

ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ АТМОСФЕРЫ, ГИДРОСФЕРЫ И ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

УДК 535.23; 535.34

Метод определения вертикального профиля метана из спектров атмосферы, измеренных одновременно в тепловом и ближнем ИК-диапазонах

И.В. Задворных¹, К.Г. Грибанов¹, В.И. Захаров¹, Р. Imasu^{2*}

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

² *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 28.08.2018 г.

Предложены метод и алгоритм решения обратной задачи спутникового зондирования атмосферы для определения вертикальных профилей концентрации оптически активных газов с одновременным использованием атмосферных спектров теплового и ближнего ИК-диапазонов высокого разрешения. Для демонстрации возможностей метода выполнен вычислительный эксперимент по восстановлению вертикального профиля концентрации основного изотополога метана с использованием модельных спектров высокого разрешения, аналогичных регистрируемым спутниковыми ИК-Фурье-спектрометрами типа TANSO-FTS/GOSAT в тепловом и ближнем ИК-диапазонах. Соотношение сигнал-шум в спектрах было задано на уровне 350. Результаты модельных экспериментов демонстрируют более высокую точность восстановления вертикального профиля метана и его полного содержания в атмосферном столбе при совместном использовании спектров обоих диапазонов по сравнению с восстановлением из каждого диапазона по отдельности.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, спектры атмосферы, обратная задача, метан; remote sensing, atmospheric spectra, inverse problem, methane.

Введение

Метан является вторым по значимости антропогенного воздействия парниковым газом в атмосфере Земли после диоксида углерода. По разным оценкам, за 2003–2012 гг. глобальные выбросы метана в атмосферу составили 540–880 Тг/год – примерно 4% от глобальных выбросов углекислого газа [1]. Однако вследствие высокого парникового потенциала вклад метана в радиационный форсинг составляет примерно 30% от величины, полученной для углекислого газа. Широкий спектр источников CH₄ приводит к тому, что его выбросы зависят от множества факторов, среди которых добыча ископаемого топлива, сельскохозяйственная деятельность, плотность населения и климат. В целях определения скорости роста концентрации метана, прогнозирования изменения климата и возможных последствий этого изменения необходимы данные о распределении метана в атмосфере, а также расположении и мощности его источников для локализации и сокращения выбросов. В настоящее время для этих целей, как

правило, используют данные спутникового зондирования атмосферы, которые способны обеспечить глобальное покрытие, а также достаточно высокую точность, частоту и высокое пространственное разрешение измерений.

Спутниковые дистанционные измерения содержания метана в атмосфере впервые были начаты в 1996 г. с запуском спутника ADEOS с ИК-спектрометром теплового диапазона высокого спектрального разрешения IMG (Interferometric Monitor for Greenhouse gases) [2] на борту. В 2000 г. на орбиту был выведен спутник Terra со спектрометром MOPITT [3], который измерял уходящее излучение в диапазонах 2,2–2,4 и 4,7 мкм и среднее по столбу содержание CO, CO₂ и CH₄. С 2003 по 2012 г. проводились измерения спектрометром SCIAMACHY (SCanning Imaging Absorption spectroMeter for Atmospheric CHartography) [4] на борту спутника ENVISAT, которые использовались для восстановления мольной доли CH₄ в сухом воздухе (XCH₄). В настоящее время спутниковый мониторинг метана в атмосфере осуществляется ИК-Фурье-спектрометром IASI со спутника METOP [5]. В 2014 г. был запущен отечественный спутник Метеор-М с инфракрасным Фурье-спектрометром ИКФС-2 [6] для зондирования атмосферы с целью получения вертикальных профилей температуры и влажности в тропосфере, общего содержания и высотного распределения кон-

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

центраций следовых газовых составляющих атмосферы, температуры подстилающей поверхности.

