Доклады Академии наук СССР
1971. Том 200, № 3

УДК 551.521.32:551.576.4:551.507.362 *ГЕОФИЗИКА*

А. К. ГОРОДЕЦКИЙ, М. С. МАЛКЕВИЧ, В. И. СЯЧИНОВ

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЫСОТЫ ОБЛАКОВ ПО РАДИАЦИОННЫМ ИЗМЕРЕНИЯМ С ИСЗ «КОСМОС-320»

(Представлено академиком А. М. Обуховым 22 III 1971)

Уже в первые годы использования искусственных спутников Земли (ИСЗ) для метеорологии была поставлена задача (см., например, [1, 2]) определения высоты верхней границы облаков h по измерениям интенсивности солнечной радиации, отраженной облаками в полосе поглощения O_2 0,76μ (I_1) и вне полосы (I_2), или по измерениям интенсивности собственного излучения облачности в «окне прозрачности» атмосферы 10 — 12 μ (I_3).

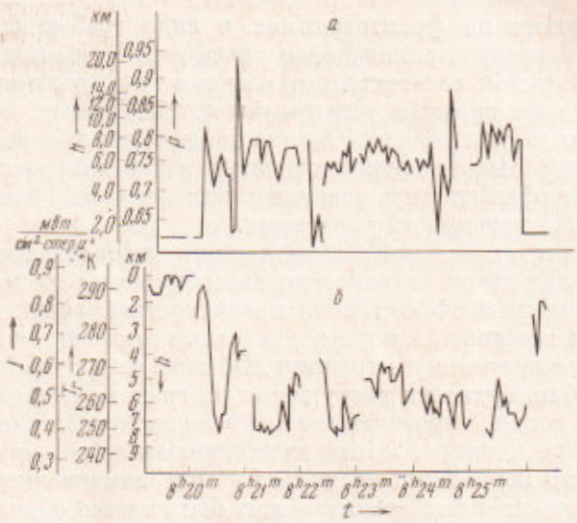

Рис. 1. Определение высоты верхней границы облаков вдоль траектории полета спутника 27 I 1970 г. над экваториальным районом Тихого океана. Время прохождения экватора 8 час. 22 мин., $\lambda = 148°$ в. д. *а* — временной ход отношения интенсивностей P по данным т. ф., *б* — временной ход радиационной температуры T_r по показаниям радиометра

Метод определения h по измерениям I_1 и I_2 основан на том, что отношение

$$I_1 / I_2 = P[w(h)\,m] \quad (1)$$

зависит от содержания O_2 в столбе воздуха между облаком и спутником (w) и воздушной массы $m = \sec\zeta + \sec\theta$ (ζ, θ — зенитное расстояние Солнца и спутника соответственно, P — известная функция пропускания атмосферы в избранном интервале спектра, вычисляемая или определяемая экспериментально с учетом спектральной чувствительности измерительного прибора). Так как относительная концентрация O_2 в атмосфере практически постоянна, $w = w(h)$ однозначно зависит от h. В действительности, отношение (1) зависит еще и от дополнительного содержания O_2 (Δw) на пути рассеяния солнечной радиации в облаке. Если Δw не учитывается, то определенная из (1) фотометрическая высота h_Φ оказывается заниженной ($h_\Phi \leqslant h$). Учет поправки $\delta h_\Phi = h - h_\Phi$ соответствующей Δw, осуществляется с помощью решения уравнения переноса солнечной радиации для имитирующих облака оптически плотных сред, задаваемых оптической толщиной, индикатрисой рассеяния и вероятностью выживания кванта). Однако применение теоретических поправок затруднено из-за отсутствия сведений о характеристиках тех конкретных облаков, над которыми проводятся измерения со спутников.

В связи с этим в [3], где приводятся три примера измерений спектра в полосе O_2 на космическом корабле «Джемини-5», предлагается вводить поправку δh_Φ в зависимости от априорной оценки уровней облачности (низкие, средние и высокие облака). Отсутствие достаточного количества прямых измерений h не позволяет надежно судить о погрешностях описанной методики определения h (этим, вероятно, и объясняется то, что в [3] рассматривается лишь 3 примера, из которых один дает ошибку определения h_Φ около 2 км). По этой причине, разумно сочетать измерения отношения (1) с измерениями I_3 или (что то же самое) радиационной температуры T_r, определяемой равенством

$$B(T_r) = I_3, \qquad (2)$$

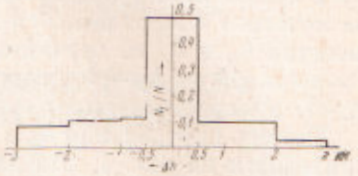

Рис. 2. Плотность распределения вероятности Δh

где $B(T)$ — функция Планка, проинтегрированная по интервалу спектра, соответствующему спектральной чувствительности прибора (соотношение (2) получается путем градуировки прибора). Высота облаков в этом случае определяется из соотношения

$$T(h_p) = T_r, \qquad (3)$$

где $T(h)$ — вертикальное распределение кинетической температуры, которая известна в момент измерений или берется по среднеклиматическим данным (в последнем случае неопределенность h_p составляет $\sim 0{,}5$ км). Так как излучательная способность облаков может быть < 1, а вышележащий слой атмосферы может ослаблять излучение облачной поверхности, то T_r всегда меньше кинетической температуры последней, поэтому $h_p \geqslant h$ ($\delta h_p = h_p - h \geqslant 0$).

