

Д.т.н. В.И. Кривцова, д.т.н. В.М. Комяк

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОДЕРЖАНИЯ МАЛЫХ ГАЗОВЫХ КОМПОНЕНТ НА ОБЪЕКТАХ ПОВЫШЕННОЙ ОПАСНОСТИ

Рассмотрены методологические подходы направленные на совершенствование технологии определения опасных концентраций малых газовых составляющих в опасных технологических процессах

Постановка проблемы. Физической основой всех дистанционных методов измерения МПС является наличие спектрально локализованных полос поглощения в атмосфере, соответствующих различным малым газовым компонентам.

Как правило, дистанционные методы определения МКГ имеют комплексный характер, так как измеряемая на спутнике яркость излучения зависит не только от интересующего нас параметра, например, содержания МГТС в атмосфере, но и от других параметров физического состояния атмосферы и подстилающей земной поверхности. Так, в методе ПРО существенное влияние на ослабление излучения могут оказывать молекулярное и аэрозольное ослабление. В методе ТИ существенное влияние на формирование уходящего излучения оказывает вертикальный профиль температуры атмосферы, а в методе ОРСИ – атмосферный аэрозоль и характер подстилающей земной поверхности. Кроме того, полосы поглощения (излучения) различных МПС могут перекрываться, что также является причиной необходимости комплексного подхода при решении задач дистанционного определения содержания МКГ. Необходимо также отметить, что комплексный характер задачи предъявляет и соответствующие требования к спектральным характеристикам спутниковых приборов, обуславливая, в частности, необходимость измерения в более широком диапазоне спектра для исключения влияния «мешающих» параметров.

Анализ последних достижений и публикаций. Анализ опубликованного материала по вопросам определения предельно-допустимых концентраций опасных газовых составляющих показал не достаточную освещенность проработку этих вопросов в современной научной публицистике [1-5].

Постановка задачи и ее решение. Результаты измерения рассеянного системой «Земля—атмосфера» солнечного излучения в области 0,2...4 мкм содержат информацию о вертикальных профилях и общем содержании МГТС атмосферы. Это обусловлено наличием в данной области спектра полос поглощения различных МПС и заметным влиянием молекулярного поглощения на формирование уходящего от Земли излучения.

При проведении измерений с ИСЗ с целью определения общего содержания компонент атмосферы или их вертикального распределения возможны два варианта ориентации прибора:

- в направлении горизонта;
- в направлении в надир.

Схема измерений с ИСЗ методом спектроскопии рассеянного атмосферой излучения (лимбовый метод) представлена на рис 1. Когда линия визирования проходит мимо поверхности Земли, второе слагаемое в формуле (1) отсутствует и измеряемая величина – профиль спектральной яркости $L(\theta_0, h_0)$ дневного горизонта – описывается соотношением:

$$L(\theta_0, h_0) = \int_{l_i} B(\theta_0, h_0, l) \exp[-\tau(h_0, l)] dl, \quad (1)$$

где $B(\theta_0, h_0, l)$ – спектральная яркость излучения, пришедшего в точку l линии визирования и рассеянного в направлении к ИСЗ вдоль линии визирования (функция источника); $\tau(h_0, l)$ – спектральная толщина атмосферы по линии визирования l_i , (см. рис. 1) от точки l в направлении к ИСЗ.