На сегодняшний день единственным спутником, способным проводить одновременные измерения в тепловом и ближнем спектральных ИК-диапазонах, является японский спутник GOSAT (Greenhouse gases Observing SATellite), запущенный в 2009 г. для глобального мониторинга распределения CO₂ и CH₄ в атмосфере. Размещенный на его борту сенсор TANSO (Thermal And Near-infrared Sensor Observation) состоит из Фурье-спектрометра высокого разрешения TANSO-FTS (Fourier-Transform Spectrometer), предназначенного для одновременного измерения спектров уходящего излучения в четырех ИК-диапазонах от 0,758 до 14,3 мкм, и четырехканального радиометра TANSO-CAI (Cloud and Aerosol Imager) для обнаружения облачных и аэрозольных полей [7]. В 2018–2019 гг. планируется запуск нового спутника GOSAT-2 [8, 9] с модернизированным оборудованием TANSO-FTS-2 и CAI-2, способного проводить измерения в более широком спектральном диапазоне.

В данной работе впервые предложен метод, позволяющий более точно решать обратную задачу спутникового зондирования атмосферы по восстановлению в ней вертикального профиля концентрации парникового газа (на примере метана) с одновременным использованием спектров атмосферы, регистрируемых в тепловом и ближнем ИК-диапазонах.

Прямая и обратная задача

Для достоверного восстановления атмосферных параметров, таких как температура, влажность, концентрация парниковых газов, необходима прямая модель, которая бы адекватно воспроизводила физические процессы переноса излучения в атмосфере – поглощение и рассеяние газовыми и аэрозольными компонентами, поглощение и отражение подстилающей поверхностью, поляризация. При этом спектральное разрешение прямой модели должно позволять рассчитать спектр высокого разрешения и, как правило, быть существенно выше спектрального разрешения инструмента, производящего измерения.

Прямая модель строится на основе численного решения уравнения переноса излучения [10], которое описывает все указанные выше физические процессы. В [11–16] приведены подходы и методы решения этого уравнения в зависимости от различного вида задач. В данной работе для численного решения уравнения переноса в ближнем ИК-диапазоне был применен метод дискретных ординат [17], основанный на замене в интегро-дифференциальном уравнении переноса интеграла по углам квадратурной формулой Гаусса, т.е. на переходе к дискретной сетке по углам рассеяния. В результате уравнение сводится к системе обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка. Методы решения таких систем уравнений хорошо известны и основаны на поиске собственных чисел и векторов матрицы

системы. В итоге находятся общее и частное решение с учетом граничных условий для каждого слоя атмосферы.

Согласно [18] прямая модель в самом общем виде может быть представлена следующим образом:

$$\mathbf{y} = F(\mathbf{x}) + \boldsymbol{\varepsilon}, \quad (1)$$

где \mathbf{y} – измеренный спектр; \mathbf{x} – вектор атмосферных параметров; $\boldsymbol{\varepsilon}$ – ошибка измерения. Если разделить модели переноса излучения на тепловой и ближний ИК, то уравнение (1) можно записать с использованием блочного представления матриц-столбцов:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{y}_{\text{TIR}} \\ \mathbf{y}_{\text{NIR}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{\text{TIR}}(\mathbf{x}) \\ F_{\text{NIR}}(\mathbf{x}) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \boldsymbol{\varepsilon}_{\text{TIR}} \\ \boldsymbol{\varepsilon}_{\text{NIR}} \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Здесь $F_{\text{TIR}}(\mathbf{x})$, $F_{\text{NIR}}(\mathbf{x})$, $\boldsymbol{\varepsilon}_{\text{TIR}}$, $\boldsymbol{\varepsilon}_{\text{NIR}}$ – нелинейные операторы прямой модели и ошибки измерения теплового и ближнего ИК-диапазонов соответственно.

