

# Определение поправок, связанных с рассеянием радиации в облаках при определении высоты их верхней границы дистанционным методом

В.И. Сячинов, М.А. Кузнецова

Институт космических исследований РАН  
117997 Москва, ул. Профсоюзная, 84/32  
E-mail: [gora@iki.rssi.ru](mailto:gora@iki.rssi.ru)

В статье проводится анализ результатов измерений яркости облаков в полосе поглощения кислорода и вне её с целью оценки поправок при определении высоты их верхней границы фотометрическим дистанционным методом.

**Ключевые слова:** высота верхней границы облачности, дистанционные методы.

## Введение

Дистанционные исследования Земли (ДЗЗ) используются, в частности, для исследования характеристик облачности. В работах [1-4] рассмотрены физические основы и методы решения задачи определения высоты верхней границы облаков  $H_{\phi}$  по измерениям отраженной солнечной радиации в области полосы поглощения кислорода 0,76 мкм  $I_1$ , относительная концентрация которого слабо варьирует во времени, пространстве и высоте, и вне полосы  $I_2$ .

По измерениям  $I_1$  и  $I_2$  при известном положении Солнца  $\xi_0$  и направлении визирования  $\theta$  функция пропускания  $P$  определяется по формуле

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

зависит от массы поглощающего вещества  $u$  в столбе атмосферы между облаком и наблюдателем, а также от воздушной массы  $m = \sec \xi_0 + \sec \theta$  на пути луча, которая на каждый момент измерений известна. Так как концентрация поглощающего кислорода постоянна, то масса  $u$  – функция высоты границы отражающей поверхности  $h$ . Причем эта же функция пропускания может быть рассчитана по соотношению

$$P_{\Delta\lambda}(m) = \frac{1}{\Delta\lambda} \int_{\lambda}^{\lambda_0} (\lambda - \lambda_0) \cdot \exp(-k_{\lambda} \cdot m) d\lambda \quad (2)$$

где  $\Delta\lambda = \lambda - \lambda_0$  - интервал осреднения по длинам волн;  $k_{\lambda} = \sum_{i=1}^N k_i(\lambda)$  - суммарный

коэффициент поглощения по  $N$  – линиям в интервале  $\Delta\lambda$  с учетом их перекрывания;  $m$  – масса поглощающего вещества в единицах длины, приведенных к нормальному давлению и температуре. Эта задача делится на следующие основные части:

1. Определение функции пропускания при различных положениях Солнца  $\xi_0$  и наблюдателя  $\theta$  с помощью расчетов, основанных на параметрах тонкой структуры полосы поглощения кислорода 0,76 мкм (положения, интенсивности, полуширины и формы линий). На основании этих расчетов устанавливается зависимость между пропусканием  $P$  и массой кислорода на пути лучей на уровне отражающей поверхности. Пример такого расчета с учетом аппаратной функции прибора представлен на рис. 1.

