

УДК 535.23; 535.34

## Программное обеспечение для моделирования переноса излучения теплового и ближнего ИК-диапазонов в атмосфере с учетом многократного рассеяния

И.В. Задворных<sup>1</sup>, К.Г. Грибанов<sup>1</sup>, В.И. Захаров<sup>1</sup>, Р. Imasu<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup> *Институт естественных наук, Уральский федеральный университет  
620000, г. Екатеринбург, пр. Ленина 51, Россия*

<sup>2</sup> *Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo  
General Research Building Room No. 315b,  
5-1-5 Kashiwanoha, Kashiwa-shi, Chiba 277-8568, Japan*

Поступила в редакцию 9.11.2016 г.

Программное обеспечение FIRE-ARMS дополнено векторной моделью переноса излучения VLIDORT. Новая версия программного обеспечения позволяет моделировать уходящее в космос тепловое ИК-излучение Земли и отраженное от поверхности солнечное излучение в ближнем ИК-диапазоне с учетом многократного рассеяния света для одной и той же атмосферной модели и геометрии зондирования. Выполнено моделирование спектров уходящего излучения в тепловом и ближнем ИК-диапазонах с учетом многократного рассеяния в безоблачной атмосфере. Проведено сравнение модельных спектров со спектрами, измеренными спектрометрами спутника GOSAT в безоблачной атмосфере над территорией Западной Сибири. Анализ рассчитанных весовых функций показывает, что совместное использование теплового и ближнего ИК-диапазонов позволит улучшить высотное разрешение при определении вертикальных профилей концентрации метана в атмосфере.

*Ключевые слова:* перенос излучения, дистанционное зондирование, многократное рассеяние, GOSAT; radiative transfer, remote sensing, multiple scattering, GOSAT.

### Введение

Задача мониторинга ключевых парниковых газов в атмосфере и локализации их источников и стоков является одной из важнейших в изучении глобальных изменений климата [1]. Спутниковые дистанционные измерения в дополнение к наземным наиболее эффективны для этих целей, так как обеспечивают достаточно высокую точность измерений и наилучшее пространственное и временное покрытие по всему земному шару.

Для восстановления атмосферных параметров и содержания различных атмосферных газов в основном используются два инфракрасных диапазона: тепловой и ближний. По этим же диапазонам разделялись спутниковые ИК-спектрометры высокого разрешения. Так, например, решеточный спектрометр AIRS (Atmospheric InfraRed Sounder) на спутнике AQUA [2] измерял уходящее излучение в тепловом диапазоне 3,7–15,4 мкм; результаты измерений использовались для решения таких задач, как определение толщины слоя облачности, восстановление профилей температуры, влажности, определение среднего по столбу содержания некоторых парниковых

газов, включая углекислый газ и метан. Фурье-спектрометр IASI (Infrared atmospheric sounding interferometer), работающий в диапазоне 3,62–15,5 мкм на спутнике METOP, решает аналогичные задачи [3]. Другой спектрометр, SCIAMACHY (SCanning Imaging Absorption spectroMeter for Atmospheric CHartography) [4], проводил измерения в УФ-, видимом и ближнем ИК-диапазонах 0,24–2,38 мкм, что позволяло его использование для широкого спектра задач: изучения глобального распределения углекислого газа и метана, мониторинга атмосферных трассеров и радикалов, мониторинга стратосферного озона, исследования облачных полей и аэрозолей. В 2009 г. был запущен японский спутник GOSAT (Greenhouse gases Observing SATellite), благодаря которому стало возможно проводить измерения одновременно в двух диапазонах. На его борту размещены сенсор TANSO (Thermal And Near-infrared Sensor Observation), состоящий из Фурье-спектрометра высокого разрешения TANSO-FTS (Fourier-Transform Spectrometer), предназначенного для одновременного измерения уходящих спектров в четырех диапазонах от 0,758 до 14,3 мкм, и четырехканальный радиометр TANSO-CAI (Cloud and Aerosol Imager) для обнаружения облачности и аэрозолей [5]. Продолжение проекта запланировано на 2017 г. — будет запущен новый спутник GOSAT-2 [6, 7] с усовершенствованными приборами FTS-2 и CAI-2 на борту, которые позволяют проводить измерения в расширенном спектральном диапазоне.

