«Оптика атмосферы и океана», **5**, № 8 (1992)

УДК 551.463 5

В.М. Грейсух, Л.С. Долин, И.М. Левин

О ВИДИМОСТИ ЧЕРЕЗ ОБЛАКА

На основе рассчитанные методом Монте-Карло значений пропускания и альбедо плоского облачного слоя проводится расчет контраста при наблюдении объектов через облака. Показано, что крупные (с размером в несколько километров) высококонтрастные объекты могут быть видны через сплошной облачный слой с оптической толщиной $\tau \le 10$, а мелкие (менее 100 м) объекты — только через тонкие облака верхнего яруса. Сделана оценка возможности наблюдения через облака с помощью активной импульсной системы видения. При мощности излучателя ~5 МВт возможно наблюдение крупных объектов с высоты 100 км через облака с $\tau \approx 30$.

Теория переноса изображения через облачные слои с учетом их микроструктуры, неоднородности и флуктуаций оптических характеристик подробно изложена в [1]. Однако строгий расчет видимости реальных объектов через реальные облака сделать трудно ввиду ограниченности экспериментальных данных о микроструктуре облаков и ее вариациях. Здесь мы рассмотрим более простую задачу: оценить «сверху», что можно увидеть с самолета или из космоса через сплошной облачный слой. При этом будем иметь в виду, что наиболее изученной оптической характеристикой облаков является их оптическая толщина τ [2—5]. По данным [2, 3] τ для однослойных облаков нижнего и среднего ярусов лежит в пределах 5 ... 70 со средним значением $\tau = 20$, для многослойных облаков τ может достигать нескольких сотен, а для облаков верхнего яруса не превосходит нескольких единиц [4]. Многолетними измерениями оптической толщины облаков над океаном [5, 6] установлено, что облака над океаном в среднем значительно прозрачнее, чем над сушей. Например, по измерениям над Атлантическим океаном с вероятностью $P = 20\%$ $\tau \le 6$, с $P = 50\%$ $\tau \le 15$ и с $P = 80\%$ $\tau \le 25$, в то время как над сушей соответствующие тем же вероятностям оптические толщины составляют 30, 50 и 90.

Запишем известное выражение для видимого контраста при наблюдении бесконечно протяженной плоскости с пространственной частотой элементов ν через слой рассеивающей среды [7]

$$K = K_0\, k(\nu)/(1 + B_Д/\bar{B}), \tag{1}$$

где $K_0 = (R_{об} - R_ф)/(R_{об} + R_ф)$ — истинный контраст между объектом и фоном с коэффициентами отражения соответственно $R_{об}$ и $R_ф$; $k(\nu)$ — частотно-контрастная характеристика (ЧКХ) рассеивающего слоя: $B_Д$ — яркость дымки (помеха обратного рассеяния). $\bar{B} = 0,5(B_{об} + B_ф)$ — средняя яркость в изображении без учета дымки. Для случая естественного освещения при зенитном угле Солнца θ и наблюдения через облака в надир $B_д = RE/\pi$, $\bar{B} = \bar{R}T(\mu)T(1)E/\pi$, где R — альбедо облаков; E — облученность на верхней границе облачности; $T(1)$ и $T(\mu)$ — пропускание облачного слоя при $\cos\theta = 1$ и $\cos\theta = \mu$, $\bar{R} = 0,5(R_{об} + R_ф)$. Тогда соотношение (1) принимает вид

$$K = K_0 k(\nu)/[1 + R/(\bar{R}T(\mu)T(1))]\ . \tag{2}$$

Формулы для расчета пропускания и альбедо слабопоглощающих слоев [8] позволяют найти R и T для оптически толстых слоев ($\tau \gtrsim 5$):

$$T(\mu) = g(\mu)\,\mathrm{sh}y/[\mathrm{sh}(x + y)]\ , \tag{3}$$

$$y = 4q\sqrt{\frac{1-\Lambda}{q\Lambda}}\ ,\ x = \sqrt{\frac{1-\Lambda}{q\Lambda}}\,\tau\ ,\ g(\mu) = \frac{1}{3} + \mu\ ,\ q = 1/(3 - x_1)\ ,\ R(\mu) = \mathrm{e}^{-y} - T(\mu)\mathrm{e}^{-x-y}\ , \tag{4}$$

x_1 — первый член разложения индикатрисы по полиномам Лежандра; Λ — вероятность выживания фотона.

