

Лазерное зондирование нижней границы облаков

Е.А. Селедкина^а, А.В. Демин^а

^а Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики (ИТМО), 197101, пр. Кронверкский, 49, Санкт-Петербург, Россия

Аннотация

В статье представлены расчеты параметров микроструктуры нижней границы облаков, параметров поглощения лидарного излучения паром, азотом, углекислым газом степени поляризации лидарного сигнала двукратного рассеяния от облаков моделей С1, С2, С3.

Ключевые слова: облака нижней границы облаков; степень поляризации; микроструктура облака

1. Введение

Наибольшее влияние на безопасность полетов воздушных судов оказывает низкая облачность и связанная с ней, а также с осадками и туманами, ухудшенная видимость. Верный и своевременный прогноз указанных характеристик погоды позволил бы снизить на 20–35 % число авиакатастроф, связанных с плохой видимостью. Для прогноза погоды используют следующие характеристики облачности - высота ее верхней и нижней границ. В данной статье мы рассматриваем нижнюю границу облачности (НГО). В НГО снизу идет подпитка теплом и водяным паром, между ней и поверхностью земли зачастую имеется подоблачный слой аэрозолей, из нее выпадают осадки. Высота НГО зависит от характера выпадающих осадков, изменения температуры, влажности и скорости ветра с высотой, условий конвекции и адвекции, характера и рельефа подстилающей поверхности и ряда других факторов.

Для определения высоты границ облачности используются лидары как наземного, так и спутникового базирования, в связи с тем, что лидары обладают высокой чувствительностью при обнаружении аэрозольных примесей в атмосфере.

Но, не смотря на достаточно длительное использование лидаров, до сих пор нет решений многочисленных технических вопросов, среди них лазерное зондирование плотных аэрозольных образований.

2. Постановка задачи и ее решение

В многочисленном количестве работ представление данных лидарных экспериментов основывается на решении уравнения лазерного зондирования (УЛЗ), которое связывает мощность лидарного сигнала с характеристиками приемо-передающей системы лидара и параметрами анализируемой среды

$$p^{(1)}(r) = \frac{P_0 A c \tau_u}{8 \pi r^2} X(\pi, r) \sigma(r) e^{-2\tau(r)}, \quad (1)$$

где P_0 – мощность посылаемого в атмосферу излучения, A – площадь приемной апертуры лидара, c – скорость света в воздухе, τ_u – длительность импульса излучения лазера, $X(\pi, r)$ – индикатриса рассеяния в направлении π , $\sigma(r)$ – коэффициент рассеяния, $\tau(r)$ – оптическая толщина на участке трассы от 0 до r [1].

Из выше приведенного выражения следует, что на уровень лидарного сигнала влияет пространственное распределение коэффициента рассеяния и индикатриса обратного рассеяния. Данное выражение используется только для сред с малой оптической толщиной. Распространение излучения в более плотных средах сопровождается появлением многократного рассеяния, который математически может быть описан в приближении двукратного рассеяния [10].

Выражение для мощности двукратного рассеяния имеет вид:

$$p^{(2)}(r) = \frac{P_0 A c \tau_u}{16 \pi} e^{-2\tau(r)} [I_1 + I_2], \quad (2)$$

где

$$I_1 = \int_{\Theta_0}^{\pi/2} \int_H^r \frac{\sigma(z) \sigma(z_1)}{R(z, \gamma, r)} X(z, \gamma) X(z_1, \pi - \gamma) \sin \gamma d\gamma dz; \quad (3)$$

$$I_2 = \int_{\pi/2}^{\pi} \int_{z_H(\gamma)}^r \frac{\sigma(z) \sigma(z_1)}{R(z, \gamma, r)} X(z, \gamma) X(z_1, \pi - \gamma) \sin \gamma d\gamma dz; \quad (4)$$

$$R(z, \gamma, r) = r^2 - (2r - z) \left(z \sin \frac{\gamma}{2} \right);$$

$$z_1 = z + \frac{r(r-z)\cos\gamma}{r-z\sin^2\frac{\gamma}{2}}; \quad (5)$$

$$Z_{H(r)} \cong r \left(1 - \operatorname{tg} \frac{\theta_0}{4} \operatorname{ctg} \frac{\gamma}{2} \right). \quad (6)$$

θ_0 – угол поля зрения приемной системы.

