

УДК 551.501: 629.195.1

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ ОБЪЕМНОГО  
ПОГЛОЩЕНИЯ ИНФРАКРАСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ  
ПАРНИКОВЫМИ ГАЗАМИ**Доктор техн. наук А.Х. Ахмеджанов  
А.Н. Искаков

*Представлена методика определения коэффициентов объемного поглощения инфракрасного излучения парниковыми газами  $H_2O$ ,  $CO_2$ ,  $CH_4$ ,  $O_3$  и  $N_2O$  с учетом их спектральных свойств. Знание коэффициентов поглощения позволяет оценить степень поглощения длинноволнового излучения в атмосфере.*

В настоящее время большое внимание уделяется исследованиям радиационных процессов в атмосферах планет. Одним из наиболее весомых факторов, влияющих глобально на радиационный режим планет, является изменение концентрации оптически активных компонент в атмосфере. Исследованиям оптически активных парниковых газов привлечено большое внимание [1-5]. Предсказываемое к концу столетия удвоение концентрации  $CO_2$  в земной атмосфере в результате парникового эффекта может привести к увеличению уходящего длинноволнового излучения на  $3...4$  Вт/м<sup>2</sup> и средней температуры поверхности Земли на  $1,5...4$  °С с учетом внутренних обратных связей. За минувшее столетие в парниковом эффекте отчетливо наблюдается резкое повышение содержания ключевых парниковых газов ( $CO_2$ ,  $CH_4$  и др.) в атмосфере, сопровождающееся ростом среднегодовой температуры поверхности Земли. Аномально высокое содержание ключевых парниковых газов в современной атмосфере и большая скорость их накопления в настоящее время указывает на возможность антропогенного характера современных процессов. Рост температуры поверхности планеты в свою очередь способствует увеличению эмиссии углекислого газа из таких резервуаров как океан и карбонаты земной коры, где его запасы огромны и достаточны для создания давления в десятки атмосфер, практически как на Венере. Также с увеличением температуры поверхности возрастает вероятность выхода большого количества  $CH_4$  в атмосферу. В связи с проблемой аномально быстрого роста концентраций углекислого газа и метана в атмосфере в настоящее время и нали-

чем огромного количества этих газов в различных земных резервуарах, актуальным становится вопрос о глобальной устойчивости современного термического режима поверхности Земли при условии потенциально возможного «неограниченного» накоплении парниковых газов в атмосфере.

Прогресс в развитии инфракрасной техники и появление в 1990-х годах спутниковых Фурье спектрометров достаточно высокого разрешения (до  $0,05 \text{ см}^{-1}$ ) и Фурье спектрометров наземного базирования с разрешением до  $0,001 \text{ см}^{-1}$  позволяет иметь десятки-сотни тысяч спектральных каналов в тепловой инфракрасной области. В результате существенно повысилась информативность натуральных спектров атмосферы. Обратная задача по определению параметров атмосферы из ее тепловых спектров высокого разрешения стала существенно переопределенной. Произошли качественные изменения в методах обработки и интерпретации спутниковых данных. Успехи в области прикладной атмосферной инфракрасной спектроскопии, создание баз данных детальной спектроскопической информации по атмосферным газам [6]: *HITRAN*, *GEISA* и другие, накопление априорной информации по профилям температуры и концентраций оптически активных газовых составляющих атмосферы в базе *TIGR*, информационной системе *British Atmospheric Data Center* и другие способствуют прогрессу в дистанционном зондировании парниковых газов, таких как:  $H_2O$ ,  $CO$ ,  $O_3$ ,  $CH_4$ ,  $N_xO_y$ ,  $CO_2$  и др. Наличие системы многолетнего мониторинга управляющих параметров климатической системы Земли (радиационный баланс планеты, альbedo, концентрация парниковых газов, водный цикл, баланс энтропии и свободной энергии на верхней границе атмосферы) позволит в перспективе получать новые знания о физике теплового баланса нашей планеты, выявить характерные тренды в процессе глобального потепления и их количественные характеристики. Одним из важных являются концентрации парниковых газов в атмосфере и их общее содержание в атмосферном столбе. Восстановление глобальных трехмерных распределений температуры и концентраций парниковых газов и наблюдение этих распределений в течение длительного промежутка времени могли бы существенно улучшить понимание зависимости между ростом концентраций парниковых газов и глобальным потеплением. Технологии термического зондирования атмосферы из космоса с целью получения метеорологических параметров разрабатывается уже более 30 лет и созданию эффективной космической системы мониторинга атмосферных газов уделяется особое внимание. До недавнего времени термическое зондирование атмосферы

