

Н.Е. Лебедев, С.В. Станичный

СВЯЗЬ НИСХОДЯЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ АТМОСФЕРЫ В ИК-ДИАПАЗОНЕ 10...12 МКМ С ИНТЕГРАЛЬНЫМ ПРОПУСКАНИЕМ

Представлена связь интегрального пропускания атмосферы P_0 с нисходящим и пригоризонтальным излучением атмосферы $I(0)$, $I(90)$ в виде соотношения $I(0)/I(90) = C_0(1 - P_0)$, где $C_0 = 0,92...0,93$. Оно основано на численных расчетах по модели LOWTRAN 7 и аналитических расчетах с использованием параметризаций для вертикальных профилей температуры и функции пропускания атмосферы; абсолютная точность определения P_0 по этому соотношению оценивается в 0,02, практическая точность определения P_0 по экспериментально определенным $I(0)$, $I(90)$ составляет 0,035...0,025 при $P_0 = 0,5...0,85$.

Приведены расчеты P_0 для экспериментальных данных, полученных на акватории Атлантики в спектральных интервалах 11 и 12 мкм; связь P_0 с влажностью приводного воздуха a близка к линейной.

В задачах тепловой локации и дистанционного измерения температуры наибольший интерес представляет проблема распространения ИК-излучения в так называемых <окнах прозрачности> атмосферы, где пропускание максимально, а искажающее влияние соответственно минимально. Экспериментальные и теоретические исследования пропускания безоблачной атмосферы в ИК-диапазоне являются предметом изучения в [1–4]. Измерения пропускания проводятся либо по измерению солнечного излучения, либо при помощи многоходовых кювет и имеют ошибку 0,02–0,05 [2]. Такие измерения требуют привлечения довольно сложного измерительного оборудования, что затрудняет проведение экспериментальных исследований в широком диапазоне реальных метеоусловий. В то же время большое распространение получили радиометры [5–7], которые достаточно просты и имеют высокую температурную чувствительность.

В статье предлагается методика оценки пропускания атмосферы в диапазоне 800–1000 см^{-1} по измерениям нисходящего и пригоризонтального излучений $I(0)$, $I(90)$.

Модельные оценки

Для трех моделей атмосферы (тропическая, среднеширотное лето, арктическое лето) по программе LOWTRAN 7 были рассчитаны интенсивности нисходящего зенитного и пригоризонтального излучений $I(0)$, $I(90)$ для спектральных интервалов 800...1000 см^{-1} (12,5...10 мкм) с шагом 5 см^{-1} . На рис. 1 представлена связь интегрального пропускания P_0 атмосферы с отношением $I(0)/I(90)$. На практике $I(90)$ можно заменить величиной $B(T_0)$ – функцией Планка от приповерхностной температуры атмосферы T_0 , т.к. $B(T_0) \approx I(90)$. Максимальные отклонения находятся в спектральных интервалах 980 ... 1000 см^{-1} , где сказывается селективное поглощение озоном.

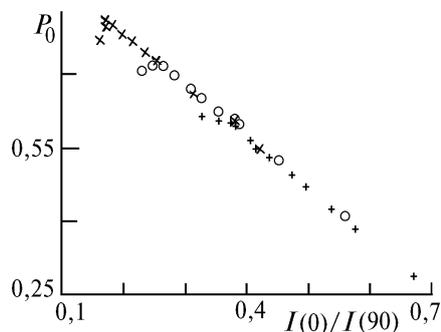


Рис. 1. Связь интегрального пропускания P_0 с интенсивностью нисходящего зенитного излучения, нормированной на интенсивность пригоризонтального излучения $I(0)/I(90)$ для трех моделей атмосферы по LOWTRAN 7: тропической (+++), летней среднеширотной (○○○), летней арктической (×××) в спектральных интервалах 800–1000 см^{-1} с шагом 15 см^{-1}

Эта связь с отклонениями не более 0,015 для спектральных интервалов 800...980 см⁻¹ (не более 0,04 для 980...1000 см⁻¹) описывается выражением:

$$I(0) / B(T_0) \approx I(0) / I(90) = C_0 (1 - P_0), \quad (1)$$

где $C_0 = 0,93$.