Из выражения (2) делаем вывод, что мощность лидарного сигнала двукратного рассеяния зависит от угла поля зрения приемной антенны лидара, от глубины проникновения зондирующего импульса в облако и от характеристик среды: индикатрисы рассеяния в диапазоне углов от 0 до 180° и высотного хода (профиля) коэффициента рассеяния.

Мощность полного лидарного сигнала в приближении двукратного рассеяния:

$$P(r) = P^{(1)}(r) + P^{(2)}(r) = P^{(1)}(r)(1 + \delta(r)),$$

где $n(r)$

$$\delta(r) = \frac{P^{(2)}(r)}{P^{(1)}(r)} \quad (7)$$

Вначале, рассмотрим влияние микрофизических свойств облаков на излучение[2].

При моделировании микрофизических свойств облаков широко используется функция распределения частиц облаков по размерам в виде гамма-распределения, плотность которого равняется:

$$n(r) = \frac{N_0}{\Gamma(\alpha+1)\beta^{(\alpha+1)}} r^\alpha * \exp\left(-\frac{r}{\beta}\right), \quad (8)$$

где N_0 – количество частиц радиуса r , N_0 – концентрация частиц, Γ -гамма-функция, α – параметр формы распределения, β – параметр масштаба распределения.

Из формулы 8 для плотности гамма-распределения, рассмотрим основные микрофизические параметры[3-5,7]:

а) средний радиус частицы:

$$r_a = \beta(\alpha+1), \quad (9)$$

б) модальный радиус частицы:

$$r_m = \beta\alpha, \quad (10)$$

в) средний объемный радиус:

$$r_v = \beta\sqrt{(\alpha+1)(\alpha+2)(\alpha+3)}, \quad (11)$$

г) эффективный радиус:

$$r_e = \beta(\alpha+3), \quad (12)$$

д) средний объем частицы:

$$V_a = \frac{3}{4}\pi\beta^3(\alpha+1)(\alpha+2)(\alpha+3), \quad (13)$$

е) средняя площадь поверхности частицы:

$$S_a = 4\pi\beta^2(\alpha+1)(\alpha+2), \quad (14)$$

ж) водность:

$$LWS = \frac{3}{4}\pi\rho N\beta^3(\alpha+1)(\alpha+2)(\alpha+3), \quad (15)$$

Таблица 1. Микрофизические параметры облаков нижней границы

Тип облаков	Концентрация (см ³)	Водность (г м ⁻³)	ΔH	α	β	r_m	\bar{r}	r_e
StI	440	0,22	500,1000	4,8	0,7	3,5	4,2	5,7
StII	120	0,05	250,500	1,8	1,3	2,3	3,5	6,0
ScI	350	0,14	500,1000	6,4	0,5	3,5	4,1	5,1
ScII	150	0,47	500,1000	9,4	0,8	7,5	8,3	9,9
Ns	280	0,50	2500,3000	1,7	2,1	3,5	5,6	9,8

Для определения коэффициентов ослабления и поглощения использованы формулы, полученные Хворостьяновым.

$$\sigma_{осл} = \frac{3\delta}{2\bar{r}p_1} \frac{\alpha+1}{\alpha+3} \left(1 + \frac{\lambda^2}{8\pi^2\bar{r}^2} \frac{(\alpha+1)}{(\alpha+2)} \frac{(n-1)^2 - k^2}{[(n-1)^2 + k^2]^2} \right), \quad (16)$$

$$\sigma_{погл} = \frac{3\delta}{4\bar{r}p_1} \frac{\alpha+1}{\alpha+3} \left(1 - \left(1 + \frac{8\pi\bar{r}k}{\lambda(\alpha+1)} \right)^{-(\alpha+3)} \right), \quad (17)$$

где p_1 - плотность воды, δ - водность облака, \bar{r} - средний радиус распределения, α - параметр гамма распределения, λ - длина волны, n - действительная часть коэффициента преломления среды, k - мнимая часть, отвечающая за поглощение средой [10-12].