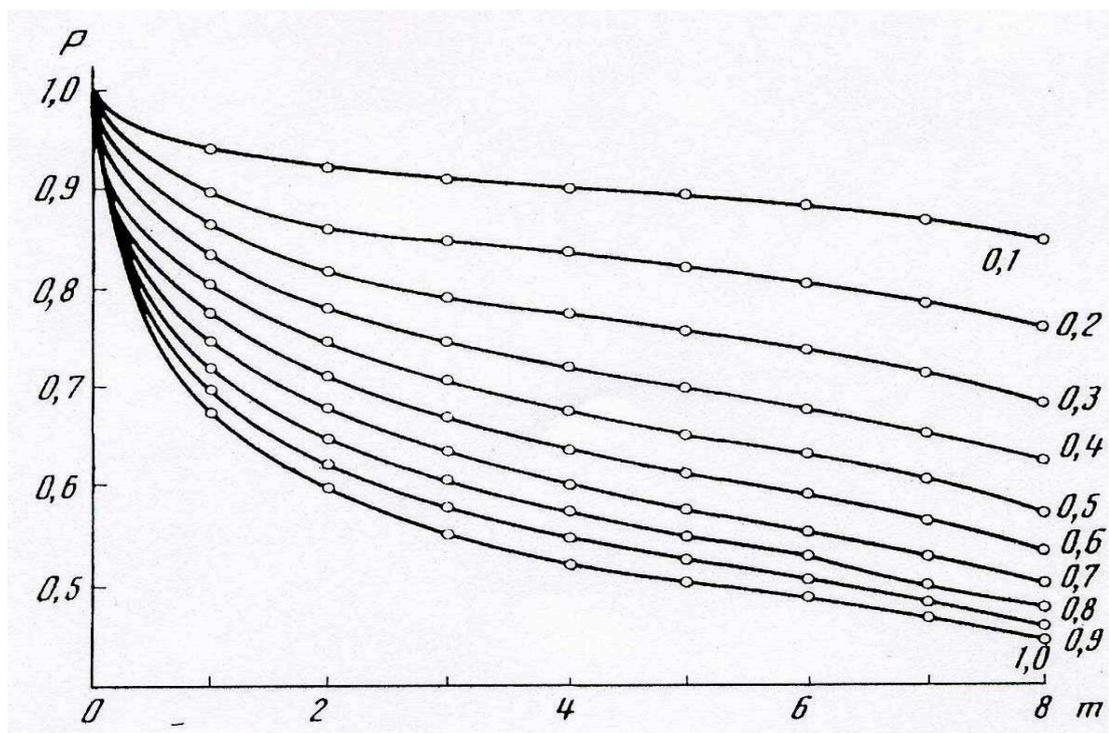


Рис. 1. Рассчитанная функция пропускания

Измерив  $P$  при известной высоте Солнца  $\xi_0$  и угле визирования  $\theta$ , определяется высота отражающей поверхности  $H_\phi$ , в частности высота верхней границы облаков.

2. Определение поправки  $\Delta H$ , связанной с рассеянием радиации в облаке.

### Метод и результаты эксперимента

Существующие оценки величины поправки  $\Delta H$  привели к противоречивым выводам о величине этих поправок. Если по данным самолетных измерений [2]  $\Delta H$  не превосходит 2 км, а по расчетам [4] для облака с бесконечно большой оптической толщиной  $\tau = 1,7$  км, то по данным самолетных измерений [5]  $\Delta H$  может достигать 4,5 км для однослойных облаков и 7 км для многослойных, при их истинных высотах  $H_{обл} \approx 4$  и 5 км. По нескольким сотням измерений с ИСЗ “Космос-320” [6] среднеквадратичная величина  $\Delta H$  равна 0,7 км.

В статьях [7,8] проанализированы различные методы определения  $\Delta H$  к фотометрической высоте верхней границы облаков  $H_\phi$ , связанных с рассеянием радиации в облаках, и получено следующее выражение для вычисления  $\Delta H$  при измерении отраженной солнечной радиации от

облаков при скольжении по верхней кромке облаков и прямого солнечного излучения на уровне верхней границы облаков

$$\Delta H = \frac{H_o}{2\chi} \cdot \ln \frac{D_{обл}}{D_o^c} \quad (3)$$

где  $D = -\ln(I_1/I_2)$  - оптическая плотность,  $H_o = 8$  км,  $\chi = 0,53$ , а  $D_{обл}$  и  $D_o^c$  - величины оптической плотности в полосе поглощения кислорода при отражении солнечной радиации от облака при скольжении над ним и от прямого солнечного излучения в нерассеивающей атмосфере на том же уровне соответственно.

На основе измерений прямого солнечного излучения в безоблачных условиях на различных уровнях величину разности этих уровней  $H_{np}^{\phi}$  можно определить по аналогичному (3) соотношению

$$H_{np}^{\phi} = \frac{8}{2\chi} \cdot \ln \frac{D_o^c}{D_o^i} \quad (4)$$

где  $D_o^c$  и  $D_o^i$  при скольжении по верхней границе облака и вышележащих уровнях пролета самолета соответственно.