ры в надир основывалось на данных, получаемых многоканальными спектро радиометрами, регистрирующими тепловое излучение атмосферы в различных спектральных интервалах. Например, многоканальный спектрометр, размещенный на борту спутников GOES-8/9, регистрирует ИК излучение атмосферы в 18 каналах в диапазоне  $650 \dots 2800 \text{ см}^{-1}$ , с полушириной функции фильтра порядка  $10 \dots 50 \text{ см}^{-1}$ . В последнее время, в дополнение к орбитальным многоканальным спектро радиометрам, которые регистрируют уходящее тепловое излучение атмосферы Земли в нескольких спектральных интервалах, на орбиту выводятся или планируются к запуску Фурье-спектрометры относительно высокого спектрального разрешения (до  $0,1 \text{ см}^{-1}$ ) с непрерывным спектральным покрытием и направлением зондирования в надир.

Рассмотрим объемные коэффициенты поглощения парниковых газов  $H_2O$ ,  $CO_2$ ,  $O_3$ ,  $CH_4$ ,  $N_2O$ . Ослабление ИК излучения поглощающими газами характеризуется коэффициентами поглощения (КП) соответствующих газов. Различают объемный (линейный)  $k_\lambda$  [ $\text{см}^{-1}$ ] и массовый  $\alpha_\lambda$  [ $\text{см}^2 \text{ г}^{-1}$ ] КП, которые связаны соотношением:

$$k_\lambda = \alpha_\lambda \rho_w, \quad (1)$$

здесь  $\rho_w$  – плотность поглощающего газа при  $p = 1 \text{ атм}$  и  $T = 273 \text{ °К}$ ,  $k_\lambda$  измеряется в лабораторных условиях, или рассчитывается, если известны т.н. лабораторные спектры колебательных и вращательных переходов молекулы газа:

$$k_\omega(h) = k_\omega^{cont}(h) + N_0(h) \cdot \sum_{i=1}^{N_g} n_i(h) \sum_k R_{ik}(h) \sum_j S_{ikj}(T(h)) \cdot \Phi_{ikj}(\omega_{ikj} - \omega, T(h), p(h)), \quad (2)$$

где  $p(h)$ ,  $T(h)$ ,  $N_0(h) = \frac{p(h)}{k_b T(h)}$  – давление, температура и концентрация

молекул на высоте  $h$  соответственно;  $n_i(h)$  – относительная концентрация  $i$ -го газа,  $R_{ik}(h) = a_{ik}(h) / a_{ik}^0$  – отношение данной распространенности на высоте  $h$  к естественной распространенности  $k$ -го изотопа  $i$ -го газа;  $S_{ikj}$  – интенсивность  $j$ -й спектральной линии [ $\text{см} \cdot \text{моль}^{-1}$ ];  $\Phi_{ikj}$  – форма спектральной линии;  $k_\omega^{cont}$  – континуальный коэффициент поглощения. Температурная зависимость интенсивности линии описывается Больцмановским уравнением:

$$S_{ikj}(T) = S_{ikj}(T_0) \cdot \Gamma(\omega_{ikj}, T) \frac{\Omega_{ik}(T_0)}{\Omega_{ik}(T)} \exp\left\{-\frac{hcE_{ikj}}{k_b} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)\right\}, \quad (3)$$

где  $T_0 = 296$  °К;  $E_{ikj}$  – основной энергетический уровень [см<sup>-1</sup>];  $\omega_{ikj}$  – волновое число перехода;  $\Omega(T)$ ,  $\Omega(T_0)$  – колебательно-вращательные статистические суммы при данной и стандартной температурах;  $\Gamma(\omega_{ikj}, T) = (1 - \exp(-hc\omega_{ikj}/k_bT)) / (1 - \exp(-hc\omega_{ikj}/k_bT_0))$ .