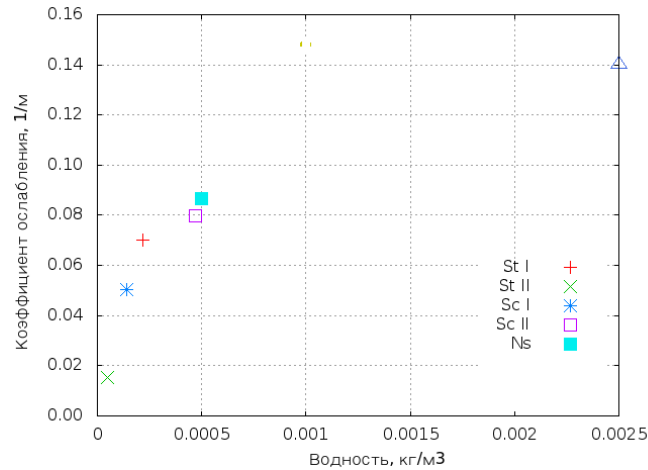


Рис. 1. Зависимость коэффициента ослабления от водности.

Для описания поглощения лидарного излучения H_2O , CO_2 и O_3 используем метод расчета функции пропускания, разработанный Розановым и Фролькисо [13-15]

Селективное газовое поглощение атмосферных газов в полосах пропускания определяется функцией пропускания в зависимости от трех параметров: \bar{U} , \bar{P} , \bar{T} .

$$F_{\Delta\nu}(p, p') = \exp \left(\frac{-\beta_{\Delta\nu}(\bar{T})\bar{U}(p, p')}{\sqrt{1 + \frac{\alpha_{\Delta\nu}(\bar{T})\bar{U}(p, p')}{\bar{P}(p, p')}}} \right), \quad (18)$$

где $\bar{U}(p, p') = \frac{\beta_d}{g} \int_p^{p'} \frac{p(p'')}{p_0(p'')} dp''$ - приведенная масса;

$\bar{P}(p, p') = \frac{1}{\bar{U}(p, p')} \frac{\beta_d}{g} \int_p^{p'} \frac{p(p'')}{p_0(p'')} dp''$ - приведенное давление;

$\bar{T}(p, p') = \frac{1}{\bar{U}(p, p')} \frac{\beta_d}{g} \int_p^{p'} \frac{p(p'')}{p_0(p'')} T(p'') dp''$ - приведенная температура;

$\alpha_{\Delta\nu}(\bar{T})$ и $\beta_{\Delta\nu}(\bar{T})$ - коэффициенты статистической модели полосы поглощения;

p и p_0 - плотность поглощения газа и воздуха; g - ускорение свободного падения; $\beta_d = 1.66$ - коэффициент диффузности, $\Delta\nu$ - спектральный интервал, $\bar{\nu}$ - середина интервала.

Так же важным моментом является анализ состояния поляризации лидарного сигнала.

Степень поляризации светового пучка обычно описывают четырьмя параметрами, предложенными Стоксом. Все параметры Стокса можно рассматривать как компоненты единого вектора в четырехмерном пространстве, что упрощает процедуру описания процессов взаимодействия поляризованного излучения со средой.

Таблица 2. Коэффициенты $\alpha_{\Delta\nu}$, $\beta_{\Delta\nu}$ в разных спектральных интервалах для водяного пара, углекислого газа и озона при различных температурах среды.

