

Г.А. Гуляев, В.Н. Пожидаев

### СТАТИСТИЧЕСКИЕ ОЦЕНКИ ОСЛАБЛЕНИЯ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ ПРОХОЖДЕНИИ ЕГО ЧЕРЕЗ ОБЛАЧНУЮ АТМОСФЕРУ

В работе рассматриваются модели различных облаков и на их основе производится статистическая оценка ослабления в них электромагнитных волн оптического диапазона. С использованием полученных результатов построена модель облачной атмосферы и предложена методика вычисления вероятности превышения порогового значения ослабления излучения для произвольного пункта на территории СССР для произвольного месяца года. Показано существенное увеличение этой величины в случае применения разнесенного приема.

При распространении волн оптического диапазона по вертикальным и наклонным трассам наибольшее затухание вносится облаками [1]. Для оценки эффективности различных оптических систем, трасса визирования которых может проходить через облака, требуется разработка методов расчета вероятности реализации различных значений ослабления излучения, основанных на статистических сведениях о микроструктуре, геометрических характеристиках, вероятности появления облаков.

С точки зрения работоспособности оптического канала необходимо оценить вероятность превышения заданного ослабления  $A_0$ , вызванного облачностью, т. е.  $P(A_0) = P(A \leq A_0)$ . В настоящей работе предлагается методика вычисления этой вероятности для некоторых типов облаков, облачных образований, а также для всей облачной атмосферы. Ввиду важности этой величины в рамках данной работы она нуждается в отдельном названии. Будем называть ее вероятностью связи, поскольку для связанных систем эта величина равна вероятности осуществления связи при условии, что наличие или отсутствие таковой определяется только величиной ослабления излучения.

Ранее в работе [1] для четырех климатических районов СССР и разных сезонов года давалась оценка вероятностных распределений коэффициентов ослабления оптического излучения в облаках, основанная на вероятностном распределении водности в облачности без разделения облаков по типам и не учитывающая локальную статистику появления облачности. Такую оценку нужно считать, конечно, как очень приблизительную и как заведомо неприемлемую при определении вероятностных характеристик ослабления излучения облачностью в конкретных местах и в конкретное время года.

Комплексный показатель преломления воды в оптическом диапазоне зависит от температуры. Практически оказывается, что коэффициенты ослабления для водяных и ледяных сфер при типичных функциях распределения частиц по размерам отличаются не более чем в 1,5 раза. Поэтому будем считать в дальнейших расчетах все облака жидкокапельными при температуре  $+20^\circ\text{C}$  [3, 4, 5].

В начале определим вероятность связи для 6 типов облаков: St, Sc, As, Ci, Ns, Cu, которые нами отобраны для исследования, так как они имеют высокую повторяемость и обладают большим поглощением (кроме Ci). Мы рассматриваем также перистые облака, несмотря на их сравнительно малое ослабление, так как в отсутствие облаков нижних ярусов наличие даже слабо поглощающих сред (а малые ослабления представляют для практики наибольший интерес) будет являться главным фактором ограничения вероятности связи.

Для проведения расчетов необходимо знать распределение водности по высоте  $q(h)$  в облаках различного типа и по ним рассчитать водозапас облака по вертикали

$$W(H) = \int_0^H q(h) dh.$$

Характерные средние вертикальные профили водности различны в облаках разного типа. В мощных кучевых облаках изменение водности с высотой от нижней границы облачности имеет вид односторонней кривой с максимумом в верхней части облака. Аппроксимация экспериментальных данных, приведенных в [1], дает следующую зависимость средней водности от толщины кучевого облака.

