

Б. А. БЕЗУХ, М. Н. ДОЛГИХ,
Г. Г. КРЫЛОВ, И. А. ТИМОФЕЕВА

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОБЛАКОВ

Для исследования маломасштабных яркостных неоднородностей облаков, атмосферы и подстилающих поверхностей необходима радиометрическая аппаратура высокого разрешения и чувствительности, работающая в широком спектральном диапазоне. Серийно такие приборы не выпускаются, поэтому для проведения подобных исследований разработан и изготовлен специальный радиометр «Смог-2М» [1] (рис. 1).

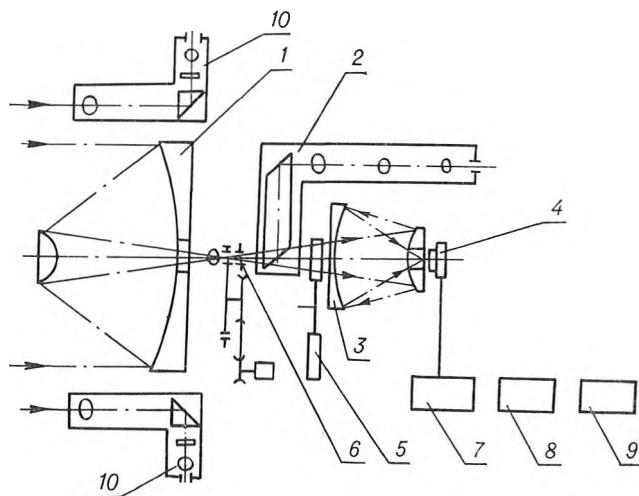


Рис. 1. Блок-схема инфракрасного радиометра «Смог-2М»

Входной объектив 1 прибора двухзеркальный, сферический, системы Кассегрена с относительным отверстием 1 : 5. Излучение от объекта, наведение на который осуществляется с помощью визира 2, фокусируется дополнительным объективом 3 на приемную площадку приемника излучения 4 (пирозлектрический приемник с интегральным предусилителем МГ-30). Перед объективом 3 установлена турель с инфракрасными фильтрами 5 (табл. 1). Опорные излучатели — зачерненные лопасти модулятора 6, расположенного в термостате. Электрический сигнал с приемника, пропорциональный разности излучений исследуемого объекта и опорного излучателя, поступает на полосовой усилитель 7, синхронно детектируется блоком 8 и после интегрирования (блок 9) поступает на регистратор (самописец КСП-4). В приборе использованы также внешние визиры 10.

Таблица 1

Параметры инфракрасных фильтров

$\lambda_{ц}, \text{ мкм}$	2,36	3,7	4,3	10,3
$B_0, \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{стер} \cdot \text{мкм}$	$1,3 \cdot 10^{-6}$	$2,52 \cdot 10^{-5}$	$3,7 \cdot 10^{-4}$	$1,0 \cdot 10^{-3}$
$K, \text{ Вт/В} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{стер} \cdot \text{мкм}$	$5 \cdot 10^{-6}$	$4 \cdot 10^{-6}$	$6 \cdot 10^{-6}$	$4,6 \cdot 10^{-6}$

Регистрируемый поток радиации ограничивался по длинам волн с помощью ИК фильтров, а энергетическая яркость объекта определялась выражением [2]:

$$L = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L(\lambda, T) \tau_\lambda d\lambda, \quad (1)$$

где $L(\lambda, T)$ — функция Планка; τ_λ — пропускание фильтра на данном участке $\Delta\lambda$; λ — длина волны; T — температура, К.

Градунровка радиометра проводилась по методике [2]. Эталонным излучателем служила плоская модель абсолютно черного тела. Нагреватель мощностью ~ 2 КВт обеспечивал нагревание тела до 500 К. Поверхность покрывалась шерлаком в два слоя, коэффициент излучения брался равным единице.