$\bar{\nu}$	$\Delta\nu$, см ⁻¹	Газ	$\alpha_{\Delta\nu}$, см ² /атм г					$\beta_{\Delta\nu}$, см ² /атм г				
			200 К	225 К	250 К	275 К	300 К	200 К	225 К	250 К	275 К	300 К
70	140	H ₂ O	42716,0	36706,6	32009,6	28234,7	25137,1	4309,5	4258,9	4204,1	4143,8	4080,3
		O ₃	10,8	10,2	9,8	9,4	9,2	29,4	32,4	35,4	38,3	41,4
210	140	H ₂ O	80515,5	75553,8	70854,5	66548,8	62390,0	5143,9	5660,3	613,1	6510,6	6861,8
380	200	H ₂ O	7372,2	9561,5	11728,5	13776,2	1653,1	291,1	432,0	599	787,7	993,9
530	100	H ₂ O	119,6	154,4	189,6	224,3	260,0	4,5	7,1	10,4	14,6	19,9
		CO ₂	0,02	0,06	0,13	0,24	0,39	0,007	0,02	0,05	0,12	0,23
610	60	H ₂ O	45,5	74,4	112,1	158,0	210,4	2,0	3,8	6,4	10,0	14,6
		O ₃	2,9	3,3	3,6	3,8	4,0	2,6	3,2	3,9	4,5	5,0
		CO ₂	55,4	67,0	76,4	84,2	90,0	19,7	29,4	41,5	55,3	71,1
670	60	H ₂ O	12,6	20	30,4	44,1	61,2	0,5	0,9	1,5	2,5	3,7
		O ₃	16,2	14,3	2,8	11,6	10,7	62,8	62,1	61,3	60,4	59,4
		CO ₂	4361,8	3522,5	2865,3	2349,8	1945,2	1932,6	1946,1	1965,9	1992,5	2026,3
730	60	H ₂ O	4,4	7,3	11,8	18,3	27,4	0,16	0,3	0,6	1,0	1,6
		O ₃	18,5	17	15,0	13,5	12,2	72,5	70,3	68,3	66,3	64,3
		CO ₂	34,8	46,5	56,9	65,4	71,9	9,2	15,4	23,5	33,3	44,9
870	220	H ₂ O	0,9	1,4	2,2	3,2	4,7	0,02	0,05	0,09	0,15	0,25
		O ₃	3,4	3,1	3,0	3,0	3,2	2,1	2,6	3,1	3,8	4,7
		CO ₂	0,03	0,08	0,16	0,29	0,47	0,006	0,02	0,04	0,1	0,18
1020	80	H ₂ O	0,04	0,08	0,14	0,23	0,37	0,002	0,005	0,011	0,021	0,04
		O ₃	406,7	328,8	270,9	227,2	194,0	2002,7	1973,3	1947,7	1926,6	1910,1
		CO ₂	0,04	0,10	0,19	0,31	0,48	0,004	0,011	0,026	0,054	0,10
1120	120	H ₂ O	0,08	1,4	2,2	3,1	4,1	0,04	0,7	0,13	0,20	0,30
		O ₃	17,1	18,9	20,3	21,5	22,4	31,8	37,7	43,4	48,8	53,8
		CO ₂	0,04	0,09	0,17	0,29	0,43	0,003	0,009	0,02	0,04	0,07
1210	60	H ₂ O	1,8	2,9	4,3	5,9	7,7	0,14	0,3	0,4	0,7	1,0
		O ₃	171	18,1	20,3	21,	22,4	0,02	0,02	0,02	0,02	0,03
1270	60	H ₂ O	8,4	12,1	16,8	23,0	30,9	1,0	1,6	2,6	4,0	6,0
1330	60	H ₂ O	43,7	75,4	117,0	166,8	222,2	6,8	12,0	19,3	28,8	40,5
1390	60	H ₂ O	1321,5	1577,8	1781,5	1935,7	2046,4	123,4	167,2	212,4	257,6	301,6
1550	260	H ₂ O	10688,8	8848,8	7463,5	6385,8	5526,7	1681,3	1637,2	1597,4	1561,2	1528,0
1940	520	H ₂ O	6523,8	5527,8	4751,1	4130	3623,7	224,3	231,0	236,5	241,0	244,8
		O ₃	57,1	49,8	44,3	40	36,6	32,9	32,8	32,6	32,4	32,1
		CO ₂	0,87	0,70	0,58	0,50	0,43	0,09	0,10	0,11	0,12	0,13
2230	60	CO ₂	95	92,6	87,4	80,9	73,7	16	20,8	26	31,6	37,4

$$S = \begin{pmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{pmatrix}, \quad (19)$$

где S_0 -полная интенсивность пучка; S_1 -равняется разности интенсивностей линейно поляризованного света для направлений 0 и 90°; S_2 -для направлений 45 и 135°; S_3 -равен разности интенсивностей света с правой и левой круговыми поляризациями.

Вектор Стокса лидарного сигнала однократного и двукратного рассеяния определяется следующим образом:

$$S(r) = S^{(1)}(r) + S^{(2)}(r), \quad (20)$$

где $S^{(1)}(r)$ и $S^{(2)}(r)$ -векторы Стокса однократно и двукратно рассеянного излучения.

$$S^{(1)}(r) = \frac{AP_0 c \tau_H}{2r^2} M_\pi(r) S^0 s^{-2\tau(r)}, \quad (21)$$

где S^0 -нормированный вектор Стокса посылаемого излучения, $M_\pi(r)$ -матрица обратного рассеяния света.