Таким образом, расчеты по LOWTRAN 7 показывают, что, зная интенсивность нисходящего и пригоризонтального излучения (или температуру приводного воздуха), с точностью около 0,02 можно определять интегральное пропускание вертикального столба атмосферы. Это позволяет, например, по аэрологическим измерениям оценивать влияние на перенос излучения различных атмосферных компонентов.

В то же время реальные профили функции пропускания и температуры могут отличаться от модельных, представленных в LOWTRAN 7. На простом примере проведем оценку такого отличия, учитывая, что характерными для атмосферы являются линейный вертикальный профиль температуры и экспоненциальный для поглощающих компонент. Пусть функция пропускания P и высотный профиль температуры T задаются выражениями

$$P(z; 0) = P_0 + (1 - P_0) \exp(-\beta z); \quad (2)$$

$$T(z) = T_0 - \alpha z, \quad (3)$$

где α и β – некоторые константы; z – высота; $P_0 = P(\infty, 0)$ – интегральное пропускание атмосферы.

Уравнение переноса, нормированное на $B(T_0)$, имеет вид

$$\Gamma = \frac{I(0)}{B(T_0)} = \int_0^\infty \frac{B(T(z)) \partial P(z; 0)}{B(T_0) \partial z} dz. \quad (4)$$

Характерной особенностью уравнения (4) является тот факт, что подынтегральное выражение знакопостоянно на всем интервале интегрирования, а следовательно, величина Γ монотонна по параметрам α и β . Таким образом, для любых более сложных профилей $T_c(z)$ и $P_c(z; 0)$, лежащих между профилями температуры и пропускания, задаваемыми величинами $\alpha_1 < \alpha_2$ и $\beta_1 < \beta_2$, будут выполняться соотношения $\Gamma(\alpha_1) < \Gamma_c < \Gamma(\alpha_2)$ и $\Gamma(\beta_1) < \Gamma_c < \Gamma(\beta_2)$.

Подставляя значение $T(z)$ согласно (3) в функцию Планка и учитывая, что все поглощающие компоненты находятся в нижней тропосфере, т.е. на области интегрирования $\alpha z \ll T_0$, имеем

$$B(T(z)) / B(T_0) = \left[\exp\left(\frac{hc}{\lambda k (T_0 - \alpha z)}\right) - 1 \right] / \left[\exp\left(\frac{hc}{\lambda k T_0}\right) - 1 \right] \approx \exp(-hc \alpha z / (\lambda k T_0^2)).$$

Переходя в (4) к интегрированию по P , с учетом (2) получаем $z = -1/\beta \ln[(P - P_0)/(1 - P_0)]$, соответственно

$$\Gamma \approx \int_{P_0}^1 \exp\{(hc \alpha / \lambda k T_0^2 \beta) \ln[(P - P_0)/(1 - P_0)]\} dP(z; 0) = (1 - P_0) / (1 + hc \alpha / (\lambda k T_0^2 \beta)). \quad (5)$$

Выражение (5) можно записать в виде

$$\Gamma = C (1 - P_0), \quad (6)$$

где параметр $C = C(\alpha, \beta, \lambda, T_0)$; $C \approx 1$.

Для характерных значений $\alpha = 6$ К/км, $\beta = 1,1$ км⁻¹, $\lambda = 11,0$ мкм, $T_0 = 300$ К, $C = 0,92$, что хорошо совпадает с рассчитанным ранее значением $C_0 = 0,93$.

Выражение (5) совпадает с точным решением (4) при $\alpha \rightarrow 0$ или $\beta \rightarrow \infty$, т.е. при изотермической атмосфере или когда все поглощающие компоненты находятся вблизи поверхности – в этих случаях величина $\Gamma = 1 - P_0$ согласно (4) и (5).

Анализируя выражение (5), нужно отметить слабую зависимость параметра C от длины волны. Так, при указанных выше значениях α , β и T_0 для $\lambda=8$ мкм $C=0,923$, а для $\lambda=12,5$ мкм $C=0,935$, что при выборе $C=0,93$ дает ошибку δP оценки величины P_0 : $\delta P \leq 0,007$; следовательно, выражение (1) будет справедливо с указанной точностью для любого спектрального интервала внутри рассматриваемого диапазона 800...1000 см⁻¹.