Из-за условий безопасности полетов не всегда удастся проводить измерения при скольжении по верхней кромке облаков. Поэтому проводились измерения отраженной облаками солнечной радиации с “просветом” между верхней границей облаков и высотой полета самолёта  $H_{np}$ , тогда из полученной по формуле (3) величины поправки нужно вычесть величину просвета, определяемую по соотношению (2). Для таких условий измерений величина поправки  $\Delta H$  определяются следующим образом

$$\Delta H = \frac{8}{2\chi} \left( \ln \frac{D_{обл}^i}{D_o^i} - \ln \frac{D_o^c}{D_o^i} \right) \quad (5)$$

В настоящем исследовании поставлена цель получить значение величины  $\Delta H$  для реальных однослойных оптически плотных облаков. При этом был использован метод одновременного измерения отраженного облаками солнечного излучения в области полосы поглощения  $I_1$  кислорода 0,76 мкм и  $I_2$  вне ее - 0,744 мкм с разрешением 50 Å°, а также прямого солнечного излучения в надоблачном слое. На основании измеренных величин определялась величина оптической плотности  $D = -\lg(I_1/I_2)$  как при отражении от облака  $D_{обл}$  и прямого солнца  $D_o^c$ . Выбор спектральных интервалов для измерений с самолета был обусловлен как поставленной целью, так и, в определенной степени, необходимостью получить дополнительную информацию для более надежной интерпретации прежних результатов измерений яркости облаков со спутников “Космос-149” и “Космос-320”. Измерения проводились с борта самолета ИЛ-14 с помощью телефотометра ТФ-II. Принцип работы телефотометра описан в [9], в котором механический коллиматор является полевой диафрагмой, определяющей поле зрения прибора 3°. Объектом измерений в зависимости от положения поворачивающегося зеркала может служить:

а) интенсивность солнечной радиации, отраженной от исследуемой поверхности (облака) для определения  $D_{обл}$ ;

б) величина прямого солнечного излучения, падающего на молочное стекло (диффузный экран) для определения  $D_0^c$ ;

в) интенсивность света контрольного излучателя, с целью проверки чувствительности измерительных трактов.

Абсолютная градуировка фотометра проводилась на основе разработанных в фотометрии методов [10] и заключалась в измерении яркости ламбертовой поверхности, освещаемой с различных расстояний светоизмерительной лампой типа СИ с известной цветовой температурой и силой света. Ошибка абсолютной привязки составляет 1-3%. Достоверность определения градуировочных коэффициентов вне полос поглощения молекулярных атмосферных газов проверялась путем сопоставления полученных долгим методом Бугера величин внеатмосферного излучения Солнца с известными спектральными значениями солнечной постоянной [11].

Измерения с самолета проводились как вдоль верхней кромки оптически плотной слоистой облачности верхнего и нижнего ярусов, так и на нескольких уровнях над ней в течение 30-40 мин для определения  $D_{обл}$ . На этих же уровнях измерялось прямое солнечное излучение для определения  $D_0^i$ . На основе проведенных измерений на различных высотах 0,05; 0,1; 0,2; 0,8; 1,5; 1,8; 3,2 и 3,85 км полета самолета над верхней границей облаков было проанализировано по 25 реализаций для каждого уровня и определена величина поправки  $\Delta H$  по формулам (3) и (5). Результаты определения  $\Delta H$  представлены на *рис. 2*.