Мы провели расчет функций $T(\tau)$ и $R(\tau)$ методом Монте-Карло для $\tau = 0 \div 40$, $\Lambda = 0,995$, 0,998 и 1,0 (именно в этих пределах, согласно [3], меняется Λ в реальных облаках) для индикатрисы рассеяния Дейрменджана $C1$ ($x_1 = 2,505$), и нескольких высот Солнца ($\mu = 1$; 0,9; 0,7 и 0,5). Расчет велся прямым моделированием. При этом его алгоритм с помощью различных приемов (в частности, специальной подготовкой индикатрисы рассеяния) был усовершенствован таким образом, что эффективность расчета значительно увеличилась. Погрешность моделирования нигде не превышала 3%. Некоторые результаты его приведены в табл. 1.

Таблица 1

Пропускание (T) и альбедо (R) плоскою облачного слоя (расчет методом Монте-Карло)

τ	$\Lambda=1$		$\Lambda=0{,}995$			
	$\mu=1$	$\mu=0{,}5$	$\mu=1$		$\mu=0{,}5$	
	T	T	T	R	T	R
1	0,959	0,842	0,955	0,040	0,843	0,154
2	0,909	0,730	0,899	0,089	0,714	0,262
3	0,858	0,649	0,842	0,137	0,628	0,337
4	0,809	0,591	0,788	0,182	0,565	0,390
5	0,769	0,544	0,743	0,219	0,514	0,432
7	0,687	0,472	0,650	0,292	0,435	0,494
10	0,596	0,400	0,545	0,366	0,354	0,552
12	0,547	0,364	0,486	0,405	0,313	0,579
14	0,502	0,333	0,434	0,438	0,277	0,602
16	0,465	0,306	0,388	0,463	0,246	0,619
18	0,437	0,284	0,351	0,482	0,220	0,633
20	0,408	0,265	0,317	0,498	0,198	0,644
30	0,309	0,198	0,195	0,545	0,120	0,674
40	0,244	0,158	0,122	0,564	0,074	0,685

Примечание. При $\Lambda = 1$ для каждого τ $T+R = 1$.

Сравнение результатов расчетов методом Монте-Карло и по формулам (3), (4) показало, что они имеют достаточно высокую точность для больших τ. Погрешность расчета пропускания по (3) $\delta \le 12\%$ при $\tau \ge 5$ и $\delta \le 5\%$ при $\tau \ge 15$, при этом погрешность уменьшается с ростом τ и увеличением угла падения θ. Погрешность расчета альбедо по (4) $\delta \le 20\%$ при $\tau \ge 5$. Для расчета T и R при малых $\tau \le 3$ формулы (3), (4) вообще непригодны; они могут приводить к значениям $T > 1$ и отрицательным R. Используя значения T и R из табл. 1 и формулу (2), рассчитаем видимость объектов через сплошной облачный слой. Поскольку мы делаем оценки «сверху», возьмем самые благоприятные условия наблюдения: наиболее высокий истинный контраст K_0 и наиболее крупные объекты ($k(\nu) \equiv 1$). Будем рассматривать два случая: светлый песок ($R_{об} = 0{,}3$) и зелень '($R_{об} = 0{,}1$) на фоне воды ($R_ф = 0{,}05$). В первом случае $\bar{R} = 0{,}175$, $K_0 = 0{,}71$, во втором — $\bar{R} = 0{,}075$, $K_0 = 0{,}33$.

