

УДК 551.501: 629.195.1

Доктор техн. наук  
Канд. техн. наукА.Х. Ахмеджанов\*  
Т.К. Караданов\*  
А.Н. Искаков\***АЛГОРИТМ РАСЧЕТА ВЕРТИКАЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ  
ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ В АТМОСФЕРЕ ПО  
СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ***АЛГОРИТМ, КОНЦЕНТРАЦИЯ, АТМОСФЕРА, СПЕКТР, ПАРНИКОВЫЕ ГАЗЫ, ВЕРТИКАЛЬНЫЙ ПРОФИЛЬ, СПУТНИКОВОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ*

*Представленный алгоритм позволяет проводить расчеты относительной концентрации атмосферных парниковых газов по данным спутникового зондирования. Результаты расчетов относительной концентрации метана и озона удовлетворительно согласуются со спутниковыми данными. По вертикальным профилям относительной концентрации атмосферных парниковых газов можно рассчитывать содержание этих газов в атмосферном столбе на основе данных космического зондирования.*

В настоящее время активно разрабатываются технологии дистанционного инфракрасного зондирования атмосферы для мониторинга термодинамического состояния и состава атмосферы Земли [3, 14, 15, 16, 17, 18, 19]. Развитие 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. Существенно повысилась информативность натуральных спектров излучения и пропускания атмосферы. Качественные изменения произошли в методах обработки и интерпретации спутниковых данных. Успехи в области атмосферной инфракрасной спектроскопии, создание баз данных детальной спектроскопической информации по атмосферным газам (HITRAN [13], GEISA [9]), накопление априорной информации по профилям температуры и концентраций оптически активных газовых составляющих атмосферы в базе TIGR [7], информационной системе BADC

---

\* Институт космических исследований, АО «НЦКИТ» НКА РК, г. Алматы

[<http://badc.nerc.ac.uk> ] способствуют прогрессу в дистанционном зондировании парниковых газов:  $H_2O$ ,  $CO$ ,  $O_3$ ,  $CH_4$ ,  $N_xO_y$ ,  $CO_2$  и др.

В настоящее время на полярных орбитах действуют несколько подходящих для задач мониторинга парниковых газов спутников, оснащенных ИК-спектрометрами высокого разрешения, такие как TES [5] на спутнике AURA (NASA, США), AIRS [11] на спутнике AQUA (NASA, США), SCIAMACHY [6] на спутнике ENVISAT (ESA), IASI [10] на спутнике METOP-A (ESA), TANSO-FTS [<http://www.gosat.nies.go.jp>] на спутнике GOSAT (JAXA, Япония). Регистрируемые ИК-спектры поглощения парниковыми газами используются в численных моделях переноса излучения в атмосфере.

В настоящее время работает аналитическая система GIOVANNI: GES-DISC (Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center) Interactive Online Visualization and Analysis Infrastructure (<http://daac.gsfc.nasa.gov/techlab/giovanni>), объединяющая данные со многих спутниковых систем. По данным сенсора TES (спутник AURA), регистрирующего спектры поглощения ИК-диапазона в тропосферных слоях атмосферы, восстанавливаются вертикальные профили  $CH_4$ ,  $O_3$  и др. Эти данные доступны на сайте GIOVANNI за период 2004...2010 гг.

Для решения обратной задачи по определению вертикальных профилей и содержания в атмосферном столбе парниковых газов из спутниковых спектров необходимо располагать всей доступной информацией о возможных вертикальных распределениях искомых газов, полном содержании в столбе, или хотя бы приземных концентрациях. Поэтому важной составляющей глобального спутникового зондирования являются независимые прямые измерения в подспутниковых точках, как на поверхности Земли, так и на самолетах. Для определения искомых параметров атмосферы как из спектров теплового излучения самой атмосферы и подстилающей поверхности, так и спектров пропускания атмосферой солнечного ИК излучения необходимо решать обратную задачу. Практическая реализация решения обратной задачи требует, как правило, наличия обширной базы априорной информации об искомых профилях, полученной с использованием прямых радиозондовых, самолетных и других измерений. В качестве вектора параметров могут выступать высотные профили тех атмосферных параметров, которые в данном восстановлении считаются известными и фиксированными (например, профиль  $CO_2$  при восстановлении профилей температуры и влажности). Обратные задачи атмосферной

оптики являются некорректными и поэтому при их численном решении используют различные методы регуляризации: статистической [12] и по Тихонову [4].