При фиксированной температуре и для каждого фильтра рассчитывалась $L_{\lambda_{\text{эф}}}^{\text{АЧТ}}$ по формуле:

$$L_{\lambda_{\text{эф}}}^{\text{АЧТ}} = \frac{\sum_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_{\lambda}^{\text{АЧТ}} \Delta\lambda \tau_\lambda}{\sum_{\lambda_1}^{\lambda_2} \tau_\lambda}. \quad (2)$$

Здесь $L_{\lambda}^{\text{АЧТ}}$ — функция Планка для центра выбранного участка пропускания фильтра. В конечном счете соотношение для определения яркости исследуемого излучения фона (полное заполнение поля зрения прибора излучателем) выглядит следующим образом:

$$L_{\lambda_i} = L_0 \pm k_i U_i, \quad (3)$$

где L_{λ_i} — спектральная плотность энергетической яркости фона; k_i — коэффициент пропорциональности (константа для данного фильтра); L_0 — спектральная плотность энергетической яркости опорного излучателя (константа для данного фильтра); U_i — показания прибора, мВ.

Результаты градуировки обрабатывались методом наименьших квадратов, т. е. отыскивалось уравнение прямой, средний квадрат отклонения от которой экспериментальных точек минимален.

В соответствии с этим методом параметры уравнения (3) запишутся в виде:

$$k = \frac{n \sum_{i=1}^n N_i L_i - \sum_{i=1}^n N_i L_i}{\sum_{i=1}^n N_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n N_i \right)^2}; \quad (4)$$

$$L_0 = \frac{\sum_{i=1}^n N_i^2 \sum_{i=1}^n L_i - \sum_{i=1}^n N_i \sum_{i=1}^n N_i L_i}{n \sum_{i=1}^n N_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n N_i \right)^2} \quad (5)$$

при дисперсии

$$\gamma^2 = \frac{1}{n} \left[\sum_{i=1}^n (L_i - k_i U_i - L_0)^2 \right]. \quad (6)$$

Здесь n — количество экспериментальных точек; N_i — показания радиометра при установке i -го значения температуры калибровочного АЧТ, соответствующего измеряемой яркости L_i .

Таблица 2

Параметры АЧТ			Показания радиометра
$t_i, ^\circ\text{C}$	T_i, K	$R_{\lambda_{\text{эф}}}^{\text{АЧТ}},$ $\text{Вт/м}^2\cdot\text{стер}\cdot\text{мкм}$	$N_i, \text{мм}$
20,8	293,8	8,89	—21
22	295	9,07	—17,5
24	297	9,37	—12,5
25	298	9,53	—7
26	299	9,68	—4
31	304	10,5	14
32,5	305,6	10,7	18,5
37,5	310,5	11,5	36,4

В табл. 2 представлены экспериментальные точки, полученные в процессе градуировки радиометра на фильтре с $\lambda_{\text{ц}}=10,3$ мкм и приведенные к единым условиям измерений.

В результате расчета, который осуществлялся по программе, составленной для вычислительного комплекса ДВК-2М, получена аппроксимирующая функция:

$$L=0,045N+9,87, \quad (7)$$

где N выражено в мВ. Дисперсия оказалась равной

$$\gamma^2=7,46\cdot 10^{-4}, \quad (8)$$

т. е. среднее квадратичное отклонение экспериментальных данных от аппроксимирующей линии $\gamma\sim 0,03$ (единиц яркости).

Полученные данные свидетельствуют о несущественном статистическом разбросе показаний при такой процедуре градуировки. Действительно, даже при минимальной из рассмотренного диапазона температур яркости калибровочного АЧТ относительная погрешность измерений радиометром составила $\sim 1\%$.

Расчет погрешностей измерений с учетом собственных шумов аппаратуры дал величину $\sim 2\%$, что при температуре 300 К составляет $1,7\cdot 10^{-4}$ Вт/м²·стер·мкм.

Пороговая чувствительность по спектральной плотности энергетической яркости и температуре определялась по формуле:

$$\varepsilon(L) = \Delta L(T) \frac{N_{\text{ш}}}{\Delta N_{\text{Б}}}; \quad \varepsilon(T) = \Delta T \frac{N_{\text{ш}}}{\Delta N_{\text{Б}}} \quad (9) - (10)$$

и оказалась равной $3,1\cdot 10^{-2}$ Вт/м²·стер·мкм ($\Delta T=0,25$ К) для источника излучения 290 К ($N_{\text{ш}}$ — шум регистрирующей аппаратуры; $\Delta N_{\text{Б}}$ — приращение сигнала на выходе системы, соответствующее $\Delta L(T)$ или ΔT), В.