\* Илья Викторович Задворных (i.zadvornykh@wsibiso.ru); Константин Геннадьевич Грибанов (kgribanov@remotesensing.ru); Вячеслав Иосифович Захаров (v.zakharov@remotesensing.ru); Imasu Rioichi (imasu@aori.u-tokyo.ac.jp).

Для мониторинга концентрации углекислого газа в июле 2014 г. был запущен американский спутник ОСО-2 (Orbiting Carbon Observatory-2) [8], который вошел в орбитальную группировку спутников A-Train. На ОСО-2 размещены три спектрометра высокого разрешения, которые одновременно измеряют спектры уходящего излучения в трех коротких диапазонах ближнего ИК с центрами 2,06; 1,6 и 0,76 мкм.

Использование определенного спектрального диапазона имеет ключевое значение для получения информации о содержании атмосферных газов. Восстановление вертикальных профилей концентрации газовых составляющих осуществляется обращением модели переноса излучения в безоблачной атмосфере, которое заключается в нахождении вектора восстанавливаемых параметров атмосферы по измеренному спектру уходящего излучения. Данная задача является некорректной, и ее решение обычно осуществляется с использованием методов оптимального статистического оценивания [9]. Решение обратной задачи требует вычисления весовых функций – производных модельного спектра по восстанавливаемым параметрам на вертикальной сетке атмосферных уровней. Спектры теплового ИК-диапазона чувствительны к концентрации газов в средней атмосфере, так как на высотах ниже 2 км наблюдается сильное влияние теплового излучения поверхности [10]. Восстановление же концентрации у поверхности возможно только в ближнем ИК-диапазоне, где весовые функции имеют высотный максимум у поверхности. Объединение диапазонов позволяет получить набор весовых функций, имеющих максимумы в более широком диапазоне высот в атмосфере.

Целью настоящей работы является разработка оригинального программного обеспечения для моделирования переноса излучения теплового и ближнего ИК-диапазонов с учетом многократного рассеяния для решения обратных задач зондирования парниковых газов в атмосфере с одновременным использованием обоих спектральных диапазонов.

## Прямая модель

Измеряемое сенсором излучение всегда поляризовано и в общем случае может быть представлено четырехкомпонентным вектором Стокса, где первая компонента вектора имеет значение интенсивности излучения, а три другие содержат информацию о поляризации. В общем виде уравнение переноса излучения можно записать в следующем виде, ограничившись для простоты только интенсивностью монохроматического излучения  $J$  как функцией от оптической толщины ( $\tau$ ), косинуса зенитного угла ( $\mu$ ) и азимутального угла ( $\varphi$ ):

$$\mu \frac{dJ(\tau, \mu, \varphi)}{d\tau} = J(\tau, \mu, \varphi) - S(\tau, \mu, \varphi); \quad (1)$$

$$S(\tau, \mu, \varphi) = (1 - \omega(\tau))B(\lambda, T(\tau)) + \frac{\omega(\tau)}{4\pi} \int_0^{2\pi} d\varphi' \int_{-1}^1 P(\tau, \mu, \varphi, \mu', \varphi') J(\tau, \mu', \varphi') d\mu', \quad (2)$$

где  $\omega$  – альbedo однократного рассеяния;  $B(\lambda, T(\tau))$  – функция Планка, зависящая от волнового числа и температуры;  $P$  – индикатриса рассеяния. Функция  $S$  называется функцией источника и содержит слагаемые, описывающие собственное тепловое излучение, атмосферы, эффекты многократного и однократного рассеяния прямого солнечного излучения. В случае теплового излучения, когда для безоблачной атмосферы можно пренебречь рассеянием, уравнение переноса имеет вид обыкновенного дифференциального уравнения с известным решением. Моделирование же спектров в ближнем ИК-диапазоне осложнено необходимостью учета эффекта многократного рассеяния света в атмосфере.