Методы решения задач атмосферной оптики основываются на минимизации определенного вида целевой функции. Для минимизации используются, обычно либо метод Ньютона, либо метод Левенберга-Марквардта, который представляет собой сочетание метода Ньютона и метода градиентного спуска. Размерность задачи можно уменьшить, если представить атмосферные профили в виде разложения по собственным векторам корреляционной матрицы априорных профилей. Ограничивая ряд несколькими первыми членами и сводя задачу к нахождению коэффициентов разложения, можно понизить размерность задачи. Это аналогично поиску решения на множестве гладких функций, как это делается в случае регуляризации по Тихонову. Методы регуляризации широко применялись для многоканальных спектрорадиометров с небольшим числом спектральных каналов, когда число неизвестных (количество определяемых параметров) превышало количество уравнений задачи (число используемых спектральных каналов). В этом случае задача была изначально вырожденной (неоднозначной) и использование любой априорной информации об искомых параметрах было крайне необходимо. С появлением на орбите спектрометров среднего спектрального разрешения ( $\sim 0,1 \text{ см}^{-1}$ ) обратная задача стала существенно переопределенной, т.е. количество информативных спектральных каналов (число уравнений), как правило, на порядок-два превышает число искомых (неизвестных) параметров атмосферы. Поэтому в некоторых случаях стало возможным практически отказаться от регуляризации и для решения обратной задачи использовать минимизацию квадратичной невязки измеренных и расчетных спектров методом наименьших квадратов с ограничениями, без привлечения дополнительной априорной информации об искомом решении [2, 8].

Вычислительная трудность решения обратных задач для определения искомых профилей из инфракрасных спектров атмосферы высокого разрешения обусловлена большой размерностью обратной задачи: в пространстве измерений – число спектральных каналов, в пространстве решений – число узлов высотной сетки, умноженное на число восстанавливаемых вертикальных профилей. Практическая реализация алгоритмов решения таких обратных задач для массовой обработки спутниковых спектров требует значительных вычислительных ресурсов и времени.

Решение уравнения переноса инфракрасного излучения от земной поверхности может быть представлено в следующем виде:

$$J_{\nu}^{\uparrow}(z) = \sigma_{\nu} B_{\nu}(T(z_0)) \exp\left(-\frac{\tau_{o\nu}}{\cos \vartheta}\right) + \int_0^z B_{\nu}(T(u)) \frac{\partial}{\partial u} \exp\left(-\frac{\tau_{\nu}(u)}{\cos \vartheta}\right) du \quad (1)$$

с граничными условиями  $J_{\nu}^{\uparrow}(z_0) = \sigma_{\nu} B_{\nu}(T(z_0))$ ,  $J_{\nu}^{\uparrow}(H) = J_{\nu \text{ спутник}}$ ,

где  $J_{\nu}^{\uparrow}(z)$  – уходящее инфракрасное излучение,  $\sigma_{\nu}$  – коэффициент серости излучаемой поверхности,  $B_{\nu}$  – функция Планка,  $T$  – температура,  $z_0$  – уровень земной поверхности,  $\tau_{o\nu}$  – общее значение оптической толщины атмосферы,  $\vartheta$  – значение угла зондирования,  $\nu$  – волновое число,  $J_{\nu \text{ спутник}}$  – измеряемое на спутнике уходящее излучение.

Для удобства решения задачи восстановления сигнала уходящего излучения представим уравнение (1) в виде

$$\frac{\partial J_{\nu}^{\uparrow}}{\partial z} = B_{\nu}(T(u)) \frac{\partial}{\partial u} \exp\left(-\frac{\tau_{\nu}(u)}{\cos \vartheta}\right). \quad (2)$$

Оптическая толщина атмосферы  $\tau_{\nu}(z)$  связана с коэффициентом объемного поглощения  $k_{\nu}$  следующим образом:

$$\tau_{\nu}(z) = \int_0^z k_{\nu} du. \quad (3)$$

Коэффициент объемного поглощения включает:

- 1) коэффициент поглощения газовыми составляющими, который вычисляется с помощью суммирования по спектральным линиям («line-by-line») с использованием параметров известной спектральной базы данных HITRAN;
- 2) коэффициент ослабления аэрозольными компонентами атмосферы;
- 3) коэффициент континуального поглощения водяным паром.