$$\bar{q}(H) = 0,71 H^{1/3} + 0,1,$$

что дает связь водозапаса кучевого облака с его толщиной

$$W(H) = 0,17 H^{7/3} + 0,1 H.$$

В слоистых облаках типа St, Sc средняя водность возрастает до высоты  $h = 0,6 \div 0,7$  км, а затем наблюдается ее убывание [2]. Такой ход можно аппроксимировать логнормальным распределением

$$q(H) = \frac{C}{h} \exp \left[ \frac{\ln^2 (h/h_0)}{2\sigma^2} \right].$$

Значения параметров распределения для различных сезонов года по данным [2] таковы ( $h$ , км):

зима	$C = 0,377;$	$h_0 = 6,320;$	$\sigma = 1,583;$
весна, осень	$C = 0,501;$	$h_0 = 6,280;$	$\sigma = 1,596;$
лето	$C = 1,305;$	$h_0 = 23,221;$	$\sigma = 1,900.$

Водо запас при этом вычисляется по формуле

$$W(H) = C \sqrt{\frac{\pi}{2}} \sigma \left[ 1 + \operatorname{erf} \left\{ \frac{\ln (h/h_0)}{\sigma \sqrt{2}} \right\} \right],$$

где  $\operatorname{erf}(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z e^{-t^2} dt$  — функция ошибок.

В высокостроистых и слоисто-дождевых облаках водность практически не меняется с высотой до  $h = 1$  км, а затем медленно убывает [2]. Величина водности зависит от времени года [1]. Водо запас при этом вычисляется по формуле

$$W(H) = \begin{cases} q_0 H - 0,01 H^2 + 0,01 & \text{при } H > 1 \text{ км} \\ q_0 H & \text{при } H \leq 1 \text{ км.} \end{cases}$$

Значения  $q_0$  при этом следующие:

для Ns	$q_0 = 0,15$ (зима),
	$q_0 = 0,35$ (лето),
	$q_0 = 0,22$ (весна, осень);
для As	$q_0 = 0,14$ (зима),
	$q_0 = 0,18$ (лето),
	$q_0 = 0,19$ (весна, осень).

Для облаков верхнего яруса из-за сравнительно малой их толщины и почти полного отсутствия данных водность можно принять постоянной и равной:  $q(h) = 0,01 \text{ г/м}^3$  [3], так что

$$W(H) = 0,01H.$$

Для 33 пунктов на территории СССР в [2] получены повторяемости толщин различных облаков, которые использовались для получения интегральных вероятностей реализации этих толщин. Для облаков верхнего яруса повторяемость толщин бралась из [5].

Общее ослабление прямого излучения, согласно [1], имеет вид

$$A(H) = 4,34 \frac{K_{\alpha N}}{K_{qN}} \int_0^H q(h) dh = 4,34 \frac{K_{\alpha N}}{K_{qN}} W(H),$$

где  $K_{qN}$  — средняя масса частиц и  $K_{\alpha N} = \pi \int_0^\infty r^2 Q(r, \lambda) f(r) dr$  — коэффициент связи между ослаблением излучения и концентрацией частиц [1],  $Q(r, \lambda)$  — фактор эффективности ослабления излучения одиночной частицей радиуса  $r$ ;  $\lambda$  — длина волны;  $f(r)$  — двухпараметрическое гамма-распределение, параметры которого брались из [6], а для перистых облаков из [7]. Отсюда распределение вероятности ослабления выражается через распределение вероятности толщин облака  $p_H(H)$  как

$$p_A(A) = \frac{p_H[H(A)] \cdot K_{qN}}{4,34 K_{\alpha N} q[H(A)]},$$

где  $H(A)$  определяется как обратная функция предыдущего выражения, и, следовательно, вероятность связи для облака соответствующего типа будет