Существуют различные методы решения уравнения переноса излучения в поглощающих и рассеивающих средах, которые находят свое применение в определенных видах задач [11–16]. В данной работе для численного решения уравнения переноса в этом диапазоне был применен метод дискретных ординат [17], основанный на переходе от интеграла по углам в уравнениях (1), (2) к дискретной сетке по углам рассеяния и численному решению системы обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка.

## Программное обеспечение

Программное обеспечение FIRE-ARMS (Fine Infrared Explorer for Atmospheric Radiation Measurements) [18], предназначенное для восстановления вертикальных профилей температуры, влажности и содержания различных парниковых газов из спектров теплового ИК-диапазона, было дополнено процедурами VLIDORT (Vector Linerized Discrete Ordinate Radiative Transfer) [19], предоставленными R. Spurr. VLIDORT – векторная линеаризованная модель переноса излучения с учетом рассеяния в многослойной атмосфере, основанная на методе дискретных ординат. Модель включает в себя учет как однократного, так и многократного рассеяния света при различной геометрии зондирования и различных типах подстилающей поверхности. В качестве входных параметров VLIDORT на высотной сетке задаются оптические свойства для каждого атмосферного слоя  $l$ : оптическая толщина  $\Delta\tau_l$ , альbedo однократного рассеяния  $\omega_l$  и коэффициенты разложения индикатрисы рассеяния по полиномам Лежандра  $P_{lm}$ . В случае рэлеевского рассеяния коэффициенты разложения индикатрисы имеют известный вид [20], а оптическая толщина и альbedo задаются через коэффициенты поглощения и рассеяния газовых компонент в следующем виде:

$$\tau_{\text{полн}} = \tau_{\text{погл}} + \tau_{\text{расс}}; \quad (3)$$

$$\omega = \tau_{\text{расс}} / \tau_{\text{полн}}. \quad (4)$$

Для расчета коэффициентов поглощения газовых компонент используются параметры из спектроскопической базы данных HITRAN-2012 [21]. В свою очередь, коэффициенты рассеяния вычисляются с использованием усовершенствованного численного алгоритма из работы С. Tomasi et al. [22].

## Модельные спектры

Спектрометр TANSO-FTS/GOSAT в ближнем ИК-диапазоне измеряет излучение в единицах  $\text{В}/\text{см}^{-1}$  и в виде двух перпендикулярных поляризационных компонент  $S/P$ . Для сравнения модельного спектра с измеренным размерность измеренного спектра преобразуется в единицы  $\text{Вт}/\text{м}^2/\text{см}^{-1}/\text{стр}$ ; затем методом, предложенным D. O'Brien et al. [23], определяется скалярная интенсивность. После преобразований производится свертка модельного спектра с известной аппаратной функцией спектрометра.

На рис. 1 приведено сравнение модельного и измеренного спектров в двух диапазонах TANSO-FTS. Модельные спектры были вычислены с учетом геометрии зондирования TANSO-FTS в условиях безоблачной атмосферы без учета аэрозольной составляющей. Измеренные спектры получены над территорией Западной Сибири в безоблачной атмосфере. Модельная атмосфера дополнена вертикальными профилями температуры и влажности, взятыми из данных ретроспективного анализа NCEP/NCAR [24]. Подгонка спектров варьированием атмосферных параметров не проводилась, поскольку задача обращения модели переноса излучения в данной работе не ставилась.