Для безоблачной и слабоаэрозольной атмосферы спектральный коэффициент поглощения газовыми составляющими  $k_{\nu}$  на высоте  $z$  обычно вычисляется, если известны лабораторные спектры поглощения молекул газа для всех возможных колебательно-вращательных переходов энергетических состояний молекулы (метод «line-by-line»):

$$k_\nu = N_0(z) \sum_{i=1}^{N_g} n_i(z) \sum_k r_{ik}(z) \sum_j S_{ijk}(T(z)) \Phi_{ijk}(\nu_{ijk} - \nu, T(z), p(z)), \quad (4)$$

где  $p(z)$ ,  $T(z)$ ,  $N_0(z) = p(z)/(k_b T(z))$  – давление, температура и концентрация молекул на высоте  $z$  соответственно,  $k_b$  – постоянная Больцмана,  $n_i(z)$  – относительная концентрация  $i$ -го газа,  $r_{ik}(z)$  – распространенность  $k$ -го изотопа  $i$ -го газа,  $S_{ijk}$  – интенсивность  $j$ -ой спектральной линии,  $\Phi_{ijk}$  – контур линии.

Моделирование объемного коэффициента поглощения (ОКП) излучения основано на использовании лабораторных спектров высокого разрешения (0,01) изучаемых газов, зависимости спектра поглощения от сорта газа, температуры, давления, объемной концентрации газа в смеси. Для приведения смоделированного спектра высокого разрешения к спектру, регистрируемого реальным сенсором низкого разрешения, используется стандартная численная процедура свертки спектра (конволюция), основанная на использовании аппаратных функций сенсора. Смоделированный спектр ОКП приводился к «реальному» спектру при помощи аппаратной функции конкретного канала сенсора MODIS и процедуры свертки спектра. На рассчитываемую область территории были выбраны данные о значениях уходящего излучения (радианс) в каналах сканера AIRS, соответствующих выбранным диапазонам спектра для конкретного вида газа. Эти данные представляют собой территориальное распределение уходящего излучения с элементарного участка (пикселя). Из данных сканера AIRS были использованы данные вертикальных распределений температуры и давления для изучаемого района. На основе спектрометрической базы данных HITRAN рассчитывается спектральный объемный коэффициент поглощения ИК-излучения данного вида атмосферного газа для реальных сезонных температурных профилей над выделенной территорией Западного Казахстана [1].

Для решения этой задачи необходима предварительная работа по выбору подходящего диапазона в спектре. Анализ модельных расчетов спектра поглощения показал, что для метана ( $\text{CH}_4$ ) диапазон в пределах волновых чисел  $1330 \dots 1390 \text{ см}^{-1}$ . Коэффициенты поглощения и концентрацию озона ( $\text{O}_3$ ) вычисляются в пределах  $1040 \dots 1070 \text{ см}^{-1}$ . Выбранные диапазоны спектров поглощения позволяют рассчитывать концентрацию определенного парникового газа с наименьшими временными потерями и наибольшей точностью.

Для нахождения относительной концентрации  $i$ -го газа  $n_i(z)$  в выбранном диапазоне волновых чисел необходимо последовательное решение уравнений (2...4). На основе стандартного, или среднего многолетнего профиля концентрации определенного газа вычисляется объемный коэффициент поглощения, а затем восстанавливается значение уходящего сигнала на высоте спутника. Если это значение отличается от фиксируемого сигнала на спутнике больше заданного значения отклонения, то цикл продолжается. На каждом цикле добавляется или убавляется предыдущее значение относительной концентрации на достаточно малое отклонение, пересчитывается объемный коэффициент поглощения и восстанавливается значение уходящего сигнала. Процедура продолжается до достижения необходимой точности отклонений.

Концентрация газов измеряется в  $мг/м^3$ ,  $ppm$  (или  $ppmv$ ) ( $мг/м^3 = 0,044μ ppm$ ,  $μ$  – молекулярный вес газа) в единичном объеме, или  $ppm$  в единичной массе. Единицы  $ppm$  означают количество молекул данного газа на миллион молекул воздуха единичного объема или единичной массы. Молекулярная масса воздуха  $28,97 г/mol$ .

Результаты расчетов относительной концентрации метана и озона находятся в удовлетворительном согласии с данными сенсора TES (февраль 2009 г.) по территории Западного Казахстана (рис. 1, 2).