$$P_{CB}(A_0) = \int_0^{A_0} P_A(A) dA. \quad (1)$$

Таким образом вычисляется вероятность связи для отдельных типов облаков в зависимости от сезона и длины волны. Расчеты проводились для 33 мест на территории СССР. Для отдельных типов облаков такой подход, по-видимому, оправдан, так как их структура и вероятности появления существенно более стабильны, чем для совокупности облаков. Вычислим теперь вероятности связи при прохождении оптическим излучением всей толщи облачной атмосферы в зависимости от порогового значения ослабления, длины волны, месяца, года и конкретного пункта, для которого имеются достаточные статистические данные. Ниже будет показано, что такими пунктами может являться сеть метеорологических пунктов СССР, так как их многолетние статистические данные по облачности, собранные в [8], позволяют провести такие расчеты. Сеть метеорологических пунктов достаточно плотно развернута на территории СССР ( $\approx 3000$  пунктов), и, хотя они расположены, конечно, не слишком равномерно, все же их количество таково, что мы можем говорить об индикации облачной атмосферы по существу в любой точке страны.

Будем рассматривать облачную атмосферу, содержащую облака St, Sc, As, Ci, Ns, Cu. Исследуя прохождение излучением облачной атмосферы, необходимо принимать во внимание горизонтальную неоднородность облачного покрова. Эта неоднородность выражается в баллах (один балл означает закрытие облачностью  $1/10$  части небосвода).

Разделим облачную атмосферу на слои. Каждый слой может содержать один или несколько типов облаков. Предположим теперь, что излучение, распространяясь через атмосферу, ослабляется в облаках  $i_j$ -слоев и, следовательно, попадает в разрывы облаков  $k_l$ -слоев. Очевидно, что вероятность такой ситуации будет

$$P_m = \prod_{j=1}^N \prod_{l=1}^M \sum_{n_j} \sum_{n_{kl}} P_s(\{n\}) n_{i_j} (10 - n_{k_l}) / 100,$$

где  $m$  — порядковый номер этой ситуации,  $n$  — облачность слоя в баллах,  $N$  — число поглощающих слоев,  $M$  — число пропускающих слоев,  $P_s(\{n\})$  — совместная вероятность появления облачных слоев с соответствующими баллами. Если предположить независимость появления облачных слоев, то это выражение примет вид

$$P_m = \prod_{j=1}^N \prod_{l=1}^M \langle n_{i_j} \rangle (10 - \langle n_{k_l} \rangle) / 100, \quad (2)$$

где  $\langle n_i \rangle$  — средний балл соответствующей облачности. Пусть теперь каждый  $i_j$ -слой имеет вероятность связи  $P_{CBi}(A)$ , где  $A$  — ослабление. Тогда, очевидно, вероятность связи при наличии  $m$ -ситуации есть

$$P_{CBm}(A) = \int \dots \int p_s(\xi_{i_1}, \dots, \xi_{i_N}) d\xi_{i_1} \dots d\xi_{i_N},$$

где  $p_s(\xi_{i_1}, \dots, \xi_{i_N})$  — совместное распределение величин ослабления  $\xi_{i_1}, \dots, \xi_{i_N}$  в  $i_j$ -ослабляющих слоях, или, снова предполагая независимость появления облачных слоев,

$$P_{CBm}(A) = \int \dots \int p_{i_1}(\xi_{i_1}) \dots p_{i_N}(\xi_{i_N}) d\xi_{i_1} \dots d\xi_{i_N}, \quad (3)$$

где  $p_{i_j}(\xi)$  — распределение вероятности ослабления  $\xi$  облачным  $i_j$ -слоем. В обоих случаях интегралы берутся по объему, ограниченному гиперплоскостями  $\xi_{i_j} = 0$  и  $\sum_{j=1}^N \xi_{i_j} = A$ . Вероятность связи для всей облачной атмосферы, очевидно, будет

$$P_{CB}(A) = \sum_{m=1}^2 P_m^{(N+M)} P_{CBm}(A). \quad (4)$$

Чтобы пользоваться этой формулой, необходимо иметь выражения для  $P_{i_j}(\xi)$ , которые можно получить из

$$P_{ij}(\xi) = \frac{d}{d\xi} (P_{CBij}(\xi)), \quad (5)$$

где  $P_{CBij}(\xi)$  — вероятность связи соответствующего слоя.

