

В.К. Ошлаков

## МОДЕЛЬ СОСТАВНОГО СИГНАЛА В ЗАДАЧАХ ИНТЕРПРЕТАЦИИ РЕЗУЛЬТАТОВ ФОТОМЕТРИРОВАНИЯ ОБЛАЧНЫХ ПОЛЕЙ

На примере анализа условий наблюдения показана необходимость отдельного учета влияния изменчивости вертикальных и горизонтальных размеров элементов облачного поля на яркость облачного и безоблачного зенита. Получены оценки вероятности наличия облака на линии визирования по результатам фотометрирования (дневное время).

При определении условий и обеспечении работы наземных оптических систем особую ценность представляет информация о пространственной структуре поля облачности, которая содержится в поле яркости нисходящего солнечного излучения.

В теоретических и экспериментальных работах, посвященных исследованию яркости нисходящего солнечного излучения, используется модель, суть которой заключается в комбинировании случайных полей или процессов [1, 2, 3]. В частности, двухкомпонентный процесс флуктуаций наблюдаемой монохроматической яркости  $B_n(t)$  можно записать в виде

$$B_n(t) = q(t)B_1(t) + [1 - q(t)]B_0(t), \quad (1)$$

где  $B_1(t)$  и  $B_0(t)$  — флуктуации яркости облака и разрыва в облачном слое;  $q(t)$  — единичная функция-переключатель состояний процесса, принимающая всего два (по числу состояний) значения: 1, если наблюдается облако и 0 — в противном случае. Среднее значение стационарного процесса (1) описывается линейной зависимостью [3]:

$$\overline{B_n} = p(\overline{B_1} - \overline{B_0}) + \overline{B_0}, \quad (2)$$

где черта сверху означает усреднение по параметру  $t$ ,  $p$  — среднее значение процесса  $q(t)$ , равное  $P[q(t) = 1]$  [1]. Дисперсия процесса (1) может быть представлена в виде полинома второй степени от  $p$ :

$$\sigma_n^2 = -p^2(\overline{B_1} - \overline{B_0})^2 + p[(\overline{B_1^2} - \overline{B_0^2}) - 2(\overline{B_1} - \overline{B_0})\overline{B_0}] + \sigma_0^2. \quad (3)$$

На практике использование этой модели затруднено в связи с нестационарностью, проявляющейся в трендах средних значений и дисперсий яркости. Нестационарность обусловлена несколькими причинами. Прежде всего, наблюдаемые процессы происходят на фоне детерминированных изменений поля яркости, связанных с изменением видимого положения Солнца. Кроме того, нестационарность в виде  $B_n(t)$  и  $\sigma_n^2(t)$  может возникнуть из-за временной зависимости одного (или нескольких) параметров, входящих в (2) и (3):  $p(t)$ ,  $B_1(t)$ ,  $B_0(t)$ . Эти зависимости могут быть вызваны пространственной неоднородностью облачного поля. В [2] отмечено, что стационарное облачное поле в целом описывается средними характеристиками — вероятностью наличия облака  $p$  и горизонтальными размерами облака  $L_1$  и разрыва  $L_0$ . Если наблюдатель, находящийся под облачным слоем, перемещающимся со скоростью  $V$ , регистрирует временные флуктуации монохроматической яркости излучения с помощью узкоугольного приемника, ориентированного в постоянном направлении, то соотношения (1)–(3) описывают процессы, наблюдаемые на разрезах облачного поля. Переключения состояний процесса на разрезе облачного поля можно описать случайным фототелеграфным сигналом  $q(t)$  с параметрами  $p$  — вероятностью определенного состояния и  $\lambda$  — частотой пуассоновского потока точек включения, распределенных на временной оси  $t$ . Нетрудно найти связь между этими параметрами, горизонтальными размерами элементов облачного поля  $L_1$ ,  $L_0$  и скоростью перемещения облачного поля  $V$ :

$$p = \overline{L_1}/(\overline{L_1} + \overline{L_0}), \quad \lambda = \overline{V}(1/\overline{L_1} + 1/\overline{L_0}). \quad (4)$$

Зависимость от времени  $\bar{L}_1(t)$ ,  $\bar{L}_0(t)$  или  $\bar{V}(t)$  влечет за собой нестационарность процесса  $q(t)$  и, следовательно, наблюдаемого процесса (1).