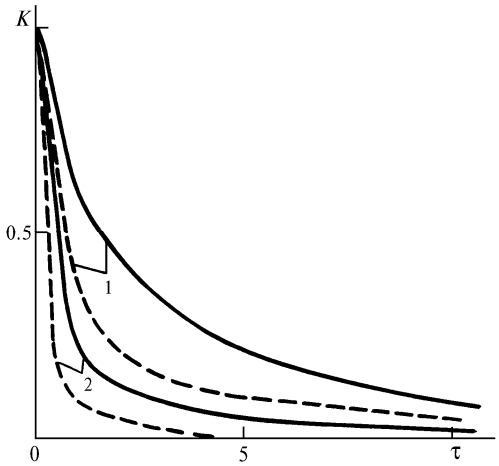

Рис. 1. Зависимость контраста крупных объектов (песок (*1*) и зелень (*2*) на фоне воды), наблюдаемых через сплошной облачный слой, от его оптической толщины τ. При $\mu = 1$; $\Lambda = 1$ (сплошные линии) и $\mu = 0{,}5$, $\Lambda = 0{,}995$ (штриховые)

Результаты расчета контраста по (2) показаны на рис. 1. Для оценки дальности видимости надо знать пороговую контрастную чувствительность ($K_п$) фотоприемника (глаза). Очевидно, при наблюдении объектов через такой неоднородный и флуктуирующий фон, как облачный слой, $K_п$ заведомо больше, чем величина $K_п^{(0)} \approx 0{,}01$, обычно принимаемая при наблюдении в отсутствие флуктуаций.

Примем величину коэффициента вариации сигнала $\alpha = 0{,}1$, которая, конечно, достаточно условна и в неблагоприятных для наблюдения условиях может быть и значительно больше. В этом случае (когда $\alpha \gg K_{п}^{(0)}$) пороговая контрастная чувствительность [7] $K_{п} \approx \alpha \approx 0{,}1$. Таким образом, как видно из рис. 1, наиболее светлые крупные объекты при высоком исходном контрасте (песок на фоне воды) и благоприятных условиях наблюдения (высокое солнце, не очень большие (<10%) флуктуации альбедо облаков) могут быть видны и через относительно плотные облака ($\tau < 10$), а более темные (зелень) — при $\tau < 3$, т.е. только через облака верхнего яруса.

Возникает естественный вопрос, а какие же объекты можно считать крупными, т. е. для каких пространственных частот ν можно считать $k(\nu) \equiv 1$? На рис. 2 приведены зависимости ЧКХ от размера элемента $d_{эл} = 1/2\nu$, рассчитанные в соответствии с соотношениями [1, 7]:

$$k(\nu) = k_{од}(\nu, z_0 + H)/k_{од}(\nu, H)\ , \tag{5}$$

$$k_{од}(\nu, z) = \exp\left[-\sigma z\left(1 - \frac{1}{\tilde{\nu}}\ln(\tilde{\nu} + \sqrt{1 + \tilde{\nu}^2})\right)\right] \tag{6}$$

где z_0 — толщина облачного слоя; H — высота его нижней границы; σ — показатель рассеяния облачной среды, $\tilde{\nu} = 2\pi z\nu a^{-1} = 2\pi z(ad_{эл})^{-1}$ — приведенная пространственная частота (a — параметр аппроксимации индикатрисы рассеяния функцией $\exp(-a\theta)/\theta$).

Формула (5) описывает ЧКХ системы «слой—зазор», т. е. рассеивающего слоя, удаленного от объекта наблюдения на расстояние H. формула (6) — ЧКХ однородного слоя рассеивающей среды (при $H = 0$). При расчете по (5), (6) принималось $\sigma = 16$ км$^{-1}$, что соответствует модели облака $C1$ Дейрменджана [9]. Параметр a для этой модели был нами рассчитан непосредственно по индикатрисе рассеяния и оказался равным $a = 4{,}7$. Расчеты проводились для нескольких значений $\tau = \sigma z_0$ и для двух соотношений между H и z_0: $H/z_0 = 0{,}25$ и $1{,}0$.