Из (5) видно, что при вариациях $\alpha = 0...12$ К/км, т.е. от изотермической до атмосферы с очень быстро убывающей в зависимости от высоты температурой, максимальные ошибки определения P_0 при $P_0=0,5...1$ не превысят 0,05. Характерные вариации $\beta = 0,4...10$ км⁻¹ (большие значения соответствуют ситуациям, когда основные поглощающие компоненты находятся у поверхности, например туман), также приводят к ошибкам, не превышающим 0,05 в указанном диапазоне.

Оценка погрешности расчета P_0 по данным измерений имеет вид

$$\frac{\delta P_0}{P_0} \approx \frac{1 - P_0}{P_0} \left(\frac{\delta C_0}{C_0} + \frac{\delta I(90)}{I(90)} + \frac{\delta I(0)}{I(0)} \right) + \frac{0,02}{P_0};$$

последнее слагаемое характеризует точность соотношения (1). Первое слагаемое в скобках не превышает 0,025. Параметры ИК-радиометра позволяют определять значения $I(90)$ с погрешностью 1% и $I(0)$ с погрешностями 1,5; 4 и 6% при $P_0 = 0,5; 0,7$ и $0,85$. Тогда $\delta P_0 \approx 0,035; 0,03$ и $0,025$ а $\delta P_0/P_0 \approx 7; 4$ и 3% для данных величин P_0 . Таким образом, по измеренным величинам $I(0)$ и $I(90)$ можно довольно точно определить интегральное пропускание атмосферы в широком диапазоне изменения метеорологических параметров.

Экспериментальные исследования

Для проведения двухканальных измерений в лаборатории радиометрии МГИ АН Украины был разработан специальный комплекс, включающий в себя средства управления и регистрации излучения. Изменение угла визирования осуществлялось поворотом зеркала и составляло от 0 до 180° от зенита, причем поворот зеркала позволял осуществлять визирование калибровочной ванны. Конструктивная схема радиометра аналогична описанной в [7].

Область чувствительности радиометра определялась фильтрами с центрами 11 и 12 мкм и шириной пропускания 0,3 мкм.

Измерения проводились на Северной Атлантике от 0 до 55°с.ш. в Северном море, на разрезе через Атлантику от Великобритании до Бостона, на широтном разрезе от Бостона до 10°с.ш., у Северо-Западного побережья Африки, в Средиземном и Черном морях.

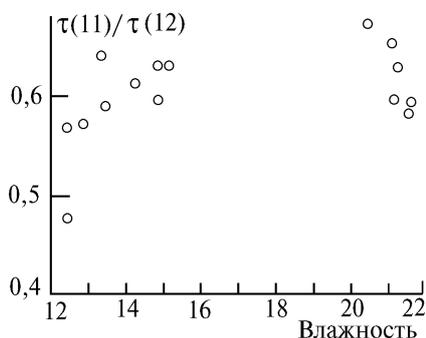


Рис. 2

В качестве примера на рис.2 приведена зависимость отношения оптических толщин $\tau(\lambda=11)/\tau(\lambda=12$ мкм), $\tau(\lambda)=\ln(P_0(\lambda))$, рассчитанных по экспериментальным данным, от влажности приводного воздуха a (г/м³). Постоянство или слабая изменчивость такого отношения лежат в основе двухспектральных методик восстановления ТПО [8–10]. Отметим, что полученное по (1)

среднее значение такого отношения 0,6 отличается от рассчитанного по LOWTRAN 7 для стандартных атмосфер 0,71, что явилось следствием больших значений P_0 (рассчитанных по LOWTRAN 7) для канала 12,0 мкм, чем полученных экспериментально в сходных метеословиях.

Проведение синхронных аэрологических измерений вместе с измерениями нисходящего излучения позволит оценить качество расчетных моделей LOWTRAN.

Другим аспектом использования соотношения (1) может быть поиск связи пропускания P_0 с приповерхностными температурой и влажностью, позволяющей прогнозировать характеристики переноса излучения только по метеорологическим измерениям.