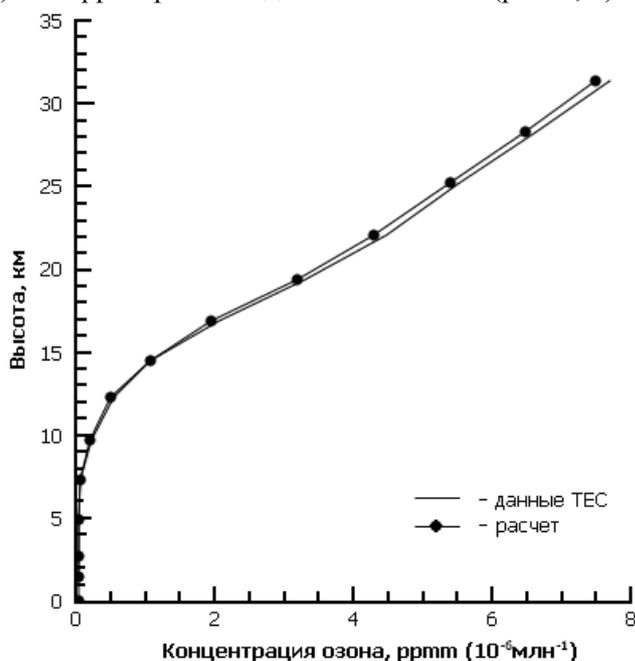


Рис. 1. Вертикальный профиль озона в Западной Казахстане.

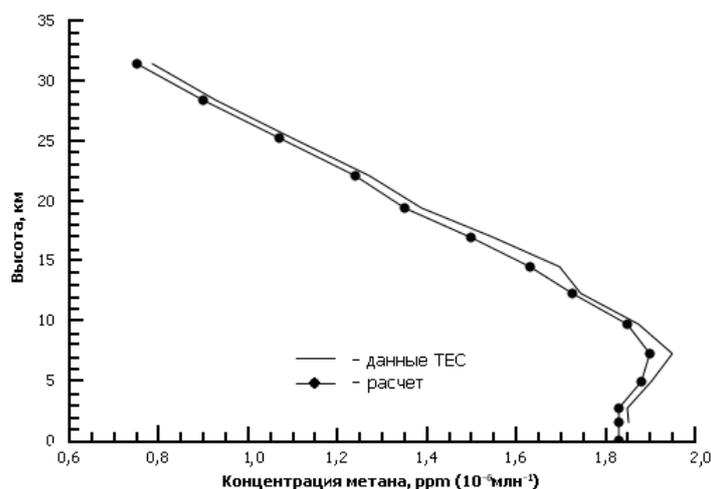


Рис. 2. Вертикальный профиль метана в Западном Казахстане.

Рассмотренный способ восстановления вертикального профиля относительной концентрации атмосферных газов может быть применен для любой территории, если имеются спутниковые данные измерений уходящего ИК-излучения.

Результаты расчетов относительной концентрации атмосферных парниковых газов по рассматриваемому алгоритму позволяют рассчитывать содержание этих газов в атмосферном столбе на основе данных космического зондирования.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ахмеджанов А.Х., Исаков А.Н. Определение коэффициентов объемного поглощения инфракрасного излучения парниковыми газами. // Гидрометеорология и экология. – 2009. – №2. – С. 72-77.
2. Грибанов К.Г., Захаров В.И., Ташкун С.А. Пакет программ FIRE-ARMS и его применение в задачах пассивного ИК-зондирования атмосферы // Оптика атмосферы и океана. – 1999. – Т. 12. – №4. – С. 372–378.
3. Зуев В.Е., Зуев В.В. Дистанционное оптическое зондирование атмосферы. – СПб.: Гидрометеоиздат, 1992. – 275 с.
4. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач. – М.: Наука, 1986. – 288 с.
5. Beer R., Glavich T.A., Rider T.M. Tropospheric emission spectrometer for Earth Observing System's Aura satellite // Applied Optics. – 2001. – V. 40. – № 15. – P. 2356.