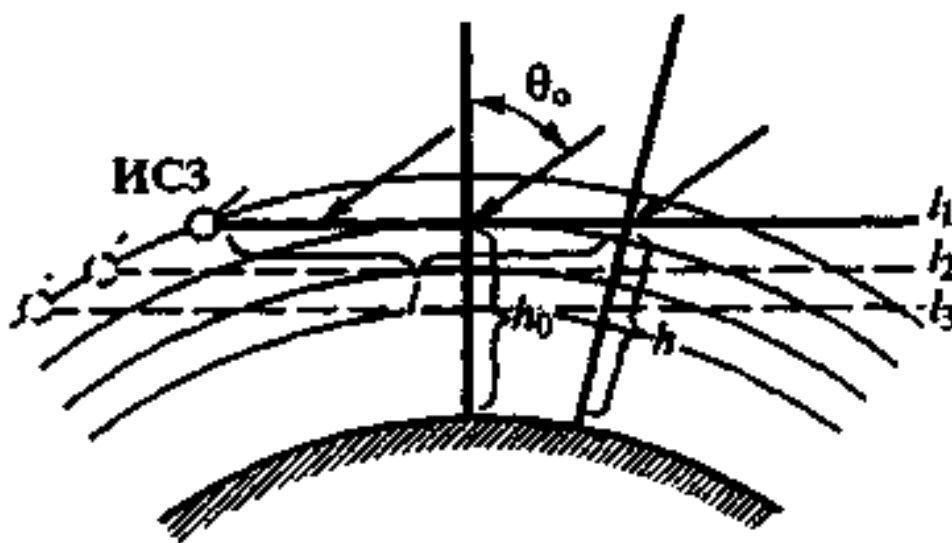


Рис. 1 – Схема измерений с ИСЗ методом спектроскопии рассеянного атмосферой излучения (лимбовый метод)

В общем случае состав излучения, принятого расположенным на ИСЗ прибором, сложен. Спектральный состав различных компонент уходящего излучения, рассчитанный с использованием общепринятых моделей атмосферы, представлен на рис. 2. Функции интенсивности L_p и $L_{p+отр}$ соответствуют типичным условиям над сушей и океаном при значении зенитного угла Солнца $\theta_0 = 45^\circ$. Интенсивности $L_{отр}$ и

$L_{p+отр}$ рассчитаны при двух значениях альbedo подстилающей земной поверхности A (0,2 – для суши и 0,02 – для океана). Интенсивность теплового излучения подстилающей поверхности с температурой $T = 300$ К рассчитана при двух значениях коэффициента излучения подстилающей земной поверхности δ (0,98 и 0,8).

