^{-15}$ | 0,207 0,202 | $2,0 \cdot 10^{-16}$ $2,3 \cdot 10^{-16}$ |
| 1,5 | 0,303 0,359 | $2,9 \cdot 10^{-13}$ $3,7 \cdot 10^{-13}$ | 0,304 0,359 | $9,6 \cdot 10^{-15}$ $1,2 \cdot 10^{-14}$ | 0,305 0,361 | $3,1 \cdot 10^{-15}$ $3,9 \cdot 10^{-15}$ | 0,311 0,365 | $3,7 \cdot 10^{-16}$ $4,7 \cdot 10^{-16}$ |
| 2,0 | 0,406 0,442 | $5,0 \cdot 10^{-13}$ $9,0 \cdot 10^{-13}$ | 0,407 0,442 | $1,7 \cdot 10^{-14}$ $3,0 \cdot 10^{-14}$ | 0,408 0,442 | $5,3 \cdot 10^{-15}$ $9,5 \cdot 10^{-15}$ | 0,411 0,443 | $6,3 \cdot 10^{-16}$ $1,1 \cdot 10^{-15}$ |
| 2,5 | 0,432 0,331 | $1,2 \cdot 10^{-12}$ $8,3 \cdot 10^{-12}$ | 0,432 0,330 | $4,1 \cdot 10^{-14}$ $2,8 \cdot 10^{-13}$ | 0,433 0,330 | $1,3 \cdot 10^{-14}$ $8,7 \cdot 10^{-14}$ | 0,435 0,330 | $1,5 \cdot 10^{-15}$ $1,0 \cdot 10^{-14}$ |
| 3,0 | 0,329 0,236 | $6,5 \cdot 10^{-12}$ $2,4 \cdot 10^{-10}$ | 0,328 0,234 | $2,2 \cdot 10^{-13}$ $8,1 \cdot 10^{-12}$ | 0,328 0,234 | $6,8 \cdot 10^{-14}$ $2,6 \cdot 10^{-12}$ | 0,328 0,233 | $8,2 \cdot 10^{-15}$ $3,1 \cdot 10^{-13}$ |
| 3,5 | 0,259 0,178 | $6,2 \cdot 10^{-11}$ $4,3 \cdot 10^{-9}$ | 0,259 0,172 | $2,1 \cdot 10^{-12}$ $1,5 \cdot 10^{-10}$ | 0,257 0,171 | $6,5 \cdot 10^{-13}$ $4,6 \cdot 10^{-11}$ | 0,256 0,169 | $7,8 \cdot 10^{-14}$ $5,6 \cdot 10^{-12}$ |
| 4,0 | 0,211 0,145 | $6,0 \cdot 10^{-10}$ $2,8 \cdot 10^{-8}$ | 0,208 0,132 | $2,0 \cdot 10^{-11}$ $9,7 \cdot 10^{-10}$ | 0,207 0,130 | $6,3 \cdot 10^{-12}$ $3,1 \cdot 10^{-10}$ | 0,207 0,128 | $7,6 \cdot 10^{-13}$ $3,7 \cdot 10^{-11}$ |
| 4,5 | 0,173 0,135 | $4,0 \cdot 10^{-9}$ $1,0 \cdot 10^{-7}$ | 0,167 0,114 | $1,4 \cdot 10^{-10}$ $3,4 \cdot 10^{-9}$ | 0,166 0,110 | $4,3 \cdot 10^{-11}$ $1,1 \cdot 10^{-9}$ | 0,165 0,107 | $5,2 \cdot 10^{-12}$ $1,3 \cdot 10^{-10}$ |
| 5,0 | 0,144 0,124 | $1,7 \cdot 10^{-8}$ $3,1 \cdot 10^{-7}$ | 0,134 0,104 | $5,9 \cdot 10^{-10}$ $8,6 \cdot 10^{-9}$ | 0,133 0,098 | $1,9 \cdot 10^{-10}$ $2,8 \cdot 10^{-9}$ | 0,131 0,092 | $2,3 \cdot 10^{-11}$ $3,5 \cdot 10^{-10}$ |
| 5,5 | 0,131 0,097 | $5,6 \cdot 10^{-8}$ $9,2 \cdot 10^{-7}$ | 0,115 0,098 | $1,9 \cdot 10^{-9}$ $1,9 \cdot 10^{-8}$ | 0,112 0,088 | $6,1 \cdot 10^{-10}$ $6,2 \cdot 10^{-9}$ | 0,109 0,080 | $7,4 \cdot 10^{-11}$ $7,9 \cdot 10^{-10}$ |
| 6,0 | 0,122 0,057 | $1,7 \cdot 10^{-7}$ $2,4 \cdot 10^{-6}$ | 0,101 0,095 | $5,3 \cdot 10^{-9}$ $3,7 \cdot 10^{-8}$ | 0,096 0,078 | $1,7 \cdot 10^{-9}$ $1,3 \cdot 10^{-8}$ | 0,092 0,068 | $2,1 \cdot 10^{-10}$ $1,7 \cdot 10^{-9}$ |

постоянной. Для уточнения этих выводов, т. е. для полного решения этой задачи нужен анализ расчетов множества облаков.