Методы восстановления вертикальных профилей атмосферных параметров чаще всего основываются на линеаризации прямой модели (1) и использовании априорной информации в виде ковариационной матрицы профилей, полученных непосредственно при помощи прямых измерений этих параметров. В нашей работе для решения обратной задачи использовался метод оптимального оценивания, который основан на байесовских оценках состояния атмосферы, включает в рассмотрение априорную информацию об атмосферных параметрах в виде параметров многомерного нормального распределения и учитывает шумовые характеристики спектрометра. При оптимальном оценивании осуществляется минимизация целевой функции

$$J(\mathbf{x}) = [\mathbf{y} - F(\mathbf{x})]^T \mathbf{S}^{-1} [\mathbf{y} - F(\mathbf{x})] + [\mathbf{x} - \mathbf{x}_a]^T \mathbf{S}_a^{-1} [\mathbf{x} - \mathbf{x}_a], \quad (3)$$

где \mathbf{S} – ковариационная матрица ошибок измерения; \mathbf{S}_a – априорная ковариационная матрица атмосферных параметров; \mathbf{x}_a – априорный профиль атмосферных параметров. Минимизация целевой функции и восстановление вертикального профиля концентрации искомого газа (в данном случае метана) осуществляется по следующей итерационной формуле:

$$\mathbf{x}_{i+1} = \mathbf{x}_i + \left(\mathbf{K}_i^T \mathbf{S}^{-1} \mathbf{K}_i + \mathbf{S}_a^{-1} \right)^{-1} \times \left[\mathbf{K}_i^T \mathbf{S}^{-1} (\mathbf{y} - F(\mathbf{x}_i)) - \mathbf{S}_a^{-1} (\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_a) \right], \quad (4)$$

(\mathbf{x}_i – восстанавливаемый профиль атмосферных параметров; \mathbf{K}_i – якобиан прямой модели, определенный как матрица производных прямой модели по восстанавливаемым параметрам на вертикальной сетке атмосферных уровней: $\mathbf{K}_i = \partial F(\mathbf{x}_i) / \partial \mathbf{x}_i$).

В случае, когда прямая модель представляется уравнением (2), целевую функцию можно записать в виде

$$J(\mathbf{x}) = J_{\text{TIR}}(\mathbf{x}) + J_{\text{NIR}}(\mathbf{x}) + [\mathbf{x} - \mathbf{x}_a]^T \mathbf{S}_a^{-1} [\mathbf{x} - \mathbf{x}_a], \quad (5)$$

где

$$J_{\text{TIR}}(\mathbf{x}) = [\mathbf{y}_{\text{TIR}} - F_{\text{TIR}}(\mathbf{x})]^T \mathbf{S}_{\text{TIR}}^{-1} [\mathbf{y}_{\text{TIR}} - F_{\text{TIR}}(\mathbf{x})],$$

$$J_{\text{NIR}}(\mathbf{x}) = [\mathbf{y}_{\text{NIR}} - F_{\text{NIR}}(\mathbf{x})]^T \mathbf{S}_{\text{NIR}}^{-1} [\mathbf{y}_{\text{NIR}} - F_{\text{NIR}}(\mathbf{x})].$$

Минимизация целевой функции (5) осуществляется с использованием итерационной формулы (4) с учетом следующего блочного представления входящих в нее матриц и векторов:

$$\mathbf{y} = \begin{bmatrix} \mathbf{y}_{\text{TIR}} \\ \mathbf{y}_{\text{NIR}} \end{bmatrix}, \quad F(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} F_{\text{TIR}}(\mathbf{x}) \\ F_{\text{NIR}}(\mathbf{x}) \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} \mathbf{K}_{\text{TIR}} \\ \mathbf{K}_{\text{NIR}} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{S} = \begin{bmatrix} \mathbf{S}_{\text{TIR}} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{S}_{\text{NIR}} \end{bmatrix}$$

(\mathbf{K}_{TIR} и \mathbf{K}_{NIR} — якобианы прямой модели теплового и ближнего ИК-диапазонов).