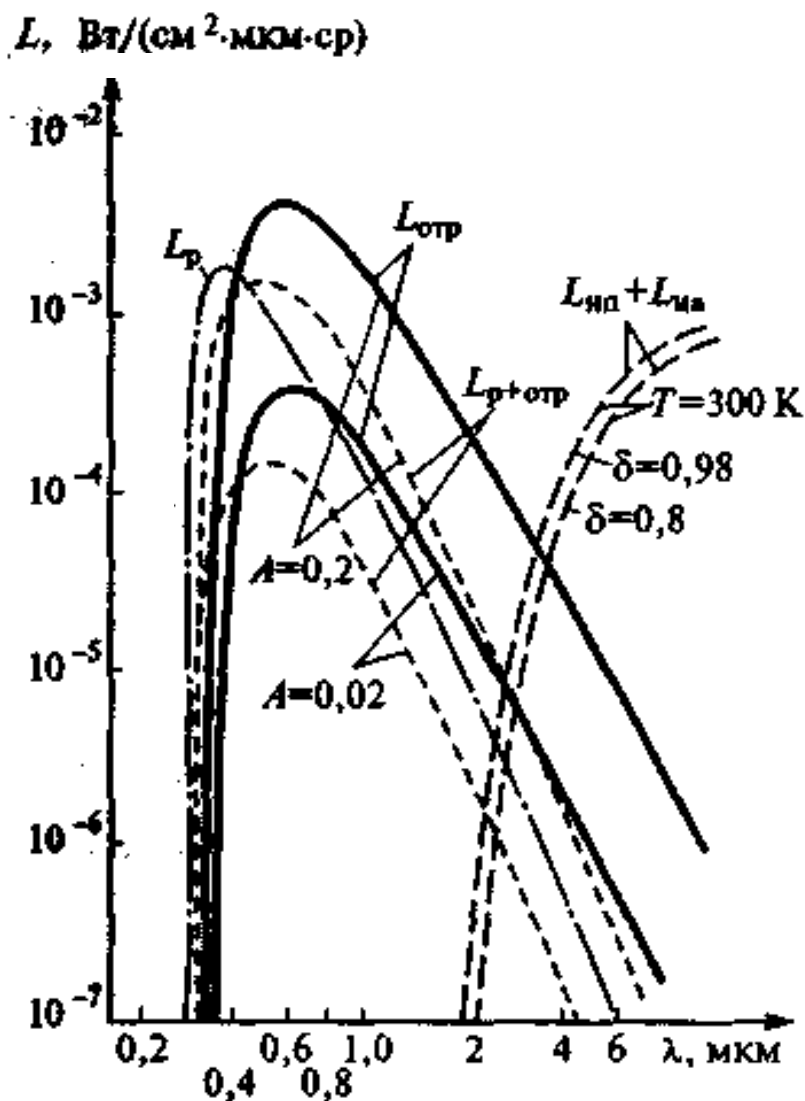


Рис. 2 – Спектральный состав компонент уходящего излучения: L_p – однократно и многократно рассеянное атмосферой солнечное излучение; $L_{отр}$ – отраженное подстилающей поверхностью солнечное излучение; $L_{p+отр}$ – излучение, претерпевшее отражение поверхностью и рассеяние в атмосфере; $L_{нип}$ – собственное тепловое излучение атмосферы; $L_{ниа}$ – тепловое излучение подстилающей поверхности

Таким образом, каждая конкретная задача по определению содержания газовых компонент атмосферы с использованием измерений рассеянного излучения с ИСЗ требует тщательного анализа спектров излучения источников, попадающих в поле зрения прибора, моделирования механизмов переноса этого излучения в атмосфере и разра-

ботки упрощенных моделей, применение которых требует определения возможно меньшего числа параметров.

Одним из примеров использования упрощенной модели в спутниковых измерениях рассеянного излучения является определение общего содержания озона и его высотного профиля прибором, ориентированным в надир. Солнечная радиация в УФ-области спектра 0,2 – 0,3 мкм сильно поглощается озоном, содержащимся в слое атмосферы 10 – 50 км, и практически не достигает земной поверхности. Вместе с тем солнечная радиация в УФ-области спектра 0,2 – 0,3 мкм сильно рассеивается молекулами воздуха и аэрозолями даже в разреженной земной атмосфере, лежащей выше слоя озона. Поэтому некоторая доля солнечной радиации в этой области спектра отражается земной атмосферой в мировое пространство, не достигнув тех уровней, где концентрация озона велика. Для среднеширотной модели озона максимум концентрации приходится на высоты 20 – 24 км.

Выражение для интенсивности восходящего в надир излучения в приближении однократного молекулярного рассеяния можно записать в следующем виде:

$$L(\theta_0) = S_\lambda \frac{3\sigma_m}{16\pi} (1 + \cos^2 \theta_0) \int_0^{p_0} \exp\{-(1 + \sec \theta_0)[kX(p) + \sigma_m]\} dp, \quad (2)$$

где πS_λ – солнечная постоянная; k – показатель поглощения озона, который в записи (2) предполагается независимым от T (и, следовательно, от p); $X(p)$ – количество озона выше уровня с давлением p ; p_0 – давление на уровне подстилающей земной поверхности; σ_m – показатель молекулярного рассеяния; $\frac{3}{16\pi}(1 + \cos^2 \gamma) = \chi_m(\gamma)$ – индикатриса молекулярного рассеяния (для надирного наблюдения $\gamma \equiv \theta_0$, где θ_0 – зенитный угол Солнца).

Рассмотрим применимость соотношения (2) для решения задач дистанционного зондирования с точки зрения анализа вклада рассеяния на аэрозоле и вклада отражения от подстилающей поверхности на величину восходящего излучения для трех длинноволновых каналов в полосе поглощения озона и трех высот Солнца ($\theta_0 = 15, 45$ и 75°) и надирных измерений.

В табл. 1 приведены ошибки (в процентах) в расчетах яркости излучения в УФ-диапазоне спектра, связанные с неучетом рассеяния на аэрозолях и отражения от земной подстилающей поверхности (альbedo поверхности полагалось равным $A = 0,15$) для трех длин волн. Как следует из этой таблицы, наибольшие погрешности, обусловленные неучетом аэрозоля и отражения от подстилающей земной поверхности, наблюдаются для самого длинноволнового из рассмотренных

каналов измерений (0,31 мкм) и при больших высотах Солнца ($\theta_0 = 15^\circ$). С уменьшением длины волны и увеличении зенитного угла Солнца точность приближений модели улучшается. Так, при $\theta_0 = 75^\circ$ погрешности в расчетах яркости восходящего излучения не превышают 1% для всех длин волн. Для длины волны 0,302 мкм ошибки меньше (чем в других каналах) для всех трех рассмотренных значений зенитного угла Солнца.