Из рисунка видно, что дли оптически тонких слоев ($\tau = 1-2$) крупными могут считаться объекты с характерными размерами 0,1—0.5 км, для более толстых облаков ($\tau = 5-10$) — с размерами 1—5 км. Таким образом, объекты с размерами в несколько километров могут быть видны через сплошной облачный слой вплоть до $\tau = 10$ (см. рис. 1). С этим утверждением согласуется устное сообщение космонавта О.Г. Макарова, рассказавшего нам, что он отчетливо видел из космоса Волгу при облачности 10 баллов.

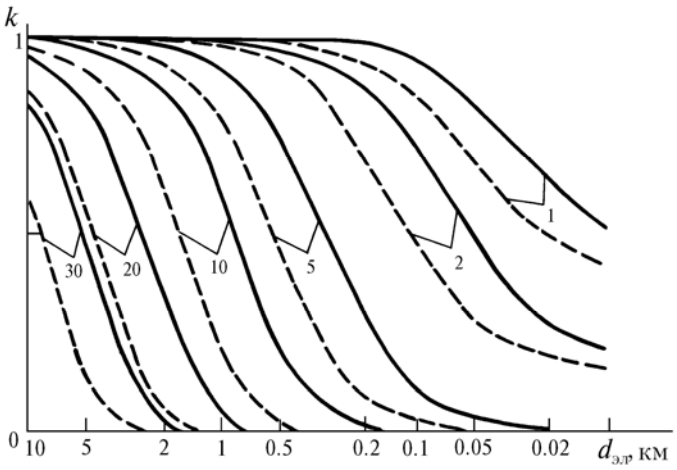

Рис. 2. Частотно-контрастные характеристики облачного слоя при $\sigma = 16$ км$^{-1}$ дли $H/z_0 = 0{,}25$ (сплошные линии) и $H/z_0 = 1{,}0$ (штриховые). Цифры у кривых соответствуют оптической толщине облака $\tau = \sigma z_0$

Рис. 3 иллюстрирует дальность видимости мелких объектов через облачный слой. Пунктирные кривые относятся к элементам с пространственной частотой ν_a, соответствующей асимптотическому значению $k_{од} = \exp(-\tau)$. Легко убедиться, что такие ν соответствуют для нашего случая элементам порядка метра. Заметим, что при $k_{од} = \exp(-\tau)$ частотно-контрастная характеристика $k(\nu) \equiv k_{од}(\nu)$ и не зависит от высоты облачности H. Из рис. 3 видно- что мелкие (< 100 м) объекты могут быть видны только через тонкие облака верхнего яруса.

В заключение сделаем оценку возможности наблюдения сквозь облака с помощью активной системы видения с импульсной подсветкой. Хорошо известный метод импульсного стробирования [7] (приемник держится «запертым», пока короткий световой импульс распространяется от излучателя до объекта и

обратно и отпирается в момент прихода в приемник отраженного импульса) позволяет практически полностью избавиться от помехи обратного рассеяния. В этом случае в (1) можно положить $B_д = 0$, т.е.

$$K = K_0 k(\nu) \ . \tag{7}$$

Из рис. 2 видно, что достаточно высокий контраст при наблюдении крупных объектов (1 км < $d_{эл}$ < 10 км) с помощью импульсной системы обеспечивается не только при $\tau = 10$, но и при $\tau = 20$ и даже (если $d_{эл} > 5$ км) при $\tau = 30$. Однако в этом случае предельная дальность видимости будет определяться энергетической чувствительностью системы, т.е. отношением сигнал/шум. Это отношение выражается формулами [7]

$$\delta = \delta_0 / \sqrt{1 + \alpha^2 \delta_0^2 / 4K^2} \ , \tag{8}$$

$$\delta_0 = K \sqrt{2W\eta_ф / e_э} \ ; \tag{9}$$

$$W = \frac{W_0 T^2 \bar{R}\, \Sigma_п \beta^2}{\pi[L\beta + (z_0 + H)\bar{\theta}]^2} \ . \tag{10}$$