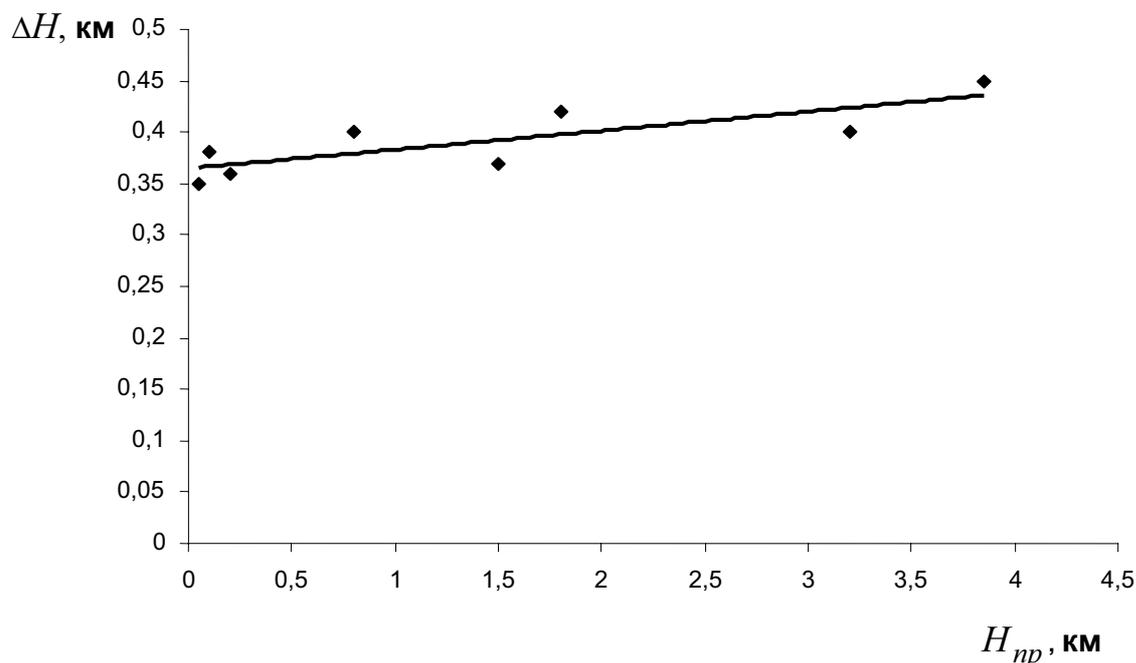


Рис. 2. Измеренные величины поправок

Средняя величина поправки для слоистых и слоисто-кучевых оптически плотных облаков  $\Delta H = 0,39 \pm 0,05$  км.

Измерения солнечного излучения с различных высот над верхней границей облаков дают возможность определить величину просвета  $H_{пр}^{\phi}$  между облаком и самолетом, используя

выражение (4), и сравнить  $H_{np}^{\phi}$  с его истинным значением  $H_{np}$  и тем самым проверить достоверность формулы (1) для определения величины поправки  $\Delta H$ . На рис. 3 приведены результаты такого сравнения.