Таблица 1 – Ошибки в расчетах восходящего излучения в УФ-диапазоне спектра

Условия расчета	λ , мкм							
	0,302	0,305	0,310	0,302	0,305	0,310	0,302	0,305
	$\theta_0 = 15^\circ$			$\theta_0 = 45^\circ$			$\theta_0 = 75^\circ$	
С учетом аэрозоля, $A = 0$	0,40	2,0	3,7	0,25	1,1	2,3	–	0,25
Без учета аэрозоля, $A = 0,15$	0,32	5,6	10,4	0,06	2,9	7,8	0,01	0,08
С учетом аэрозоля, $A = 0,15$	0,56	5,5	10,9	0,28	2,7	6,6	0,03	0,28

В ряде численных методов интерпретации данных измерений, а также при анализе потенциальных возможностей дистанционного метода определения содержания озона уравнение (2) преобразуют к следующему виду:

$$Q(\theta_0) = \int_0^{p_0} \exp\{-(1 + \sec \theta_0)[kX(p) + \sigma_m]\} dp, \quad (3)$$

где

$$Q(\theta_0) = \frac{L(\theta_0) 16\pi}{S_\lambda 3\sigma_m (1 + \cos^2 \theta_0)}; \quad (4)$$

Принимая высотный профиль озона выше максимума вида

$$X(p) = Bp^{1/\sigma}, \quad (5)$$

здесь B и σ – константы и, полагая, что поглощение озоном значительно превосходит молекулярное рассеяние, т.е. $kX(p) \gg \beta$, можно выражение (3) переписать в следующем виде

$$Q = \int_0^{p_0} \exp\left[-\left(r^{1/m} p\right)^m\right] dp, \quad (6)$$

где $r = [(1 + \sec \theta_0)kB]$; $m = \frac{1}{\sigma}$.

Так как вклад в интеграл (6) дают только слои атмосферы, расположенные выше уровня p_0 (т.е. уровни, имеющие p меньше p_0 – от p_0 до 0), то можно приближенно положить $p_0 = \infty$ и вычислить интеграл по формуле

$$\begin{aligned} Q &= \int_0^{p_0} \exp\left[-\left(r^{1/m} p\right)^m\right] dp \cong \frac{1}{mr^{1/m}} \Gamma\left(\frac{1}{m}\right) = \\ &= \frac{1}{r^\sigma} \Gamma(\sigma + 1) = [(1 + \sec \theta_0)kB]^{-\sigma} \Gamma(\sigma + 1), \end{aligned} \quad (7)$$

где $\Gamma(x)$ – гамма-функция.

Выводы: данная методика позволяет с достаточно высокой степенью точности определить предельно-допустимые концентрации малых газовых компонент атмосферы.

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Бондур В.Г., Савин А.И. Концепция создания систем мониторинга окружающей среды в экологических и прородно-ресурсных целях // Исследование Земли из космоса. – 1992. – № 2. – С. 3 – 14.
- 2 Григорьев А.А., Липатов В.Б. Дымовые загрязнения атмосферы по наблюдениям из космоса – Л.: Гидротехиздат, 1978. – 36 с.
- 3 Захаров В.М., Костко О.К., Торговичев В.А., Чайнова Э.А. Лазерные методы исследования загрязнения атмосферы – Обнинск: Информю центр ВНИГМИ–МЦД, 1976. – 34 с.
- 4 Кондратьев К.Я. Перспективы спутникового мониторинга малых газовых компонентов атмосферы и аэрозоля // Исследование Земли из космоса. – 1995. – № 5. – С. 111 – 116.
- 5 Николаев А.Н., Фридман Ш.Д. Дистанционный мониторинг загрязнения атмосферы и выбросов – М.: Гидрометеиздат, 1991. – 140 с.