Измерения яркости различных облачных ситуаций в приведенных длинах волн (см. табл. 1) проводились в Средиземном море и Атлантическом океане в дневное и ночное время.

На рис. 2 показана схема съемки относительно солнца, при этом $h_{\text{г}}$ менялось в пределах $-5\div +20^\circ$ при заданных $\varphi=0; 5; 10; 90; 180$. Высота солнца $h_{\odot}$ менялась от 0° до 85° . Одновременно осуществлялось фотографирование облачной ситуации для конкретной пространственной привязки и идентификации исследуемых облаков по их классификации [3].

Спектральная плотность энергетической яркости ($\lambda_{\text{ц}}=2,36$ мкм) моря и атмосферы при $h_{\odot}=40^\circ$ и различных направлениях наблюдения силь-

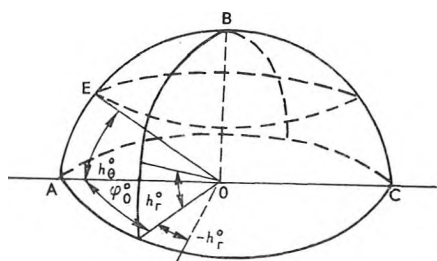
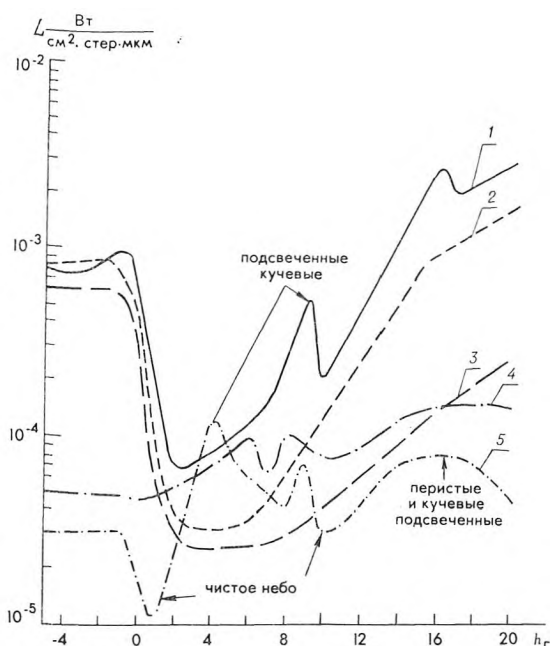


Рис. 2. Схема направлений измерений относительно солнца яркости различных облачных ситуаций

Рис. 3. Зависимость спектральной плотности энергетической яркости моря, атмосферы и облаков при различных углах наблюдения $\varphi=0; 5; 10; 90; 180$



но варьируется в зависимости от угла между направлением наблюдения и направлением на солнце (рис. 3). В области визирования морской поверхности эти вариации объясняются, по-видимому, вкладом в величину яркости отраженного солнечного излучения. При наблюдении неба диффузно рассеянное солнечное излучение дает небольшую добавку, а основной вклад в вариации яркости принадлежит облакам, попадающим в поле зрения радиометра.

В настоящее время такие спектры заложены в память ЭВМ БЭСМ-6 в виде банка данных фоновых ситуаций, что позволяет проводить их статистический и корреляционный анализ для выявления общих закономерностей формирования случайных яркостных полей в ИК диапазоне.

Список литературы

1. Безух Б. А. и др. Инфракрасные радиометры / Препринт ИФ АН БССР. Минск, 1983.
2. Холопов Г. К. // Радиация и облачность. Тарту, 1975.
3. Атлас облаков / Под ред. А. Х. Хригана, Н. И. Новожилова. Л., 1978.

Поступила в редакцию 15.09.86.