Программное обеспечение FIRE-ARMS/VLIDORT

В работе [19] нами была представлена новая версия программного обеспечения (ПО) FIRE-ARMS [20] (Fine Infrared Explorer for Atmospheric

Radiation Measurements), дополненная процедурами VLIDORT для моделирования переноса излучения теплового и ближнего ИК-диапазонов в атмосфере с учетом рассеяния. ПО FIRE-ARMS предназначено для восстановления вертикальных профилей температуры, влажности и содержания различных поглощающих газов в атмосфере из спектров как теплового, так и ближнего ИК-диапазонов без учета многократного рассеяния. VLIDORT [21] — векторная линеаризованная модель переноса излучения в многослойной атмосфере с возможностью учета однократного и многократного рассеяния. Численное решение уравнения переноса излучения реализовано методом дискретных ординат. VLIDORT также содержит процедуры вычисления весовых функций на заданной сетке атмосферных слоев. Объединение этих программных продуктов позволяет использовать для восстановления концентрации искомого газа в атмосфере одновременно спектры теплового и ближнего ИК-диапазонов. Необходимая информация о спектроскопических параметрах молекул атмосферных газов берется из базы данных HITRAN [22]. В работе [19] нами было показано, что весовые функции прямой модели в тепловом и ближнем ИК-диапазонах имеют абсолютные максимумы в разных интервалах высот, и поэтому использование одновременно двух диапазонов улучшает вертикальное разрешение метода восстановления вертикального профиля метана. На рис. 1 приведены примеры весовых функций концентрации метана $\partial F_{\text{TIR}}/\partial N_{\text{CH}_4}$ и $\partial F_{\text{NIR}}/\partial N_{\text{CH}_4}$ для теплового и ближнего ИК-диапазонов, которые определены как строки матрицы \mathbf{K} , нормированные на абсолютный максимум.

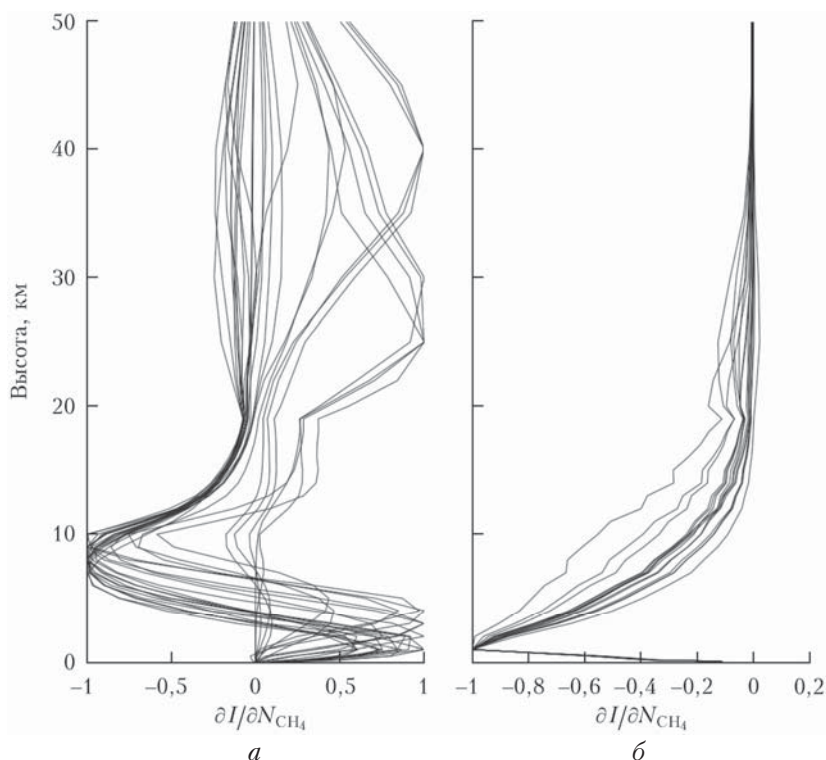


Рис. 1. Нормированные весовые функции метана для теплового (а) и ближнего (б) ИК-диапазонов