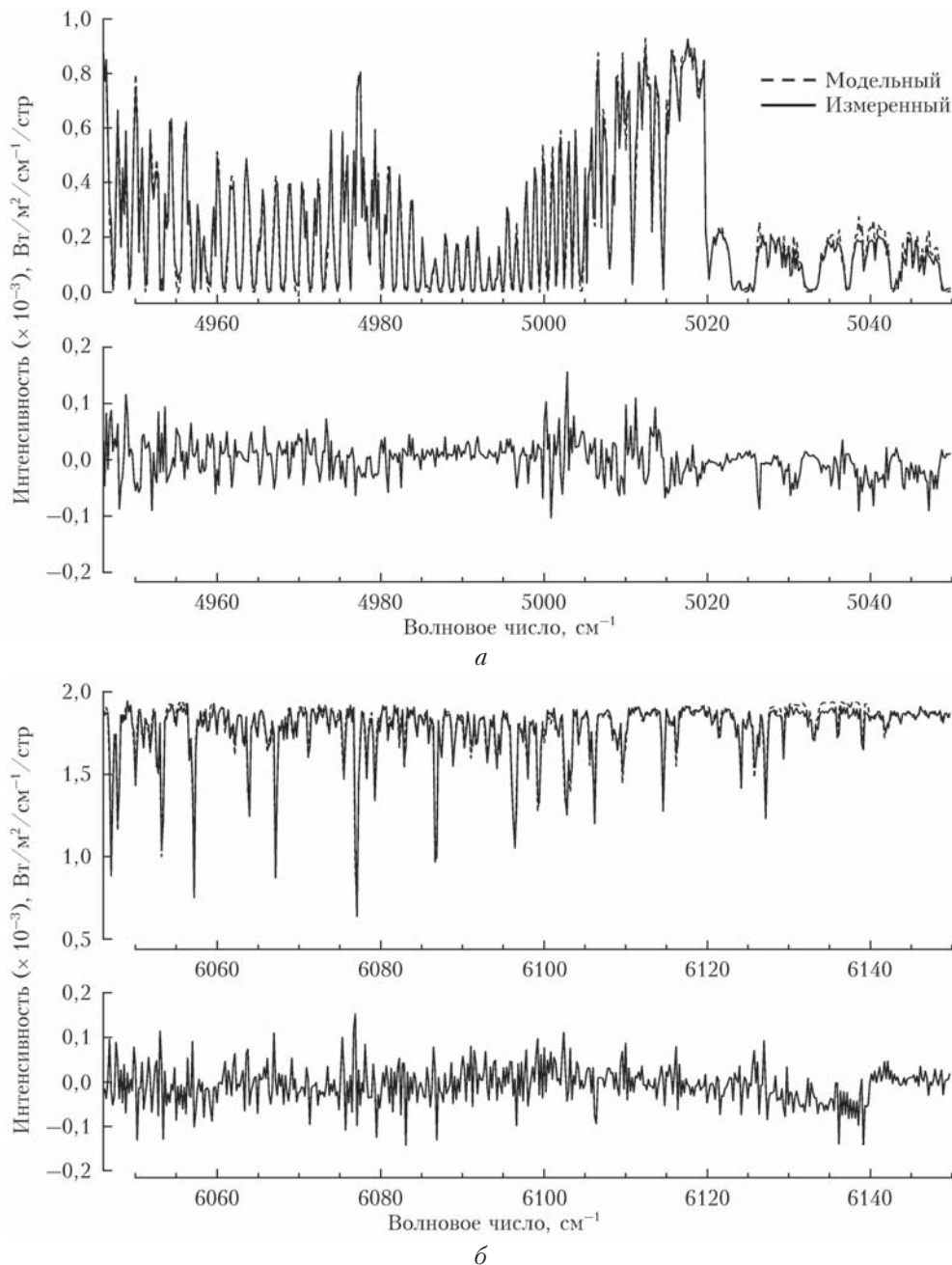


Рис. 1. Модельные и измеренные спектры TANSO-FTS/GOSAT в ближнем ИК-диапазоне. Спектры получены 23.06.2015 г. в точке с координатами  $57,857^\circ$  с.ш.;  $58,705^\circ$  в.д.