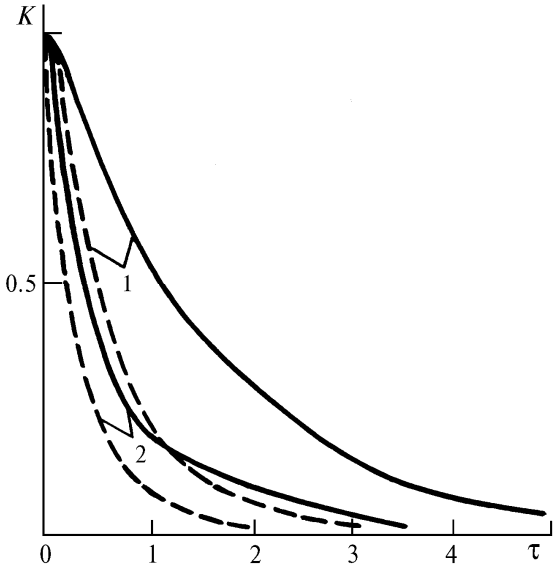

Рис. 3. Зависимость контраста мелких объектов (песок (*1*) и зелень (*2*) на фоне воды), наблюдаемых через сплошной облачный слой, от его оптической толщины τ при $\mu = 1$. $\Lambda = 1$ и $d_{эл} = 0{,}1$ км (сплошные линии) и $d_{эл} \to 0$ (штриховые)

Здесь δ_0 — отношение сигнал/шум, определяемое только дробовыми флуктуациями фототока, т.е. при отсутствии внешних шумов (при $\alpha = 0$); W — средняя энергия на фотокатоде приемника; $\eta_ф$ — чувствительность фотокатода, $e_э = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ кул — заряд электрона; W_0 — исходная энергия светового импульса; $\Sigma_п$ — площадь входного зрачка объектива приемника, умноженная на его пропускание; 2β — угол излучения, равный углу зрения приемника; $\theta = 52°$ [10] — средний угол выхода фотона из облака; L — расстояние от системы наблюдения до верхней границы облачности. Как видно из (8)—(10), величина δ_0 тем больше, чем больше исходная энергия импульса; однако, при сколь угодно больших W_0 и δ_0, если контраст $K \approx \alpha/2$, отношение сигнал/шум δ будет меньше единицы. Поэтому наблюдение и с помощью импульсной системы возможно только при достаточно больших контрастах. Чтобы определить возможность наблюдения через облако при импульсной подсветке, можно задаться пороговым значением сигнал/ шум $\delta_{пор}$ и, заменив в уравнении (8) δ на $\delta_{пор}$, решить его (с учетом (7), (9), (10)) относительно энергии W_0. В табл. 2 представлены результаты такого расчета для следующих условий: $\eta_ф = 0{,}04$ /Вт ($\approx$ 100 мка/лм), диаметр входного зрачка 200 мм, объекты наблюдения те же, что и ранее (песок, зелень), высота L = 1,100 и 300 км, $z_0 + H = 1 \div 5$ км, угол $\beta = 0{,}01, \ldots, 0{,}1$, $\delta_{пор} = 2$. Значения T брались из табл. 1. В последней графе табл. 2 записаны значения мощности P_0 исходного импульса в МВт для длительности импульса $\Delta t = 10$ нс ($P_0 = W/\Delta t$). Нижние значения W_0 и P_0 соответствуют светлым объектам (песок), верхние — темным (зелень).