Амплитуды сигналов процессов  $B_1(t)$  и  $B_0(t)$  нелинейно зависят от вертикальных размеров элементов поля, связанных с их оптической толщиной [4]. Изменение средних оптических толщ элементов поля облачности повлечет за собой изменение соотношения средних значений яркости  $\bar{B}_1$ ,  $\bar{B}_0$  в (2) и (3) и повлияет на стационарность процесса  $B_n(t)$ , даже при условии горизонтальной однородности облачного поля и постоянном значении  $\bar{V}$ .

Поясним сказанное конкретным примером. Анализируются результаты наблюдения яркости зенита, полученные в мае 1987 г. с помощью звездно-солнечного фотометра [5] (поле зрения — 5 угл. мин., рабочая длина волны — 0,69 мкм). В один из дней первая реализация в нижней и средней тропосфере над пунктом наблюдения находилась ось барической ложбины. К 7 ч местного времени образовалась облачность Sc. До 11 ч сохранялась десятибалльная облачность, которая к 15 ч полностью рассеялась. Высота ее нижней кромки менялась в пределах 700 ... 1600 м, оценка скорости — 6 м/с.

На следующий день (вторая реализация) наблюдения проводились в условиях тыловой части барической ложбины. Выше уровня 1500 м осуществлялась адвекция влажного воздуха и после 13 ч в пригоризонтной зоне отмечено появление облачности. В обоих случаях в обработку вошли части реализаций от 9.35 до 13.55.

Обработка результатов состояла из нескольких этапов. Прежде всего, вводились поправки на спектральную чувствительность фотометра, для чего в условиях высокой прозрачности проведены наблюдения внеатмосферного источника с табулированным спектром [6]. С целью учета влияния различных факторов реализация была разбита на непересекающиеся участки (строки), длительностью примерно 626 с каждый, что соответствовало в среднем 3,8 км в линейном масштабе. Для каждой строки с текущим номером  $j$  считалось справедливым предположение о стационарности, т.е. о выполнении соотношений (2) и (3). Как отмечено в [2], для процессов типа (1) в задачах классификации возможно использование амплитудного обнаружителя. При формулировании решающего правила здесь использованы результаты экспоненциального сглаживания  $\tilde{B}(\tilde{t})$  «безоблачной» выборки и среднеквадратические отклонения  $\tilde{\sigma}$  текущих отсчетов от сглаженных. В итоге оно выглядело следующим образом:

Если  $B_n(t) = \tilde{B}(\tilde{t}) + \kappa\tilde{\sigma}$ , то  $B_n(t) = B_1(t)$  и  $q(t) = 1$ , «облако».

Иначе, если  $B_n(t) \leq \tilde{B}(\tilde{t}) + \kappa\tilde{\sigma}$ , то  $B_n(t) = B_0(t)$  и  $q(t) = 0$ , «не облако»,

где  $\kappa = 1 \dots 3$ ; классу «не облако» соответствует оценка метеоданных «безоблачно, наблюдается повышение влажности». Фактически — это амплитудный обнаружитель с переменным порогом, а (5) — аналог предложенного в [7] правила принятия решения о наличии облачности, опирающегося на среднее значение яркости фиксированного углового направления чистого неба для данного положения Солнца.

Из анализа условий наблюдений следует, что в первой реализации основными причинами тренда яркости должны быть изменения мощности облачного слоя, вероятности наличия облака в направлении визирования и положения Солнца. Действительно, с 9.35 до 11.50 изменение мощности сплошного облачного слоя ( $p = 1$ ) имело общую тенденцию к уменьшению и в результате повышался уровень наблюдаемой яркости, что совпадало с тенденцией к увеличению яркости безоблачного зенита в связи с изменением положения Солнца (точки 1 ... 12 на рис. 1, а). С 11.50 до 13.55 на фоне изменения мощности слоя происходило уменьшение общего количества облачности и уменьшался уровень наблюдаемой яркости, что частично компенсировалось повышением яркости за счет изменения видимого положения Солнца (точки 13 ... 23 на рис. 1, а). Во второй реализации уровень наблюдаемой яркости повышался в результате совпадения воздействий изменения положения Солнца и адвекции влажного воздуха.