Восстановление вертикального профиля концентрации метана в атмосфере

Для оценки точности восстановления вертикального профиля метана и его полного содержания в атмосферном столбе был создан модельный набор состояний атмосферы. Вертикальные профили давления, температуры и влажности были построены по данным ретроспективного климатического анализа NCEP/NCAR (National Centers for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research) [23]. Построение модельного набора вертикальных профилей метана для численного эксперимента основывалось на добавлении случайной комбинации двух собственных векторов ковариационной матрицы:

$$N_{\text{CH}_4} = N_{\text{CH}_4}^* + a \cdot v_1 + b \cdot v_2, \quad (6)$$

где $N_{\text{CH}_4}^*$ – опорный профиль метана; a и b – случайные числа; v_1 и v_2 – первые собственные векторы ковариационной матрицы профилей метана, соответствующие наибольшему собственным числам. Опорный профиль CH_4 построен по данным реанализа CAMS (Copernicus Atmosphere Monitoring Service) [24] Европейского центра среднесрочных прогнозов (ECMWF). Вертикальные профили других газов были взяты из стандартной атмосферной модели для лета средних широт. Таким образом, для вычислительного эксперимента было сгенерировано ~200 вертикальных профилей CH_4 (рис. 2).

В диапазонах измерений 2 ($5800\text{--}6400\text{ см}^{-1}$) и 4 ($700\text{--}1800\text{ см}^{-1}$) спектрометра TANSO-FTS/GOSAT были выбраны полосы поглощения метана $5920\text{--}6010$ и $1285\text{--}1310\text{ см}^{-1}$ соответственно. Для каждого состояния атмосферы при помощи ПО FIREARMS/VLIDORT были смоделированы спектры в обоих диапазонах, проведена свертка с аппаратной функцией спектрометра и добавлен нормально распределенный шум, характерный для спектрометра TANSO-FTS. Затем решалась обратная задача, где по вычисленным модельным спектрам было проведено восстановление вертикального профиля метана. На рис. 3 представлены результаты восстановления вертикальных профилей концентрации CH_4 из теплового, ближнего ИК-диапазонов, из обоих диапазонов одновременно и вертикальное распределение ошибки восстановления профилей, вычисленной как среднеквадратичные отклонения восстановленных и модельных профилей во всем модельном наборе. Ошибки восстановления полного содержания метана в атмосферном столбе составили $5,2 \cdot 10^{-3}$, $6,7 \cdot 10^{-3}$ и $2,2 \cdot 10^{-3}$ моль/м² для каждого случая соответственно (рис. 3).

Представленные результаты показывают, что дополнение спектров ближнего ИК-диапазона спектрами теплового ИК-диапазона улучшает точность определения вертикального профиля концентрации