## Вычисление весовых функций

VLIDORT содержит процедуры вычисления весовых функций на заданной сетке атмосферных слоев в виде

$$F_p = x_p (\partial J / \partial x_p). \quad (5)$$

В нашей работе для использования этих производных в дальнейшей процедуре восстановления атмосферных параметров было выполнено преобразование весовых функций от сетки атмосферных слоев к сетке атмосферных уровней. Так, например, вычисление весовых функций концентрации газовых составляющих  $x$  уровня  $i$  выполнено следующим образом:

$$\begin{aligned} \frac{\partial J}{\partial x_0} &= \frac{\partial J}{\partial \tau_1} \cdot \frac{\partial \tau_1}{\partial x_0}; \\ \frac{\partial J}{\partial x_i} &= \frac{\partial J}{\partial \tau_i} \cdot \frac{\partial \tau_i}{\partial x_i} + \frac{\partial J}{\partial \tau_{i+1}} \cdot \frac{\partial \tau_{i+1}}{\partial x_{i+1}}; \\ \frac{\partial J}{\partial x_n} &= \frac{\partial J}{\partial \tau_n} \cdot \frac{\partial \tau_n}{\partial x_n}; \\ i &= 1, \dots, n-1. \end{aligned} \quad (6)$$

Аналогичный прием вычисления производных для слоев приведен в [25]. На рис. 2 показаны весовые функции концентрации  $\text{CH}_4$  для интервалов  $6104\text{--}6107 \text{ см}^{-1}$ ,  $5030\text{--}5045 \text{ см}^{-1}$  (ближний ИК) и  $1250\text{--}1310 \text{ см}^{-1}$  (тепловой ИК). Представлены несколько самых больших по абсолютной величине весовых функций, нормированных на абсолютный максимум для каждого из приведенных интервалов. Для интервала  $1250\text{--}1310 \text{ см}^{-1}$  дополнительно, для наглядности, выполнена нормировка групп весовых функций, имеющих максимум на определенной высоте.

Из рис. 2 видно, что функции теплового ИК-диапазона покрывают промежутки между высотными интервалами ближнего ИК-диапазона. Если учесть, что интервал  $5030\text{--}5045 \text{ см}^{-1}$  обычно не используется в схемах обращения спектров для восстановления содержания метана в силу малости производных и влияния спектральных линий других газов, то дополнение спектров ближнего ИК-диапазона спектрами теплового ИК-диапазона должно улучшить точность определения метана, которое в настоящее время для стандартных продуктов GOSAT выполняется отдельно для каждого диапазона.