Для вычисления этих вероятностей воспользуемся снова предложенной методикой. Рассмотрим  $i_j$ -слой, состоящий из облаков определенных типов. Рассуждая так же, как и раньше, получим выражения, аналогичные формулам (2, 3, 4, 5), где вместо слоев будут фигурировать типы облаков. Необходимые для проведения расчетов выражения вероятности связи для отдельных типов облаков дает формула (1).

Наиболее полные сведения об облачности над территорией СССР можно найти в [8], где различные характеристики облаков представлены отдельно для нижней и общей облачности. К нижней облачности отнесены облака только нижнего яруса с вертикальным пределом высоты до 2000 м. К общей облачности отнесены все облака, наблюдаемые одновременно. В соответствии с этим разбиваем атмосферу на 2 слоя: нижнюю и верхнюю облачности.

В [8] вероятностных характеристик для верхней облачности нет, но их можно получить на основании имеющихся там таблиц. Покажем эту возможность.

Так как в целях сглаживания неточности наблюдений в [8] балльность облачности объединена в три группы: ясное состояние неба (0–2 балла), полужасное (3–7 баллов) и пасмурное (8–10 баллов), то достаточно вычислить вероятностные характеристики для верхней облачности только для этих трех градаций. Легко видеть, что вероятности ясного и пасмурного неба для верхней облачности удовлетворяют соответственно выражениям

$$P_v(0-2) = \frac{P_{об}(0-2)}{P_n(0-2)},$$

$$P_v(8-10) = \frac{P_{об}(8-10) - P_n(8-10)}{1 - P_n(8-10)},$$

и, следовательно,

$$P_v(3-7) = 1 - P_v(0-2) - P_v(8-10).$$

Возможные случаи распространения луча представлены в таблице.

$m$ — номер ситуации	1	2	3	4
Верхняя облачность	+	+	—	—
Нижняя облачность	+	—	+	—

Здесь знак «+» или «—» означает, что излучение соответственно ослабляется или свободно проходит через указанный слой. Отвечающие этим ситуациям значения вероятностей  $P_m$  в соответствии с (2), а также вероятности связи  $P_{CBm}(A)$  в соответствии с (3) будут равны

$$P_1 = \langle n_n \rangle \langle n_v \rangle / 100,$$

$$P_2 = \langle n_n \rangle (10 - \langle n_v \rangle) / 100,$$

$$P_3 = \langle n_v \rangle (10 - \langle n_n \rangle) / 100,$$

$$P_4 = (10 - \langle n_n \rangle) (10 - \langle n_v \rangle) / 100, \quad (6)$$

$$P_{CB1}(A) = \iint P_n(\xi_n) P_v(\xi_v) d\xi_n d\xi_v,$$

$$P_{CB2}(A) = P_{CBv}(A),$$

$$P_{CB3}(A) = P_{CBn}(A),$$

$$P_{CB4}(A) = 1,$$

где  $\langle n_n \rangle$  и  $\langle n_v \rangle$  — средние баллы соответствующей облачности в конкретном месте и в определенное время года, а интеграл берется по участку плоскости, ограниченному прямыми  $\xi_n = 0$ ,  $\xi_v = 0$ ,  $\xi_n + \xi_v = A$ . При этом, как и в (5),

$$p_n(\xi) = \frac{dP_{CBn}(\xi)}{d\xi} \quad \text{и} \quad p_n(\xi) = \frac{dP_{CBn}(\xi)}{d\xi}.$$

Таким образом, все определяется функциями  $P_{CBn}(\xi)$  и  $P_{CBn}(\xi)$ . Для определения этих величин вся предыдущая процедура снова пригодна. Только теперь нужно обладать сведениями о локальных  $p_{ij}(\xi)$  ( $p_{ij}(\xi)$  здесь уже распределение вероятности ослабления облаками  $i_j$ -типов), а также данными о повторяемости баллов соответствующих типов облаков. Однако такие сведения обычно отсутствуют. Их можно получить только для определенного региона и определенного сезона [2]. Как уже отмечалось, такие характеристики обычно довольно устойчивы. Поэтому региональные и сезонные характеристики облаков определенного типа можно отнести к заданному пункту и моменту времени.