$$S^2(r) = \frac{r^2 p^{(1)}(r)}{4\pi X(\pi, r)} \int_0^{\pi/2} \int_{z'(r)}^r \frac{\sigma(z) \sin \gamma}{K(r, z, \gamma)} \times \left[\int_0^{2\pi} G(r, \varphi, \gamma, \pi - \gamma) d\varphi + \int_0^{2\pi} G(r, \varphi, \pi - \gamma, \gamma) d\varphi \right] dz d\varphi d\gamma, \quad (22)$$

где

$$G(r, \varphi, \pi - \gamma, \gamma) = R(\varphi) M(r, \pi - \gamma) M(r, \gamma) R(\varphi) S^0 \quad (23)$$

- интегральный матричный вектор-параметр, $R(\varphi)$ - оператор поворота плоскости референции на угол φ относительно базиса

$$R(\varphi) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos 2\varphi & \sin 2\varphi & 0 \\ 0 & -\sin 2\varphi & \cos 2\varphi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (24)$$

$$z'(\gamma) = r \left(1 - \operatorname{tg} \frac{\Theta_0}{2} \operatorname{ctg} \frac{\gamma}{2} \right) \quad (25)$$

$M(\gamma)$ - матрица рассеяния света облака.

$$M(\gamma) = \begin{pmatrix} f_{11} & f_{12} & 0 & 0 \\ f_{21} & f_{22} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & f_{33} & f_{34} \\ 0 & 0 & f_{43} & f_{44} \end{pmatrix} \quad (26)$$

где

$$f_{11} = f_{22} = \frac{P_1 + P_2}{2}; \quad f_{12} = f_{21} = \frac{P_1 - P_2}{2}; \quad f_{33} = f_{44} = P_3; \quad f_{43} = f_{34} = P_4 \quad (27)$$

P_i - элементы матрицы рассеянного света, рассчитанные Дейрменджаном [6,8].

Степень поляризации вычисляется следующим образом:

$$p_{\parallel} = \frac{\int_0^{\pi/2} \left[P_1(\gamma) P_1(\pi - \gamma) + P_2(\gamma) P_2(\pi - \gamma) - 2P_3(\gamma) P_3(\pi - \gamma) + 2P_4(\gamma) P_4(\pi - \gamma) \operatorname{tg} \frac{\gamma}{2} d\gamma \right]}{2 \int_0^{\pi/2} \left[P_1(\pi - \gamma) P_1(\gamma) + P_2(\pi - \gamma) P_2(\gamma) \operatorname{tg} \frac{\gamma}{2} d\gamma \right]} \quad (28)$$

В таблице 3 представлен расчет моделей облаков C1, C2, C3[9].

3. Заключение

В данной статье проанализированы проблемы лидарного зондирования нижней границы облаков и предложены их решения. Представлены расчеты параметров микроструктуры облаков, так же параметров поглощения лидарного излучения паром, азотом, углекислым газом.. Приведены расчеты степени поляризации на примере облаков моделей C1, C2, C3.

Таблица 3. Степень поляризации облаков

Модель облака	S^0 зондирующего излучения	S^2	P
C1	$(1 \ 1 \ 0 \ 0)^T$	$(1 \ 0,48 \ 0 \ 0)^T$	0,48
	$(1 \ -1 \ 0 \ 0)^T$	$(1 \ 0,48 \ 0 \ 0)^T$	0,48
	$(1 \ 0 \ 1 \ 0)^T$	$(1 \ 0 \ 0,48 \ 0)^T$	0,48
	$(1 \ 0 \ 0 \ 1)^T$	$(1 \ 0 \ 0 \ 0,5)^T$	0,05
C2	$(1 \ 1 \ 0 \ 0)^T$	$(1 \ 0,48 \ 0 \ 0)^T$	0,48
	$(1 \ -1 \ 0 \ 0)^T$	$(1 \ 0,48 \ 0 \ 0)^T$	0,48
	$(1 \ 0 \ 1 \ 0)^T$	$(1 \ 0 \ 0,48 \ 0)^T$	0,48
	$(1 \ 0 \ 0 \ 1)^T$	$(1 \ 0 \ 0 \ 0,03)^T$	0,03
C3	$(1 \ 1 \ 0 \ 0)^T$	$(1 \ 0,46 \ 0 \ 0)^T$	0,46
	$(1 \ -1 \ 0 \ 0)^T$	$(1 \ 0,46 \ 0 \ 0)^T$	0,46
	$(1 \ 0 \ 1 \ 0)^T$	$(1 \ 0 \ 0,46 \ 0)^T$	0,46
	$(1 \ 0 \ 0 \ 1)^T$	$(1 \ 0 \ 0 \ 0,08)^T$	0,008