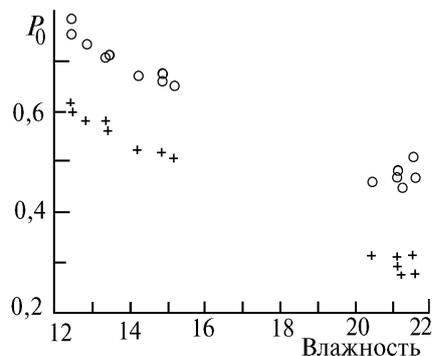


Рис. 3

На рис. 3 показана зависимость интегрального пропускания P_0 в спектральных интервалах 11 и 12 мкм от влажности приводного воздуха для измерений, полученных на акватории Северной и Экваториальной Атлантики. Она аппроксимируется зависимостью вида $P_0 = 1,03 - 0,035 a$ для канала 12 мкм и $P_0 = 1,14 - 0,032 a$ для канала 11 мкм.

Такая связь P_0 с a может быть следствием существующей автотемпературности вертикальных профилей последней [11].

Заключение

В статье на основе численных (по LOWTRAN 7) и аналитических расчетов с использованием параметризаций для вертикальных профилей температуры и функции пропускания атмосферы предложена методика определения интегрального пропускания атмосферы P_0 по измерениям нисходящего и пригоризонтального излучения атмосферы $I(0)$, $I(90)$.

Приведены расчеты P_0 для экспериментальных данных, полученных на акватории Атлантики в спектральных интервалах 11 и 12 мкм; величина P_0 оказалась линейно связанной с влажностью приводного воздуха a в диапазоне 10 ... 23 г/м³.

Авторы выражают признательность И.А. Осовскому за разработку программного обеспечения первичной обработки данных.

1. Ла Рокка // ТИИЭР. 1975. Т. 63. С. 89–111.
2. Парамонова Н. Н. // Труды ГГО. 1985. Вып. 496. С. 79–84.
3. Фомин В. В. Молекулярное поглощение в инфракрасных окнах прозрачности. Новосибирск: Наука, 1986. 234 с.
4. Kneizys F. X., Shettle E. P. et al. User's Guide to LOWTRAN 7 // Rep. GL-TR-89-0122, Burlington. MA: Spectral Sciences, Inc. 1989.
5. Бычкова И. А., Викторов С. В., Виноградов В. В. Дистанционное определение температуры моря. Л.: Гидрометеоздат, 1988. 224 с.
6. Поварков В. И., Иванов Н. Е. // ОМП. 1983. N 4. С. 32–33.
7. Скорохватов Н. А., Попов Н. М. // Тезисы докладов Всесоюз. совещания по актинометрии. Таллин, 1980. Т. 2. С. 164–167.
8. Чавро А. И. // Исследование Земли из космоса, 1982. N 5. С. 112–115.
9. Barton I. J. // Quart. J. Roy. Meteor. Soc. 1983. V. 109. P. 365–378.
10. Prabhacara C., Dalu G., Kunde V. G. // Journ. Geophys. Res. 1974. V. 79. N 33. P. 5039–5044.
11. Тимофеев Н. А. // Метеорология и гидрология. 1979. N 8. С. 55–62.

N. E. Lebedev, S. V. Stanichny. **Relation Between Downward IR 10...12 μm Atmospheric Radiation and Integral Transmittance.**

Relation between integral atmospheric transmittance P_0 and downward and near-horizontal atmospheric radiation $I(0)$, $I(90)$ is presented as $I(0)/I(90) = C_0(1 - P_0)$, where $C_0 = 0.92 \dots 0.93$. It is based on LOWTRAN 7 model of numerical calculations and analytical calculations using parametrized vertical temperature profile and atmospheric transmittance function. Absolute accuracy of P_0 determination via this relation is estimated as 0.02, while its practical accuracy based on experimentally measured $I(0)$, $I(90)$ is about 0.035 ... 0.025 for P_0 range from 0.5 to 0.85.

P_0 calculations based on the Atlantic Ocean experimental data in the spectral intervals of 11.0 and 12.0 μm are presented; dependence of P_0 on near surface air humidity a is close to linear one.