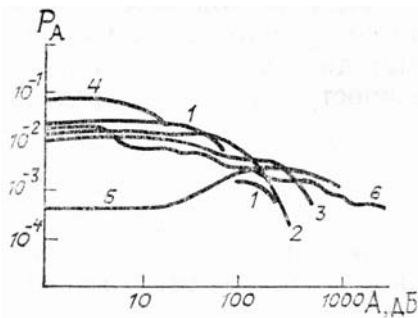


Рис. 1. Распределение вероятности ослабления в облаках над Москвой. Лето, 1—St, 2—Sc, 3—As, 4—Ci, 5—Ns, 6—Cu

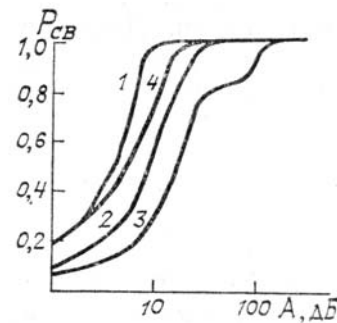


Рис. 2. Зависимость вероятности связи от величины порогового ослабления. Зима, п. Томпо. 1—St, 2—Sc, 3—As, 4—Ci

В нашем случае в верхний слой входят облака St, Sc, As, Ci, а в нижний — Ns, Cu. Поэтому для нижнего слоя таблица ситуаций будет аналогична приведенной выше. Так же, как и раньше, будут определяться вероятности ситуаций и соответствующие им вероятности связи, только в выражениях (6) нужно заменить

$$\begin{aligned} \langle n_n \rangle &\rightarrow \langle n_{Ns} \rangle, \quad p_n(\xi) \rightarrow p_{Ns}(\xi), \quad P_{CBn}(\xi) \rightarrow P_{CBNs}(\xi), \\ \langle n_b \rangle &\rightarrow \langle n_{Cu} \rangle, \quad p_b(\xi) \rightarrow p_{Cu}(\xi) \rightarrow P_{CBb}(\xi) \rightarrow P_{CBCu}. \end{aligned}$$

Для верхнего слоя число возможных ситуаций равно 16. Отвечающие этим ситуациям значения  $P_m$  равны произведению средних баллов ослабляющих типов облаков, умноженному на  $10^{-4}$  и на произведения  $(10 - \langle n \rangle)$  для пропускающих типов облаков в соответствии с (2).

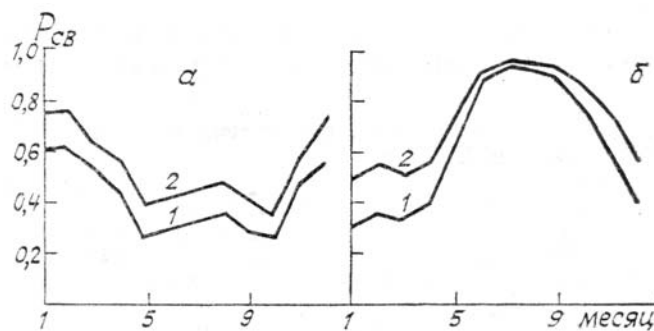


Рис. 3. Годовой ход вероятности связи, (а) п. Томпо: 1 — ослабление 5 дБ, 2 — ослабление 50 дБ; (б) п. Джиликкуль: 1 — ослабление 5 дБ, 2 — ослабление 50 дБ