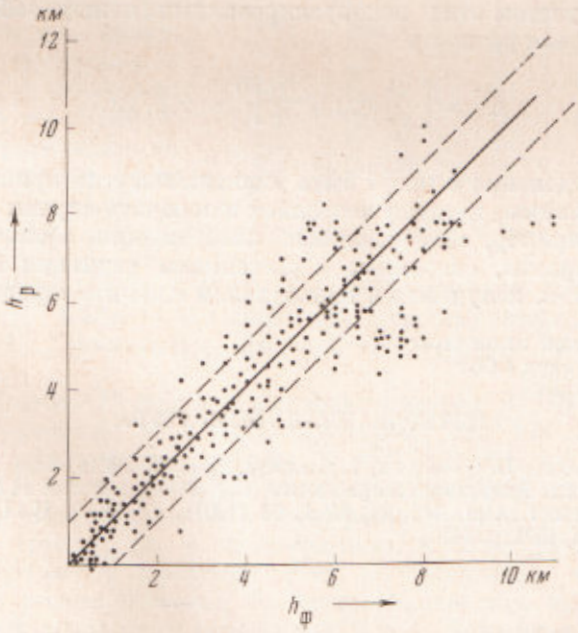

Рис. 3. Регрессия между высотой верхней границы облаков h_Φ и высотой h_p

Следовательно, одновременные измерения I_1 / I_2 и I_3 позволяют определить интервал высот (h_Φ, h_p), внутри которого содержится истинное значе-

ние h *. Такие измерения были проведены на ИСЗ «Космос-320» ([4]). Установленная на этом спутнике оптическая аппаратура включала узкоугольный телефотометр (т.ф.), измерявший I_1 и I_2 с пространственным разрешением 15 км, и узкоугольный и.-к. радиометр, измерявший I_3 в интервале спектра 10,5—11,5 мкм с разрешением 10×30 км^2. В полете обеспечивался периодический контроль спектральной чувствительности т. ф. по Солнцу и абсолютной чувствительности радиометра по излучателю, температура которого измерялась. Этот контроль позволял определить каждую из величин h_Φ и h_p со случайными ошибками, не превышающими $\pm 0{,}5$ км. Разность $\Delta h = h_p - h_\Phi$, содержащая систематическое отклонение $\delta h_\Phi + \pm \delta h_p$ измеряемых высот от истинной, имеет случайную ошибку ε_h.

Пример определения h_Φ и h_p вдоль траектории полета ИСЗ над океаном приводится на рис. 1. Шкала высоты облаков h_Φ привязана к шкале P с учетом положения Солнца, а шкала h_Φ определена по среднеклиматическому профилю температуры. Регрессия между h_p и h_Φ, построенная по 250 измерениям на ИСЗ «Космос-320» (рис. 3), показывает, что в большинстве случаев $|\Delta h| \leqslant 1$ км, т. е. систематическое отклонение h_p от h_Φ и случайная ошибка измерений укладывается в интервал высот ± 1 км. Из плотности распределения вероятностей Δh (рис. 2) следует, что в 50% случаев $\Delta h = \pm 0{,}5$ км, а случаи $0{,}5 < |\Delta h| < 1$ км, $1 \text{ км} < |\Delta h| < 2$ км и т. д. распределены с равной вероятностью. Это означает, что большие величины Δh того и другого знака связаны с нарушением в этих случаях идеальных условий применения рассмотренных методов определения h (см. сноску). Скорее всего, здесь имеет место горизонтальная неоднородность, неплоские границы или другие геометрические факторы облачности в пределах полей зрения приборов, использованных на ИСЗ «Космос-320». Однако даже с учетом этих некоррелированных между собой δh_Φ и δh_p, среднеквадратичная разность

$$\overline{\Delta h} = \left[\sum_i (\Delta h_i)^2 \frac{N_i}{N} \right]^{1/2} = 1{,}2 \text{ км}.$$

Ошибки определения h могут быть уменьшены, если привлечь дополнительную информацию, которая позволяет исключить случаи неоднородной облачности (например, телевизионные изображения облаков), а также, если ввести поправки, связанные с рассеянием радиации в облаке или с ослаблением и.-к. излучения в надоблачном слое атмосферы.

Институт физики атмосферы
Академии наук СССР
Москва

Поступило
17 III 1971

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

[1] G. Yamamoto, D. Q. Wark, J. Geophys. Res., 66, № 10, 3596 (1961). [2] М. С. Малкевич, Тр. Гл. Геофизич. обсерв., в. 166, 102 (1964). [3] F. Saiedy, H. Jacobwitz, D. Q. Wark, J. Atm. Sci., 24, № 1, 63 (1967). [4] M. S. Mslkevich, Space Research, 11, Berlin, 1971, p. 741.

* Следует иметь в виду, что строгое применение соотношений (1)—(3) возможно лишь для сплошной облачности, имеющей плоскую поверхность.