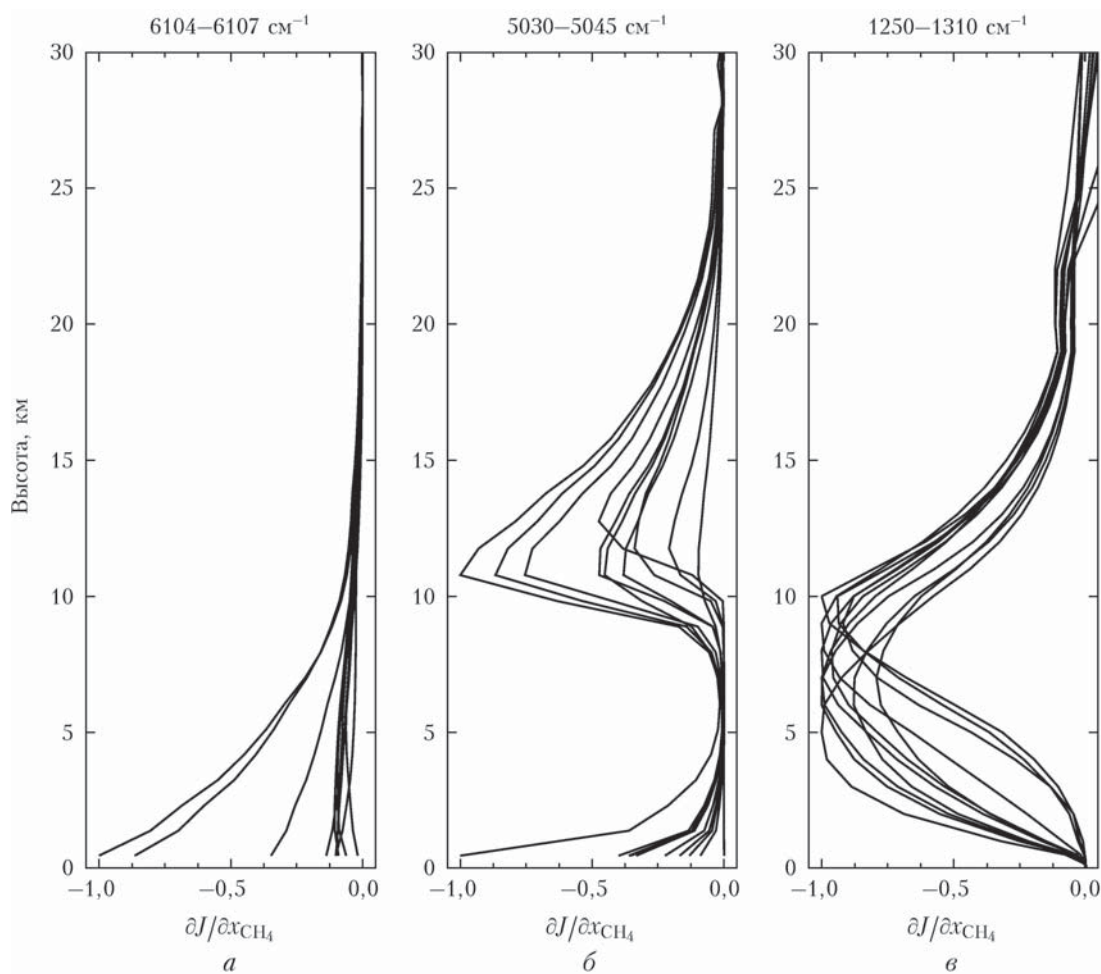


Рис. 2. Весовые функции метана в тепловом (а) и ближнем ИК-диапазонах (б, в)



## Заключение

Создана первая версия программного обеспечения (ПО), объединяющая возможности двух программных продуктов, а именно FIRE-ARMS и VLIDORT, и позволяющая совместное использование теплового и ближнего спектральных ИК-диапазонов. ПО обеспечивает как прямое моделирование спектров для заданной модели атмосферы, так и вычисление якобианов прямой модели для использования в схемах обращения спектральных данных с целью определения распределения парниковых газов в атмосфере. На примере метана показано, что совместное использование диапазонов расширяет покрытие высотного интервала максимумами весовых функций прямой модели. Разработка алгоритмов обращения с совместным использованием теплового и ближнего ИК-диапазонов является предметом отдельного исследования.

Работа выполнена при финансовой поддержке в рамках постановления № 211 Правительства Российской Федерации (контракт № 02.A03.21.0006) и РФФИ, гранты № 16-51-50064 и 15-01-05984а.