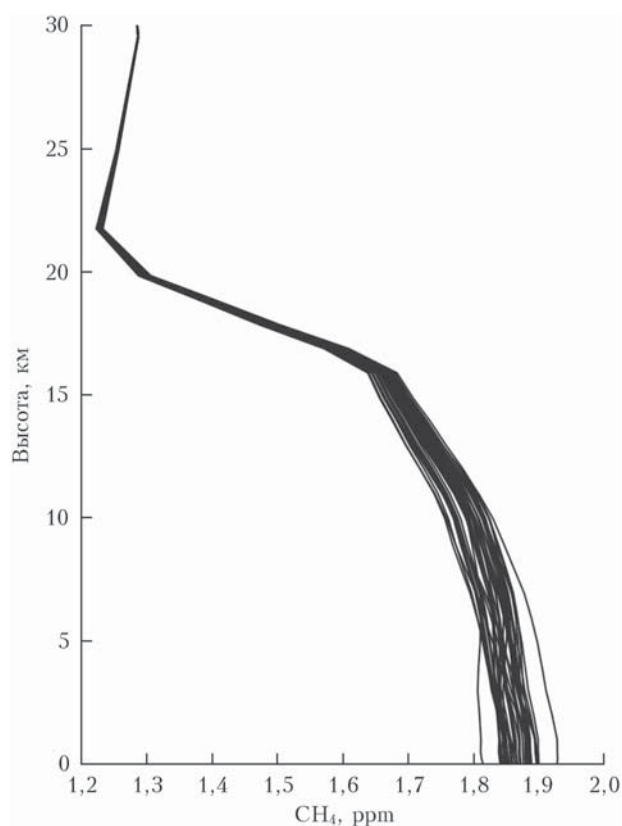


Рис. 2. Множество профилей метана, созданное на основе формулы (4)

метана в атмосфере, которое в настоящее время для стандартных продуктов GOSAT выполняется отдельно для каждого диапазона.

Заключение

В данной работе впервые предложен метод решения обратной задачи спутникового зондирования атмосферы для определения концентрации искомого парникового газа с одновременным использованием атмосферных спектров теплового и ближнего ИК-диапазонов. Предлагаемый метод и новая версия ПО предназначены для работы с данными ИК-Фурье-спектрометра TANSO-FTS действующего спутника GOSAT. Однако в настоящее время не представляется возможным апробировать данный метод и ПО на его натуральных атмосферных спектрах из-за имеющихся нерешенных проблем с радиометрической калибровкой в тепловом спектральном диапазоне [25], что не позволяет использовать ПО для массовой обработки данных GOSAT. В перспективе планируется адаптировать ПО для обработки данных ИК-Фурье-спектрометра TANSO-FTS нового спутника GOSAT-2 для решения задач улучшенного, по сравнению с текущей ситуацией, мониторинга парниковых газов в атмосфере с одновременным использованием теплового и ближнего ИК-диапазонов.