Существует несколько банков лабораторных спектральных данных (БД) для атмосферных газов: HITRAN, GEISA, ИОА СО РАН (<http://spectra.iao.ru>). Основными параметрами, входящими в БД являются индекс молекулы, индекс изотопа молекулы, центральная частота спектральной линии, интенсивность линии, матричный элемент дипольного момента перехода, полуширина лоренцевской линии поглощения, энергия нижнего состояния соответствующего перехода, показатель температурной зависимости полуширины линии, параметр сдвига центра линии при  $p = 1$  атм и  $T = 296$  °К, квантовые числа верхнего и нижнего состояния соответствующего перехода.

Метод «line-by-line» для расчета спектральных характеристик атмосферы, в частности  $k_\nu$ , учитывающий все линии поглощения, является точным. Для сравнения спектральных характеристик поглощения, полученных в лабораторных условиях, со спектральными характеристиками спутникового спектрометра, необходимо «привести» лабораторный спектр  $S^{lab}(\omega')$  к спутниковому  $S^{conv}(\omega)$ , т.е. выполнить операцию свертки (конволюцию):

$$S^{conv}(\omega) = \int_{\omega-\Delta\omega}^{\omega+\Delta\omega} S^{lab}(\omega') g(\omega' - \omega) d\omega', \quad (4)$$

здесь  $g(\omega)$  – аппаратная (инструментальная) функция,  $\pm \Delta\omega$  – крылья линии.

Спектрометр MODIS на спутниках Terra и Aqua регистрируют излучение в диапазоне длин волн от 0,4 мкм до 14,3 мкм. Для ближнего и дальнего инфракрасной области спектра объемные коэффициенты поглощения парниковых газов, рассчитанные по вышеописанной методике, представлены на рис. 1 и 2 с использованием банка данных HITRAN.

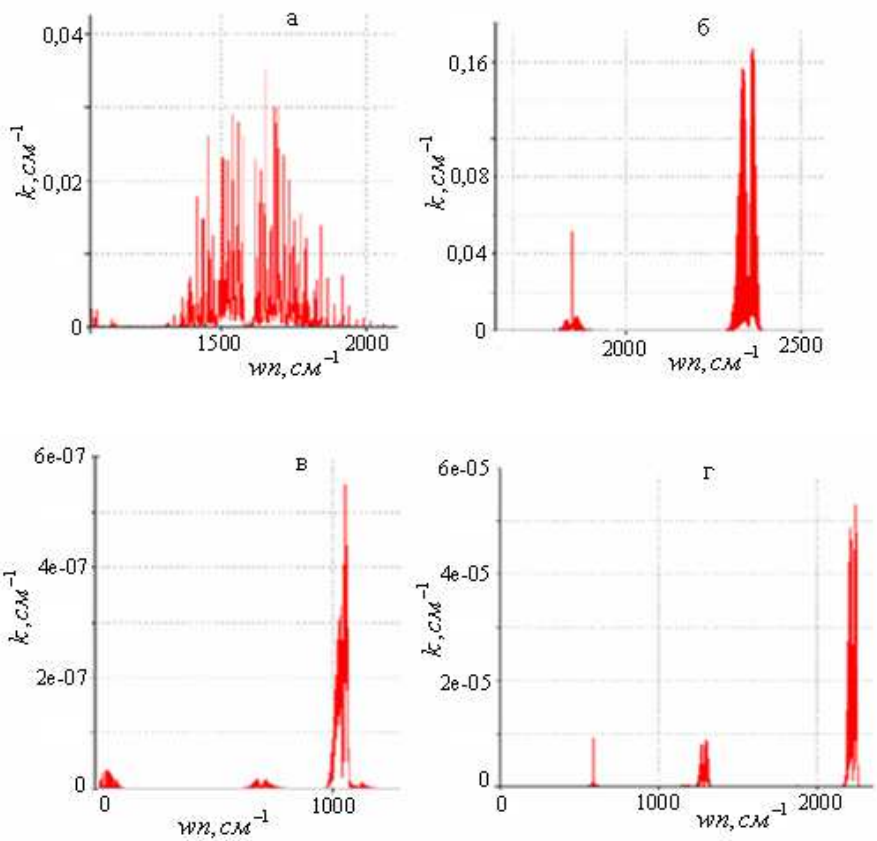


Рис. 1. Зависимости значений объемных коэффициентов поглощения парниковых газов от волновых чисел (а –  $\text{H}_2\text{O}$ , б –  $\text{CO}_2$ , в –  $\text{O}_3$ , г –  $\text{CH}_4$ ).