1. *Stocker T.F., Qin D., Plattner G.-K., Tignor M., Allen S.K., Boschung J., Nauels A., Xia Y., Bex V., Midgley P.M.* Climate Change 2013: The Physical Science Basis // IPCC. Cambridge, New York: Cambridge University Press, 2013. 1552 p.
2. *Atmospheric Infrared Sounder: Mission & Instrument.* [Электронный ресурс]. URL: [http://airs.jpl.nasa.gov/mission\\_and\\_instrument/overview](http://airs.jpl.nasa.gov/mission_and_instrument/overview) (дата обращения 20.09.2016).
3. *Tashkun S.A., Perevalov V.I., Teffo J.L.* CDS-ASI, the high precision carbon dioxide spectroscopic databank: Version for METOP-IASI mission // Proc. ASA Int. Workshop. Reims, France. September 6–8, 2005. P. 95.
4. *Bovensmann H., Burrows J.P., Buchwitz M., Frerick J., Noel S., Rozanov V.V.* SCIAMACHY: Mission objectives and measurement modes // J. Atmos. Sci. 1999. V. 56, N 2. P. 125–127.
5. *Kuze A., Suto H., Nakajima M., Hamazaki T.* Thermal and near infrared sensor for carbon observation Fourier-transform spectrometer on the Greenhouse Gases Observing Satellite for greenhouse gases monitoring // Appl. Opt. 2009. V. 48, N 35. P. 6716–6733.
6. *Matsunaga T., Yokota T., Maksyutov Sh., Morino I., Yoshida Yu., Saito M., Ajiro M., Uchino O.* The Statuses of GOSAT and GOSAT-2 Projects at National Institute for Environmental Studies (NIES) // Geophysical Research Abstracts, EGU General Assembly 2015. [Электронный ресурс]. URL: <http://meetingorganizer.copernicus.org/EGU2015/EGU2015-13150.pdf> (дата обращения 20.09.2016).
7. *Nakajima M., Suto H., Yotsumoto K., Miyakawa T., Shiomi K.* GOSAT-2: Development Status of the mission instruments // Geophysical Research Abstracts, EGU General Assembly 2015. [Электронный ресурс]. URL: <http://meetingorganizer.copernicus.org/EGU2015/EGU2015-7731.pdf> (дата обращения 20.09.2016).
8. *O'Dell C.* The First Eighteen Months of NASA's Orbiting Carbon Observatory-2 (OCO-2): Mission Status, Error Characterization, and Preliminary Results // Geophysical Research Abstracts, EGU General Assembly 2016.

- [Электронный ресурс]. URL: <http://meetingorganizer.copernicus.org/EGU2016/EGU2016-11151.pdf> (дата обращения 20.09.2016).
9. *Rogers C.D.* Inverse methods for atmospheric sounding. Theory and practice. Singapore, London: World Scientific Publishing, 2000. 253 p.
  10. *Christi M.J., Stephens G.L.* Retrieving profiles of atmospheric CO<sub>2</sub> in clear sky and in the presence of thin cloud using spectroscopy from the near and thermal infrared: A preliminary case study // J. Geophys. Res. 2004. V. 109, N D04316. P. 1–11.
  11. *Сушкевич Т.А.* Математические модели переноса излучения. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2005. 661 с.
  12. *Fomin B., Falaleeva V.* A polarized atmospheric radiative transfer model for calculations of spectra of the stokes parameters of shortwave radiation based on the *line-by-line* and Monte Carlo methods // Atmosphere. 2012. V. 3, N 4. P. 451–467.
  13. *Budak V., Kaloshin G., Shagalov O., Zheltov V.* Numerical modeling of the radiative transfer in a turbid medium using the synthetic iteration // J. Opt. Soc. Amer. A. 2015. V. 23, N 15. P. 829–840.
  14. *Будак В.П., Коркин С.В.* Моделирование пространственного распределения степени поляризации рассеянного атмосферой излучения на основании полного аналитического решения векторного уравнения переноса // Оптика атмосф. и океана. 2008. Т. 21, № 1. С. 35–41.
  15. *Журавлева Т.Б.* Моделирование переноса солнечного излучения в различных атмосферных условиях. Часть I. Детерминированная атмосфера // Оптика атмосф. и океана. 2008. Т. 21, № 2. С. 99–114.
  16. *Рублев А.Н.* Моделирование переноса оптического излучения в задачах радиационной климатологии и определения параметров земной: Автореф. дис. ... докт. физ.-мат. наук. М.: НИИ «Планета», 2013. 46 с.
  17. *Chandrasekhar S.* Radiative Transfer. Dover, 1960. 393 p.
  18. *Gribanov K.G., Zakharov V.I., Tashkun S.A., Tyuterev V.I.G.* A new software tool for radiative transfer calculations and its application to IMG/ADEOS data // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer. 2001. V. 68, N 4. P. 435–451.
  19. *Spurr R.J.* VLIDORT: A linearized pseudo-spherical vector discrete ordinate radiative transfer code for forward model and retrieval studies in multilayer multiple scattering media // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer. 2006. V. 102, N 2. P. 316–342.
  20. *Spurr R.J.* VLIDORT Version 2.6. User's Guide [Электронный ресурс]. URL: [http://web.gps.caltech.edu/~vijay/vlidort\\_2p6\\_f90userguide\\_v12\\_08feb2013\\_NC.pdf](http://web.gps.caltech.edu/~vijay/vlidort_2p6_f90userguide_v12_08feb2013_NC.pdf) (дата обращения 20.09.2016).
  21. *Rothman L.S., Gordon I.E., Babikov Y., Barbe A., Benner C.D., Bernath P.F., Birk M., Bizocchi L., Boudon V., Brown L.R., Campargue A., Chance K., Cohen E.A., Coudert L.H., Devi V.M., Drouin B.J., Fayt A., Flaud J.-M., Gamache R.R., Harrison J.J., Hartmann J.-M., Hill C., Hodges J.T., Jacquemart D., Jolly A., Lamouroux J., Le Roy R.J., Li G., Long D.A., Lyulin O.M., Mackie C.J., Massie S.T., Mikhailenko S., Müller H.S.P., Naumenko O.V., Nikitin A.V., Orphal J., Perevalov V., Perrin A., Polovtseva E.R., Richard C., Smith M.A.H., Starikova E., Sung K., Tashkun S., Tennyson J., Toon G.C., Tyuterev V.I.G., Wagner G.* The HITRAN-2012 molecular spectroscopic database // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer. 2013. V. 130. P. 4–50.
  22. *Tomasi C., Vitale V., Petkov B., Lupi A., Cacciari A.* Improved algorithm for calculations of Rayleigh-scattering optical depth in standard atmospheres // Appl. Opt. 2005. V. 44, N 16. P. 3320–3341.
  23. *O'Brien D.M., Polonsky I., O'Dell C., Kuze A., Kikuchi N., Yoshida Y., Natraj V.* Testing the polarization