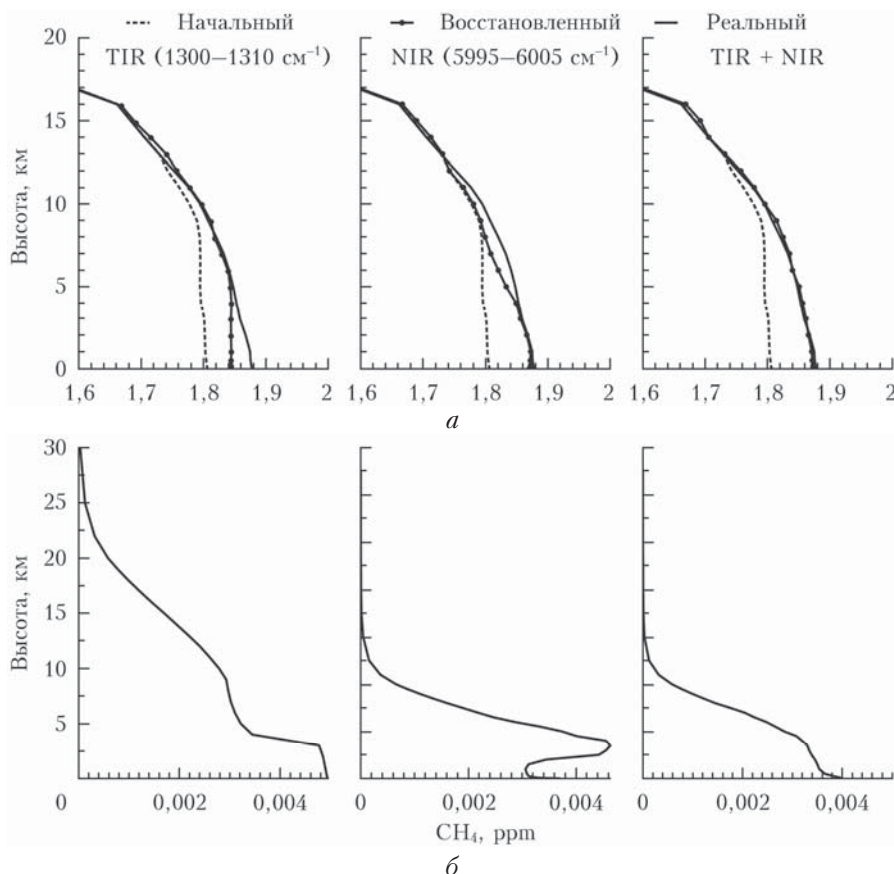


Рис. 3. Результаты вычислительного эксперимента, демонстрирующие совместное и раздельное восстановление вертикального профиля концентрации метана из теплового и ближнего ИК-диапазонов (а) и вертикальное распределение ошибки (б)

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (грант № 18-11-00024).

1. Saunio M., Bousquet P., Poulter B., Peregón A., Ciais P., Canadell J.G., Dlugokencky E.J., Etiope G., Bastviken D., Houweling S., Janssens-Maenhout G., Tubiello F.N., Castaldi S., Jackson R.B., Alexe M., Arora V.K., Beerling D.J., Bergamaschi P., Blake D.R., Brailsford G., Brookin V., Bruhwiler L., Crevoisier C., Crill P., Curry C., Frankenberg C., Gedney N., Höglund-Isaksson L., Ishizawa M., Ito A., Joos F., Kim H.-S., Kleinman T., Krumme P., Lamarque J.-F., Langenfelds R., Locatelli R., Machida T., Maksyutov S., McDonald K.C., Marshall J., Melton J.R., Morino I., O'Doherty S., Parmentier F.-J.W., Patra P.K., Peng C., Peng S., Peters G.P., Pison I., Prigent C., Prinn R., Ramonet M., Riley W.J., Saito M., Schroeder R., Simpson I.J., Spahni R., Steele P., Takizawa A., Thornton B.F., Tian H., Tohjima Y., Viovy N., Voulgarakis A., van Weele M., van der Werf G., Weiss R., Wiedinmyer C., Wilton D.J., Wiltshire A., Worthy D., Wunch D.B., Xu Xi., Yoshida Y., Zhang B., Zhang Z., Zhu Q. The global methane budget: 2000–2012 // *Earth Syst. Sci. Data*. 2016. V. 8, N 2. P. 697–751.
2. Clerbaux C., Hadji-Lazarou J., Turquety S., Mérieux G., Coheur P.-F. Trace gas measurements from infrared satellite for chemistry and climate applications // *Atmos. Chem. Phys.* 2003. V. 3, N 5. P. 1495–1508.
3. National Center for Atmospheric Research. Measurements of pollution in the troposphere (MOPITT) [Electronic resource]. URL: http://www.airs.jpl.nasa.gov/mission_and_instrument/overview (last access: 20.06.2018).

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. 127–125.
5. EUMETSAT. Satellites: METOP [Electronic resource]. URL: <https://www.eumetsat.int/website/home/Satellites/CurrentSatellites/Metop/index.html> (last access: 20.06.2018).
6. Поляков А.В., Тимофеев Ю.М., Виролайн Я.А., Успенский А.Б., Завелевич Ф.С., Головин Ю.М., Козлов Д.А., Рублев А.Н., Кухарский А.В. Спутниковый атмосферный зондировщик ИКФС-2. 1. Анализ измерений спектров уходящего излучения // *Исслед. Земли из космоса*. 2016. № 5. С. 71–78.
7. 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.
8. 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) // *Geophys. Res. Abstr.* [Electronic resource]. URL: <http://www.meetingorganizer.copernicus.org/EGU2015/EGU2015-13150.pdf> (last access: 20.09.2018).
9. Jacob D.J., Turner A.J., Maasakkers J.D., Sheng J., Sun K., Liu X., Chance K., Aben I., McKeever J., Fran-