Таким образом, впервые делается попытка определения градоопасности облака численным деполяризационным методом. Определив критериальное число деполяризации рассеянного света облачными и дождевыми каплями можно установить градоопасность облака.

Выводы

В результате проведенного численного исследования получено следующее:

1. Рассмотрена возможность определения градоопасности облака численным деполяризационным методом, определив критериальные значения деполяризации рассеянного света облачными и дождевыми каплями для данных сантиметровых длин волн.
2. Установлено, что по нашим расчетам, рассматриваемые облака являются градоопасными и их критериальное число деполяризации $D_{90} \leq 0,12$. Для полного решения этой задачи нужен анализ расчетов множества облаков.
3. Величина деполяризации максимальна и почти постоянна при угле рассеяния 90° для рассматриваемых длин волн. А при других значениях угла рассеяния величина деполяризации уменьшается при рассеяниях вперед и назад, стремясь к нулю.

Библиографический список

1. Абшаев М.Т., Бурцев И.И., Васкенбург С.И., Шевела Г.Ф. Руководство по применению радиолокаторов МРЛ-4, МРЛ-5, МРЛ-6 в системе градозащиты. Л.: Гидрометеиздат, 1980. 230 с.
2. Абшаев М.Т., Кармов Х.Н. Обнаружение градовых очагов радиолокационно-радиометрическим методом. «Труды 4-го Всесоюзного совещания по радиометеорологии». М., Гидрометеиздат, 1978. С. 81–86.
3. Диневич Л.А., Тычина Д.П., Шупяцкий А.Б., Результаты поляризационных исследований градовых и градоопасных облаков. «Труды 4-го Всесоюзного совещания по радиометеорологии». М., Гидрометеиздат, 1978. С. 63–70.
4. Ван де Хюлст Г. Рассеяние света малыми частицами. М.: ИЛ, 1961. 535 с.
5. Деймерджан Д. Рассеяние электромагнитного излучения сферическими полидисперсными частицами. М.: Мир, 1971. 165 с.
6. Жакамихов Х.М., Абшаев А.М. Численное исследование рассеяния микрорадиоволн спектрами однородных и двухслойных частиц осадков // Метеорология и гидрология. 2010. №8. С. 26–32.
7. Жакамихов Х. М., Жекамухов М. К., Инюхин В. С. Применение струйной модели градового облака в оперативной практике градозащиты. Метеорология и гидрология, 2010, № 8. С. 41–48.
8. Жекамухов М.К., Жакамихов Х.М. Теоретическая модель градового облака и активного воздействия на градовые процессы с помощью кристаллизующих реагентов // Тр. ВГИ. 1980. Вып. 45. С. 3–39.
9. Жекамухов М.К., Жакамихов Х.М. Некоторые результаты численного моделирования процессов градообразования в облаках

при естественном их развитии и при искусственном воздействии // Тр. ВГИ. 1983. Вып. 48. С. 13–27.

10. Лапчева В. Ф. Определение градоносности и градоопасности конвективных облаков. Труды ВГИ, 1968, вып.11. С. 86–97.
11. Сулаквелидзе Г. К., Глушкова Н. И., Федченко Л. М. Прогноз града, гроз и ливневых осадков. Л., Гидрометеиздат, 1970. 188 с.
12. Иванов А.А., Колосков Б.П. Методы индикации деполаризационных зон в облаках и осадках. «Труды 4-го Всесоюзного совещания по радиометеорологии». М., Гидрометеиздат, 1978. С. 81–86.