В данных реализациях оказалась возможной аппроксимация временных трендов линейными уравнениями. В качестве критерия к линейному тренду подсчитаны коэффициенты ранговой корреляции  $\tau$  [8] для совпадающих интервалов времени облачной и безоблачной реализаций (индексы 1 и 0 соответственно). С 9.35 до 11.50  $\tau_1 = 0,6$ ;  $\tau_0 = 0,99$  ( $\sigma_\tau = 0,03$  в обоих случаях). С 11.50 до 13.55  $\tau_1 = -0,31$ ;  $\tau_0 = 0,96$  ( $\sigma_\tau = 0,04$ ). Использование критериев тренда и дополнительной информации об условиях наблюдения позволило произвести учет влияния положения Солнца, мощности слоя, вероятности наличия облака в каждой строке информации и сформировать массивы  $B_{1j}(t)$ ,  $B_{0j}(t)$ ,  $q_j(t)$ , где  $j$  — текущий номер строки. После очевидных преобразований (2) произведены оценки текущих значений вероятности  $\hat{p}_j$  с использованием значений  $\bar{B}_{1j}$ ,  $\bar{B}_{0j}$  и  $B_{nj}$ . Оценки вероятности, полученные как средние значения процесса  $q_j(t)$ , и из выражения (2) совпали. Коэффициент корреляции между оценками вероятности и соответствующими значениями  $\bar{B}_{nj}$  равен  $0,93 \pm 0,03$  (с вероятностью 95%), что подтверждает справедливость линейной зависимости (2).

Для сравнения на рис. 1, б приведены оценки вероятности наличия облака в зените и общего количества облачности по данным метеослужбы.

Для процессов типа (1) амплитуды сигналов должны подчиняться одномерному распределению вида  $f_p(B) = pf_1(B) + (1-p)f_0(B)$ . На рис. 2 приведены эмпирические гистограммы наблюдаемых значений яркости, подсчитанные для всей выборки, до (рис. 2, а) и после (рис. 2, б) поправок на

зависимость от положения Солнца и спектральную чувствительность фотометра. Две моды распределения соответствуют наиболее вероятным значениям яркости облака и разрыва в облачном слое, различие между ними значимо на уровне 0,01.

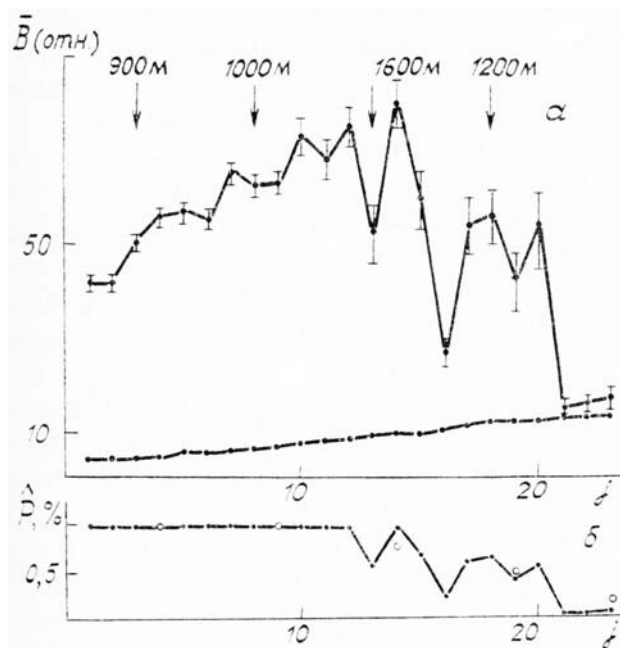


Рис. 1. Временные средние значения наблюдаемой яркости зенита и вероятности наличия облачности: *a* — верхняя кривая — в условиях облачности, указаны интервалы ошибки оценки среднего и значения высоты нижней кромки облачности; нижняя кривая в отсутствие облачности (в масштабе рисунка ошибка оценки пренебрежимо мала); *b* — оценки вероятности наличия облачности в зените по результатам фотометрических наблюдений (точки) и общего количества — по данным метеослужбы (кружочки)