- kenberg C. Satellite observations of atmospheric methane and their value for quantifying methane emissions // Atmos. Chem. Phys. 2016. V. 16, N 22. P. 14371–14396.
10. *Lenoble J.* Radiative transfer in scattering and absorbing atmospheres: Standard computational procedures. Hampton: A. DEERAK Publishing, 1985. 300 p.
 11. *Сушкевич Т.А.* Математические модели переноса излучения. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2005. 661 с.
 12. *Будак В.П., Коркин С.В.* Моделирование пространственного распределения степени поляризации рассеянного атмосферой излучения на основании полного аналитического решения векторного уравнения переноса // Оптика атмосфер. и океана. 2008. Т. 21, № 1. С. 35–41.
 13. *Журавлева Т.Б.* Моделирование переноса солнечного излучения в различных атмосферных условиях. Часть I. Детерминированная атмосфера // Оптика атмосфер. и океана. 2008. Т. 21, № 2. С. 99–114.
 14. *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. Am. A. 2015. V. 23, N 15. P. 829–840.
 15. *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.
 16. *Журавлева Т.Б., Фирсов К.М.* Алгоритмы расчетов спектральных потоков солнечной радиации в облачной и безоблачной атмосфере // Оптика атмосфер. и океана. 2004. Т. 17, № 11. С. 903–911.
 17. *Chandrasekhar S.* Radiative Transfer. New York: Dover Publications, 1960. 393 p.
 18. *Rogers C.D.* Inverse methods for atmospheric sounding. Theory and practice. Singapore, London: World Scientific Publishing, 2000. 206 p.
 19. *Задворных И.В., Грибанов К.Г., Захаров В.И., Imasu R.* Программное обеспечение для моделирования переноса излучения теплового и ближнего ИК-диапазонов в атмосфере с учетом многократного рассеяния // Оптика атмосфер. и океана. 2017. Т. 30, № 2. С. 128–133; *Zadvornyykh I.V., Gribanov K.G., Zakharov V.I., Imasu R.* Radiative transfer code for the thermal and near-infrared regions with multiple scattering // Atmos. Ocean. Opt. 2017. V. 30, N 4. P. 305–310.
 20. *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.
 21. *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.
 22. *Rothman L.S., Gordon I.E., Babikov Y., Barbe A., Benner C.D., Bernath P.F., Birk M., Bizzocchi L., Boudon V., Brown L.R., Campargue A., Chance K., Cohen E.A., Couderc L.H., Devi V.M., Drouin B.J., Faytl 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 HITRAN2012 molecular spectroscopic database // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer. 2013. V. 130. P. 4–50.
 23. *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. Am. Meteorol. Soc. 1996. N 77. P. 437–470.
 24. CAMS Reanalysis data and documentation. [Electronic resource]. URL: <https://www.software.ecmwf.int/wiki/display/CKB/CAMS+Reanalysis+data+documentation> (last access: 20.06.2018).
 25. *Gero J., Knuteson R., Shiomi K., Kuze A., Kataoka F., Revercomb H., Tobin D., Taylor J., Best F.* GOSAT TANSO FTS TIR band calibration: A five year review // Proc. SPIE. 2014. V. 9263. P. 926316-1–12. DOI: 10.1117/12.2069327.

I.V. Zadvornyykh, K.G. Gribanov, V.I. Zakharov, R. Imasu. A method for joint methane vertical profile retrieval from atmospheric spectra in the thermal and near-infrared regions.

A method of solution of the inverse problem of satellite sounding of the atmosphere for the retrieval of vertical profiles of optically active gas concentrations from high resolution atmospheric spectra in thermal and near infrared ranges jointly is presented. To demonstrate the capabilities of the method, a computational experiment was performed to retrieve the vertical profile of the main methane isotopologue with simultaneous use of synthetic spectra in the thermal and near-infrared regions. The spectra simulated reproduce the spectra measured by TANSO-FTS/GOSAT IR Fourier spectrometers. The signal-to-noise ratio in the spectra was set at 350. The model experiments show higher accuracy of retrieval of the methane vertical profile and its total column in case of joint use of both spectral bands (thermal and near-IR) in comparison with the use of each band separately.