6. Burrows J.P., Hülzle E., Goede A.P.H., Visser H., Fricke W. SCIAMA-CHY- Scanning Imaging Absorption Spectrometer for Atmospheric Cartography // *Acta Astronautica*. – 1995. – V. 35. – № 7. – P. 445.
7. Chevallier F., Morcrette J.J., Chedin A., Cheruy F. TIGR-like atmospheric-profile databases for accurate radiative-flux computation // *Quart. J. of the Roy. Met. Soc.* – 2000. – V. 126. №. 563. – P. 777-785. Part B.
8. Griбанov K.G., Zakharov V.I., Tashkun S.A., Tyuterev V.G. A new software tool for radiative transfer calculations and its application to IMG/ADEOS data // *JQSRT*. – 2001. – V. 68. – № 4. P. 435-451.
9. Jaquinet-Husson N., Scott N.A., Chedin A., Crepeau L., Armante R., Cappellet V., Orphal J., Coustenis A., Boone C., Poulet-Crovisier N., Barbe A., Birk M., Brown L.R., Camy-Peyret C., Claveau C., Chance K., Christidis N., Clerbaux C., Coheur P.F., Dana V., Daumont L., De Backer-Barilly M.R., Di Lonardo G., Flaud J.M., Goldman A., Hamdouni A., Hess M., Hurley M.D., Jacquemart D., Kleiner I., Kopke P., Mandin J.Y., Massie S., Mikhailenko S., Nemtchinov V., Nikitin A., Newnham D., Perrin A., Perevalov V.I., Pinnock S., Regalia-Jarlot L., Rinsland C.P., Rublev A., Schreier F., Schult L., Smith K.M., Tashkun S.A., Teffo J.L., Toth R.A., Tyuterev V.I., Vander Auwera J., Varanasi P., Wagner G. The GEISA spectroscopic database: Current and future archive for Earth and planetary atmosphere studies // *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*. – 2008. – V.109. – №6. – P. 1043-1059.
10. Javelle P. IASI instrument overview // *Procs. of the 5th Workshop on ASS-FTS, 1994*. – Nov.30th - Dec.2nd, Tokyo, Japan. P. 1-20.
11. Parkinson C.L. Aqua: an Earth-Observing Satellite mission to examine water and other climate variables // *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions*. – 2003. – V. 41. – № 2. – P. 173-183.
12. Rodgers C.D. Inverse methods for atmospheric sounding. Theory and practice. – World Scientific, 2000. – 206 p.
13. Rothman L.S., Gordon I.E., Barbe A., Chris Benner D., Bernath P.F., Birk M., Boudon V., Brown L.R., Campargue A., Champion J.-P., Chance K., Coudert L.H., Dana V., Devi V.M., Fally S., Flaud J.-M., Gamache R.R., Goldman A., Jacquemart D., Kleiner I., Lacombe N., Lafferty W.J., Mandin J.-Y., Massie S.T., Mikhailenko S.N., Miller C.E., Moazzen-Ahmadi N., Naumenko O.V., Nikitin A.V., Orphal J., Perevalov V.I., Perrin A., Predoi-Cross A., Rinsland C.P., Rotger M., Simeckova M., Smith M.A.H., Sung K., Tashkun S.A., Tennyson J., Toth R.A., Vandaele A.C., Vander Auwera

- J. 2009. The HITRAN 2008 molecular spectroscopic database // JQSRT. V. 110. P. 533-572. doi:10.1016/j.jqsrt.2009.02.013.
14. Smith W.L., Revercomb H., Zhou D.K., Huang H.-L.A. Hyperspectral sounding: a revolutionary advance in atmospheric remote sensing // SPIE. 2005. – V. 5655. P. 1-11.
  15. Smith W.L., Woolf H.M. The Use of Eigenvectors of Statistical Covariance Matrices for Interpreting Satellite Sounding Radiometer Observations // J. Atmospheric Sciences. – 1976. – V.33. – №7. – P. 1127-1140.
  16. Smith W.L., Woolf H.M., Hayden C.M., Wark D.Q., McMillin L.M. The TIROS-N operational vertical sounder // Bull. Amer. Met. Soc. – 1979. – V.60. – P. 1177-1187.
  17. Smith W.L., Woolf H.M., Revercomb H. Linear simultaneous solution for temperature and absorbing constituent profiles from radiance spectra // Applied Optics. – 1991. – V. 30. – № 9. – P. 1117–1123.
  18. Sobrino J.A. Land surface temperature retrieval from thermal infrared data: An assessment in the context of the Surface Processes and Ecosystem Changes Through Response Analysis (SPECTRA) mission // J. Geophys. Res. – 2005. – V.110. D16103. DOI:10.1029/2004JD005588
  19. Zhiliba A.I. Limiting sensitivity of absorption spectrometer // Proceedings SPIE. – 1991. – V.1811: Highly Resolution Molecular Spectroscopy. P. 415-418.

Поступила 13.03.2013

Техн. ғылымд. докторы	А.Х. Ахмеджанов
Техн. ғылымд. канд.	Т.К. Караданов
	А.Н. Искаков

### **СПУТНИК МӘЛІМЕТТЕРІ БОЙЫНША АТМОСФЕРАДАҒЫ ПАРНИК ГАЗЫНЫҢ ТІК ТАРАЛУ АЛГОРИТІМІ**

*Ұсынылған алгоритм атмосфералық парниктік газдардың салыстырмалы концентрациясына спутникалық зондылау мәліметтері бойынша есептер жүргізуге мүмкіндік береді. Метанның және озонның салыстырмалы концентрациясының есептеу нәтижелері спутникалық мәліметтермен қанағаттанарлық сәйкес келеді. Атмосфералық парниктік газдардың салыстырмалы концентрациясының вертикалді кескіні бойынша осы газдардың атмосфералық бағанадағы құрамын ғарыштық зондылау негізінде есептеуге болады.*