По указанной методике была составлена программа для вычисления вероятности связи. В качестве примера расчета по предлагаемой методике произведен расчет вероятности связи для нескольких пунктов: Москва, п. Джиликкуль, п. Томпо (пункты с максимальной вероятностью связи на территории СССР: п. Джиликкуль — летом, а п. Томпо — зимой). Расчеты показали слабую зависимость  $P_{CB}$  от длины волны в диапазоне 1÷11 мкм. Результаты расчетов представлены на рис. 1—4. Из этих графиков видно, что обеспечить высокую вероятность связи в отдельном пункте в течение всего года невозможно. Применение одновременного приема на двух пунктах (расстояние между ними должно быть больше радиуса корреляции появления облаков) позволяет резко увеличить вероятность связи в

течение всего года. Это видно на рис. 4, где представлен годовой ход вероятности связи такого приема (п. Джиликуль, п. Томпо; расстояние  $\approx 6000$  км).

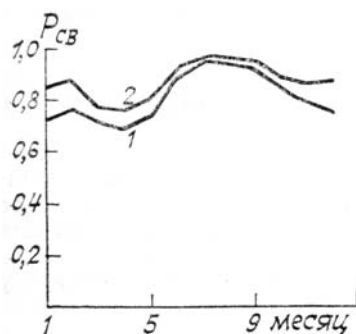


Рис. 4. Годовой ход вероятности связи при разнесенном приеме (п. Томпо, п. Джиликуль).  
1 — ослабление 5 дБ, 2 — ослабление 50 дБ

Следует отметить, что в данной методике не участвует явно длина волны, что позволяет, в принципе, распространить ее за пределы оптического диапазона.

## Выводы

Для наиболее существенных (с точки зрения энергетических характеристик излучения) типов облаков предложены вертикальные распределения водности по высоте.

На основе этих распределений получены ослабления излучения в этих облаках в зависимости от толщины облака.

Предложена методика расчета вероятности связи для указанных типов облаков в 33 пунктах СССР для 4 времен года.

Разработана методика вычисления вероятности связи для любого месяца года, для всей территории СССР на основе многолетних статистических данных по облачности с учетом трехмерной структуры облачной атмосферы.

Предложенная методика применима в достаточно широком диапазоне волн, для которых имеются сведения по ослаблению излучения в облаках указанных типов.

Методика дает возможность оценить перспективность того или иного пункта при создании устройств, использующих зенитное излучение в оптическом диапазоне (например, при создании оптических каналов связи).

Показана возможность резкого увеличения круглогодичной вероятности связи при применении разнесенного приема.

1. Ослабление лазерного излучения в гидрометеорах /Под ред. М.А. Колосова. М.: Наука, 1977. 173 с.
2. Авиационно-климатический атлас-справочник СССР /Под ред. Л.С. Дубровиной. М.: Гидрометеоиздат, 1975. 157 с.
3. Кисловский Л. Ф. //Оптика и спектроскопия. 1959. Т. 7. Вып. 3. С. 311.
4. Carrier L. W., Sato G. A., von Essen K. //Appl. Opt. 1967. V. 6. P. 1209.
5. Баранов А. М. Фронтальные облака и условия полета в них. Л.: Гидрометеоиздат, 1964. 239 с.
6. Бисярин В. П. //Радиотехника. 1983. № 5. С. 21.
7. Тверской П. Н. Курс метеорологии. М.: Гидрометеоиздат. 1962. 700 с.
8. Справочник по климату СССР. М.: Гидрометеоиздат. 1968. Ч. 5.

Институт радиоэлектроники  
АН СССР, Москва

Поступила в редакцию  
11 июля 1988 г.

G. A. Gulyaev, V. N. Pozhidaev. **Estimates of Optical Wave Attenuation in Cloudy Atmosphere.**

Models of different cloud types and amounts are reviewed and used for a statistical estimation of the optical EM wave attenuation. The resulting data are employed for constructing a cloudy atmosphere model. A computational procedure is proposed for calculating the probability that the attenuation will not be in excess of a given threshold value for any place in the USSR and any month. The probability is shown to increase in the diversity reception scheme.