model for TANSO-FTS on GOSAT against clear-sky observations of Sun Glint over the ocean // IEEE Trans. Geosc. Remote. Sens. 2013. V. 51, N 12. P. 5199–5209.

24. *Kalnay E., Kanamitsu M., Kistler R., Collins W., Deaven D., Gandin L., Iredell M., Saha S., White G., Woolen J., Zhu Y., Chelliah M., Ebisuzaki W., Higgins W., Janowiak J., Mo K.C., Ropelewski C., Wang J., Leetmaa A.,*

*Reynolds R., Jenne R., Joseph D.* The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project // Bull. Amer. Meteorol. Soc. 1996. N 77. P. 437–470.

25. *Spurr R.J., Christi M.J.* On the generation of atmospheric property Jacobians from the (V)LIDORT linearized radiative transfer models // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer. 2014. V. 142. P. 109–115.

***I.V. Zadvornyykh, K.G. Gribanov, V.I. Zakharov, R. Imasu. Radiative transfer code for thermal and near infrared with multiple scattering.***

FIRE-ARMS software was supplemented with the vector radiative transfer model VLIDORT. The new version of the software allows a simulation of the outgoing thermal infrared radiation (TIR) from Earth and solar short infrared radiation (SWIR) reflected from the surface, taking into account multiple scattering for the same model and atmospheric sensing geometry. We performed spectra simulation of the outgoing radiation in TIR and SWIR with multiple scattering in a cloudless atmosphere and comparison of the spectra simulated with the spectra measured by GOSAT satellite spectrometers in cloudless atmosphere over Western Siberia. Calculated weighting functions show that simultaneous use of TIR and SWIR will improve the height resolution in vertical profiling of methane concentrations in the atmosphere.