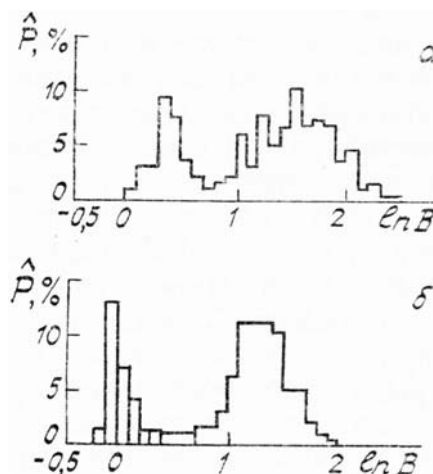


Рис. 2. Гистограммы распределения фотометрических отсчетов от облачного зенита: *a* — до введения; *b* — после введения поправок на зависимость от положения Солнца, на высоту нижней кромки облачности и спектральную чувствительность фотометра

**Выводы.** Пространственная неоднородность облачного поля проявляется во временных трендах наблюдаемых значений яркости в направлении визирования (зенита). Для корректной поправки на тренды необходима дополнительная информация об условиях наблюдения, в частности — о высоте нижней кромки облачности, мощности и скорости перемещения слоя, о координатах углового положения Солнца, вероятности наличия облака на линии визирования. Информация о некоторых из этих факторов может быть получена из результатов фотометрирования. Например, вероятность наличия облака в зените может быть определена, если кроме наблюдаемых значений яркости известна и яркость безоблачного зенита (здесь предполагается, что яркость разрыва в облачном слое стремится в пределе к яркости безоблачного неба для тех же координат точки наблюдения и положения Солнца). Учет влияния изменчивости вертикального и горизонтального размеров элементов облачного поля необходимо проводить в отдельности. Например, для обсуждаемой ситуации (облачность Sc) изменение балла от 10 до 1–2, а высоты нижней кромки — от 900 до 1600 м выражалось в противоположных по знаку тенденциях значений яркости к тренду. После введения поправок па влияние высоты нижней кромки и положения Солнца получено высокое значение выборочного линейного коэффициента корреляции между значениями яркости и вероятностью наличия облака на линии разреза облачного слоя.

1. Френке Л. Теория сигналов. М.: Сов. радио, 1974. 344 с.
2. Шальгин А. С., Палагин Ю. И. Прикладные методы статистического моделирования. Л.: Машиностроение, 1986. 320 с.
3. Охврилъ Х. А. //Облачность и радиация. Тарту, 1975. С. 82–88.
4. Лиоу К. - Н. Основы радиационных процессов в атмосфере. Л.: Гидрометеоздат, 1984. 376 с.
5. Абрамочкин А. И., Ваулин П. П., Галилейский В. П. и др. //Измерения оптико-метеорологических параметров атмосферы с использованием лазерного излучения. Томск: ТФ СО АН СССР, 1981. С. 14–19.
6. Харитонов А. В., Терещенко В. М., Князева Л. Н. Сводный спектрофотометрический каталог звезд. Алма-Ата: Наука, 1978. 198 с.
7. Ошляков В. К. //Распространение оптического излучения в случайно-неоднородных средах. Томск: ТФ СО АН СССР, 1988. С. 83–86.

8. Кендал М., Стьюарт А. Многомерный статистический анализ и временные ряды. М.: Наука, 1976. 736 с.

Институт оптики атмосферы СО АН СССР,  
Томск

Поступила в редакцию  
16 декабря 1989 г.

**V. K. Oshlakov. Use of a Combined Signal Model in the Interpretation of the Photometric Observations of the Cloud Fields.**

It is shown, by analyzing the observational conditions, that the influences of the variability of the vertical and horizontal sizes of cloud field elements on the brightness of cloudy and clear sky zenith should be accounted for separately. The estimations are obtained of the cloud occurrence on the sighting line probability based on the daytime photometric data.