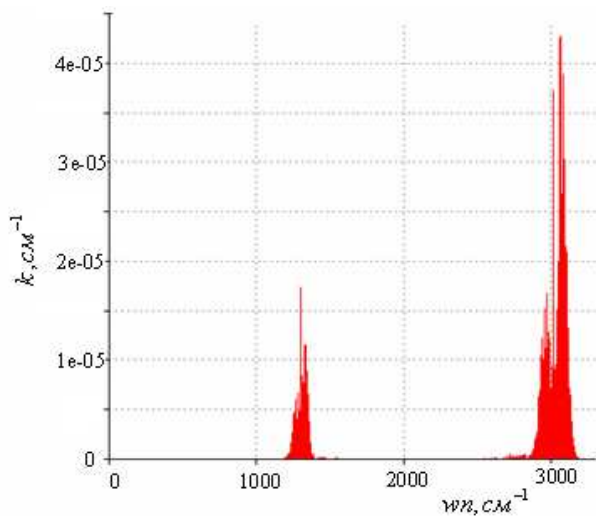


Рис. 2. Зависимость значений объемных коэффициентов поглощения  $\text{N}_2\text{O}$  от волновых чисел.

Программный пакет для расчета объемных коэффициентов поглощения парниковых газов создает возможность для расчета содержания этих газов в атмосфере.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Возможности исследования содержания малых газовых составляющих атмосферы с искусственного спутника Земли быстродействующим спектрометром типа Икар-2. / Занадворов П.Н., Тимофеев Ю.М., Поляков А.В. и др. // Тез. докладов 1-й всесоюзной конференции по количественному анализу неорганических газов. – Л.: Гидрометеоздат, 1983. – С. 73–76.
2. Исследование функций пропускания  $\text{CO}_2$  в области полос 4,3 и 15 мкм / Буланин И.О., Булычев В.П., Гранский П.В. и др. / Проблемы физики атмосферы. – Л.: Издательство ЛГУ, 1976. – № 14. – С. 14-23.
3. Применение фурье-спектрометра для определения концентраций загрязняющих веществ в атмосфере. / Дворук С.К., Кочиков И.В., Морозов А.Н. и др. / Оптический журнал. – 2000. – Том 67. – № 3. – С. 37-42.
4. *Spectral signature of chemical agents and simulants // Optical Engineering.* – 1985. – Vol. 24. – No 6. – P. 982-984. / Hoffland L., Piffath R., Bouk J.
5. The HITRAN2004 Molecular Spectroscopic Database, JQSRT, 96, 139-204 (2005)./ Rothman, L.S., Jacquemart, D., Barbe, A. etc.
6. The HITRAN Molecular Spectroscopic Database: Edition of 2000 Including Updates Through 2001 // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer.*, 82, 5-44 (2003)/ Rothman, L.S., Barbe, A., Benner, D.C. etc.

АО «Национальный центр космических исследований и технологий»  
НКА РК, г. Алматы

#### **ИНФРАҚЫЗЫЛ СӘУЛЕЛЕНУДІҢ ПАРНИКТИ ГАЗДАРМЕН КӨЛЕМДІ ЖҰТЫЛУ КОЭФФИЦИЕНТТЕРІН АНЫҚТАУ**

Техн. ғылымд. докторы А.Х. Ахмеджанов  
А.Н. Искаков

*Инфрақызыл сәуленің  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{O}_3$ , және  $\text{N}_2\text{O}$  парникті газдарымен көлемді жұтылу коэффициенттерін олардың спектрлік қасиеттерін есепке ала отырып анықтау әдістемесі келтірілді. Жұту коэффициенттерін білу атмосферадағы ұзын толқынды сәулеленуді жұту дәрежесін бағалауға мүмкіндік береді.*