Таблица 2

Требуемые энергии и мощности импульса при наблюдении через облачный слой

L, км ($d_{об}$, км, a)	τ	z_0+H, км	W, Дж	P_0, МВт ($\Delta t = 10$ нс)
300 (5; 0,03)	20	<2	0,01...0,05	1...5
		5	0,02...0,1	2...10
	30	<2	0,03...0,15	3...15
		5	0,07...0,35	7...35
100 (5; 0,1)	20	<2	0,0015...0,0075	0,15...0,75
		5	0,002...0,01	0,2...1
	30	<2	0,004...0,02	0,4...2
		5	0,007...0,035	0,7...3,5
1 (0,5; 0,01)	20	<2	0,002...0,01	0,2...1
		5	0,01...0,05	1...5
	30	<2	0,01...0,05	1...5
		5	0,07...0,35	7...35

Из табл. 2 видно, что для наблюдения сквозь облака требуются значительные мощности импульса. Если считать предельной мощностью для импульсной системы $W_0 \approx 5$ МВт, то наблюдение через облака объектов с характерными размерами ≈ 5 км с помощью такой системы при $L = 300$ км возможно только, если $\tau \leq 20$ и $z_0+H < 2$ км; при $L = 100$ км — если $\tau \leq 30$. Наблюдение с низколетящих ($H = 1$ км) носителей объектов с размерами порядка 0,5 км возможно при $\tau = 5-10$, а $z_0+H < 2$ км.

1. Зеге Э.П., Иванов А.П., Кацев И.Л. Перенос изображения в рассеивающей среде. Минск: Наука и техника. 1985. 327 с.
2. Косарев А.Л., Мазин И.П., Невзоров А.П., Шугаев В.Ф. Оптическая плотность облаков. М.: Гидрометеоиздат, 1976. 168 с. (Труды ЦАО. Вып. 124).
3. Радиация в облачной атмосфере /Под ред. Е.М. Фейгельсон. Л.:Гидрометеоиздат, 1981. 280 с.
4. Облака и облачная атмосфера. Справочник /Под ред. И.П. Мазина, А.Х. Хргиана. Л.: Гидрометеоиздат, 1989. 647 с.
5. Ершов О.А., Ламден К.С., Левин И.М. и др. //Изв. АН СССР. Сер. ФАО. 1988. Т. 24. № 5. С. 539–544.
6. Ершов О.А., Левин И.М., Салганик И.П., Шеберстов С.В. //Изв. All СССР. Сер. ФАО. 1991. Т. 27. № 6. С. 669–672
7. Долин Л.С., Левин И.М. Справочник по теории подводного видения. Л.: Гидрометеоиздат, 1991. 230 с.
8. Розенберг Г.В. //УФН. 1967. Т. 91. № 4. С. 569–609.
9. Дейрменджан Д. Рассеяние электромагнитного излучения сферическими полидисперсныимн частицами. М.: Мир, 1971. 280 с.
10. Грейсух В.М., Левин И.М. //Докл. АН СССР. 1991. Т. 318. № 2. С. 311–315.

Санкт-Петербургский отдел Института океанологии РАН,
Институт прикладной физики РАН, Москва

Поступила в редакцию
15 апреля 1992 г.

V.M. Greysukh, L.S. Dolin, I.M. Levin. **On Visibility Through Clouds**.

Apparent contrast of objects viewed through clouds is calculated using the values of transmittance and reflectance of a plane cloud layer obtained by Monte-Carlo simulations. Large (about several kilometers) objects prove to be visible through clouds with optical depth $\tau \leq 10$, while small (less than 100 meters) objects could be discernible only through thin clouds with $\tau = 1-2$. Possibility of viewing through clouds by means of active pulsed systems is estimated. A light source power being about 5 MW, large objects can be observed from the height of 100 km through clouds with $\tau \lesssim 30$.