References

1. Abshaev M.T., Burtsev I.I., Waskenburg S.I., Shevel G.F. Guidelines for the use of radars MRL-4, MRL-5, MRL-6 in a city protection system. L.: Gidrometeoizdat, 1980. 230 p. (in Russ).
2. Abshaev M.T., Karmov Kh.N. Detection of hail centers by radar-radiometric method. "Proceedings of the 4th All-Union Conference on Radio Meteorology." M., Gidrometeoizdat, 1978, P. 81–86. (in Russ).
3. Dinevich L. A., Tychina D. P., Shupyatsky A. B., Results of polarization studies of hail and hail clouds. "Proceedings of the 4th All-Union Conference on Radio Meteorology". M., Gidrometeoizdat, 1978. P. 63–70. (in Russ)
4. Van de Hulst G. Light scattering by small particles. M.: IL, 1961. 535 p. (in Russ)
5. Deimerjan D. Scattering of electromagnetic radiation by spherical polydisperse particles. M.: Mir, 1971. 165 p. (in Russ)
6. Zhakamikhov Kh. M., Abshaev A. M. Numerical study of the scattering of microradio waves by spectra of homogeneous and two-layer particles of precipitation // Meteorology and Hydrology. 2010. N8. P. 26–32. (in Russ).
7. Zhakamikhov Kh. M., Zhekamukhov M.K., Inyukhin V. S. The use of an inkjet model of hail cloud in the operational practice of city defense. Meteorology and Hydrology, 2010. No. 8. P. 41–48 (in Russ).
8. Zhekamukhov M.K., Zhakamikhov Kh. M. Theoretical model of hail clouds and active effects on hail processes using crystallizing reagents // Proc. HGI. 1980. Issue. 45. P. 3–39. (in Russ).
9. Zhekamukhov M.K., Zhakamikhov Kh. M. Some results of numerical modeling of the processes of city formation in the clouds during their natural development and under artificial influence // Tr. VGI. 1983. rel. 48. P. 13–27. (in Russ).
10. Lapcheva V. F. Determination of city-bearing and city-hazardous convective clouds. Proceedings of VGI, 1968. rel. 11. p. 86–97. (in Russ).
11. Sulakvelidze G. K., Glushkova N. I., Fedchenko L. M. Forecast of hail, thunderstorms and rainfall. L., Gidrometeoizdat, 1970. 188 p. (in Russ).
12. Ivanov A. A., Koloskov B. P. Methods of indicating depolarization zones in clouds and precipitation. "Proceedings of the 4th All-Union Conference on Radio Meteorology." M., Gidrometeoizdat, 1978. P. 81–86. (in Russ).

Поступило в редакцию 14.02.2020,
принята к публикации 02.03.2020

Сведения об авторах

- Жакамихов** Хажмудин Музакирович, кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения «Высокогорный геофизический институт». Адрес: Россия, Кабардино-Балкарская республика, г. Нальчик, пр. Ленина, д. 2, Scopus ID: 14834510400 , Researcher ID: AAE-1755-2020. Тел.: 8 (938) 690 15 56
- Калов** Хажбара Мамизович, доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения «Высокогорный геофизический институт». Адрес: Россия, Кабардино-Балкарская республика, г. Нальчик, пр. Ленина, д. 2, Scopus ID: 6505656548 , Researcher ID: V-6492-2018, Телефон: 8 (928) 080-59-42, E-mail: ruslan_kalov@mail.ru
- Кешева** Лара Асировна, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения «Высокогорный геофизический институт». Адрес: Россия, Кабардино-Балкарская республика, г. Нальчик, пр. Ленина, д. 2, Scopus ID: 57191577471, Researcher ID: K-4261-2015, Телефон (903) 490-47-75, E-mail: kesheva.lara@yandex.ru

About the authors

- Zhakamihov** Khazhmudin Muzakirovich, candidate of Physical and Mathematical Science, Leading Researcher of the Federal state budgetary institution «High-Mountain Geophysical Institute». Address: Russia, Kabardino-Balkar Republic, Nalchik, Lenin Ave., 2. Scopus ID: 14834510400 , Researcher ID: AAE-1755-2020. Phone: 8 (938) 690 15 56
- Kalov** Khazhbara Mamizovich, Doctor of Physical and Mathematical Science, Professor, chief scientific researcher of the Federal state budgetary institution «High-Mountain Geophysical Institute». Address: Russia, Kabardino-Balkar Republic, Nalchik, Lenin Ave., 2. Scopus ID: 6505656548 , Researcher ID V-6492-2018, Phone: 8 (928) 080-59-42, E-mail: ruslan_kalov@mail.ru
- Kesheva** Lara Asirovna, candidate of physical and mathematical sciences, senior research associate of department of physics of clouds of Federal state budgetary institution "High-Mountain Geophysical Institute". Scopus ID: 57191577471 Researcher ID: K-4261-2015, Phone: 8 (903) 490-47-75, E-mail: kesheva.lara@yandex.ru