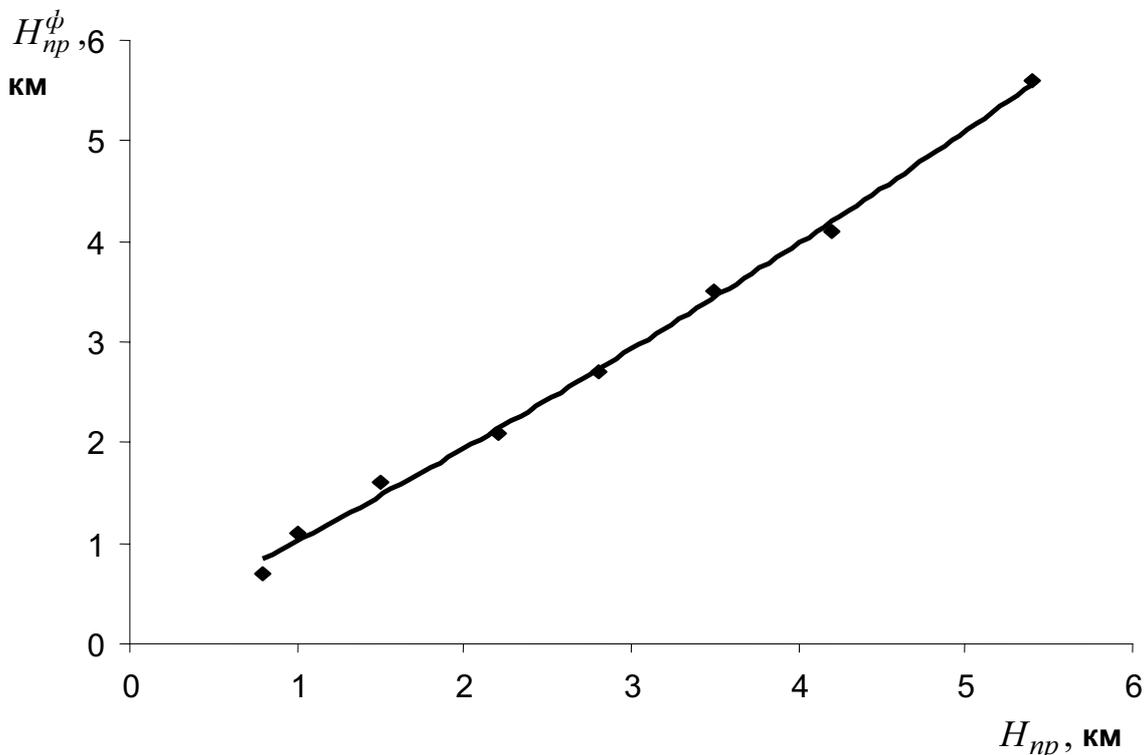


Рис. 3. Сравнение истинных величин просветов с измеренными

Из рис. 3 видно, что во всех случаях  $|\Delta h| \leq 0,2$  км  $\Delta h = (H_{np} - H_{np}^{\phi})$ , т. е. случайная ошибка укладывается в интервале высот  $\pm 0,2$ , а среднеквадратичное отклонение равно 0,14 км.

На основании вышеизложенного можно сделать следующий вывод. Величина поправки  $\Delta H$  к фотометрической высоте  $H_{\phi}$  верхней границы облаков оптически толстого слоя составляет 0,39 км, т.е. высоту верхней границы оптически плотных облаков  $H_{\phi}$ , определенную фотометрическим методом, нужно увеличить не более чем на 0,39 км.

### Литература

1. Малкевич М.С. Оптические исследования атмосферы со спутников. М.: Наука, 1973. 303 с.
2. Saiedy F., Hilleary D.T., Morgan W.A. Cloud-top altitude measurements from satellites // Appl.Opt., V. 4, № 4, 1965, P.495-500.
3. Saiedy F., Yacobowitz H., Wark D.Q. On cloud-top determination from Femini-5 // J. Atmos.Sci., V. 24, №1, 1967, P.63-69
4. Галин В.Я. Численное моделирование переноса излучения в атмосфере и задачи определения высоты облаков со спутника. Новосибирск, Дис.ВЦСО АН СССР, 1972. 109 с.

5. *Гречко Е.И., Дианов-Клоков В.И., Малков И.П.* Измерение эффективных путей пробега фотонов при отражении и пропускании света облаками по полосе кислорода 0,76 мкм с самолета // Изв. АН СССР, ФАО, Т.10, № 9, 1974, 471-485 с.
6. *Сячинов В.И., Козлов Е.М.* Определение высоты верхней границы облаков с ИСЗ “Космос-320” // Изв. АН СССР, ФАО, Т.10, № 9, 1974, С. 950-958.
7. *Малкевич М.С., Чагар Л.У., Шукуров А.Х.* О поправках, связанных с рассеянием радиации в облаках, при определении их высоты фотометрическим методом // Изв. АН СССР, ФАО. 1975. Т.11. № 9. С. 892-898.
8. *Малкевич М.С., Чагар Л.У.* Об учете пропускания радиации в облаках при определении их высоты фотометрическим методом // Изв. АН СССР, ФАО. 1976. Т.12. № 2. С. 151-158.
9. *Козлов Е.М., Бадаев В.В.* Самолетные исследования передаточной характеристики атмосферы в участках спектра 0,61; 0,744 и 1,036 мкм // Изв. АН СССР, ФАО. 1976. Т. 12. № 9. С. 938-946.
10. *Ильин Р.С., Федотов Г.И., Федин Л.А.* Лабораторные оптические приборы. М.: Машиностроение, 1966. 496 с.
11. *Макарова Е.А., Харитонов А.В.* Спектральное распределение энергии, излучаемой солнцем в области от 1800 А до 4 мм, выраженное в абсолютных единицах, и солнечная постоянная // Сб. “Астрофизические исследования”. Л.: Наука, 1970. Т.1. С. 33-48.
12. *Городецкий А.К., Малкевич М.С., Сячинов В.И.* Определение высоты облаков по радиационным измерениям с ИСЗ “Космос-320” // Докл. АН СССР, 1971. Т.200. № 3. С. 588-590.

## **Cloud upper border remote detection corrections related to radiation dispersion in clouds**

**V.I. Syachinov, M.A. Kuznetsova**

*Space Research Institute of RAS*

*E-mail: [gora@iki.rssi.ru](mailto:gora@iki.rssi.ru)*

The paper provides the results of cloud brightness measurements within the oxygen absorption band and outside it to assess of corrections of cloud upper border remote photometric detection.

**Keywords:** cloud upper border, remote sensing, dispersion in clouds.