Литература

- [1] Зуев, В.Е. Лазерное зондирование промышленных аэрозолей / В.Е. Зуев, Б.В. Кауль, И.В. Самохвалов и др. -Новосибирск: Наука, 1986. – 185 с.
- [2] Веретенников, В.В. Определение оптических и микроструктурных характеристик капельных облаков при лазерном зондировании с учетом многократного рассеяния / В.В. Веретенников, А.И. Абрамочкин // Оптика атмосферы и океана. - 2009. - Т.22, № 7. - С. 671–680.
- [3] Коханенко, Г.П. . Авиалидарные исследования аэрозоля над Байкальским ЦБК/ Г.П. Коханенко, И.Э. Пеннер, В.С. Шаманаев // Оптика атмосферы и океана. – 1996. – Т. 9, № 10. – С. 1399–1407.
- [4] Черемисин, А.А. Перенос полярных стратосферных облаков из Арктики к Томску в январе 2010 г. / А.А. Черемисин, В.Н. Маричев, П.В. Новиков // Оптика атмосферы и океана. –2013. –Т. 26 № 2. – С. 93–99.
- [5] Пеннер, И. Э. Лидарные исследования облачности над океаном / И.Э. Пеннер, Г.П. Коханенко, В.С. Шаманаев // Оптика атмосферы и океана. – 2000. – Т. 13, № 4. – С. 379–385.
- [6] Розанов, Е.В. Влияние некоторых малых составляющих на радиационный режим атмосферы в инфракрасном диапазоне/ Е.В. Розанов, Ю.М. Тимофеев, В.А. Фролькис // Известия АН СССР. Физика атмосферы и океана. – 1981. – Т 17, № 4. – С. 384–391.
- [7] Розанов, Е.В. Оценка влияния температурной зависимости функции пропускания в ИК-диапазоне на чувствительность энергобалансовой климатической модели / Е.В. Розанов, В.А. Фролькис // Известия АН СССР. Физика атмосферы и океана. – 1993. – Т 29, № 4. – С. 509–514.
- [8] Шаманаев, В. С. . Оптические неоднородности нижней границы облачности / В.С. Шаманаев, И.Э. Пеннер, Г.П. Коханенко // Оптика атмосферы и океана. – 2007. – Т. 20, № 2. – С. 122–126.
- [9] Bryukhanova, V.V. Calculation of polarization characteristics of lidar return from clouds in double scattering approach / V.V. Bryukhanova // Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering. - 2014. - Vol. 9292. - P. 92922C-1-92922C-7.
- [10] Bryukhanova, V.V. Estimation of the applicability of the double scattering approximation for hydrooptical laser sensing / V.V. Bryukhanova, V.S. Shamanaev // Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering. -2014.- Vol. -9292. -P. 92923N-1-92923N-7.
- [11] Slingo, A. A. GCM parameterization for the shortwave radiative properties of water clouds // J. Atmos. Sci. – 1989. – V. 46. – P. 1419–1427.
- [12] Hogan, R.J. Verification of cloud-fraction forecasts / R.J. Hogan, E.J. O'Connor, A.J. Illingworth // Quart. J. Royal Meteorological Society. – 2009. – V. 135. – Issue 643. – P. 1494–1511.
- [13] Stephens, G.L. The Relevance of the Microphysical and Radiative Properties of Cirrus Clouds to Climate and Climatic Feedback / G.L. Stephens, S.C. Tsay, P.W. Stackhouse, P.J. Flatau // J. Atmos. Sci. – 1990. – V. 47. – P. 1742–1754.
- [14] Rockel, B. Parameterization of broad band radioactive transfer properties software, ice and mixed clouds / B. Rockel, E. Raschke, B. Weyres // Beitr. Phys. Atm. – 1991. – V. 64. – P. 1–12.
- [15] Volkov, S.N. Assessing and improving the accuracy of T-matrix calculation of homogeneous particles with point-group symmetries / S.N. Volkov, I.V. Samokhvalov, D. Kim // JQSRT.-2013.-Vol. 123. –P. 169-175.