

Амплитуда сезонного цикла CO₂ в атмосфере Уральского региона по результатам наземного и спутникового ИК-зондирования

Н.В. Рокотян¹, Р. Imasu², В.И. Захаров¹,
К.Г. Грибанов¹, М.Ю. Хаматнурова^{1*}

¹Уральский федеральный университет

620083, г. Екатеринбург, пр. Ленина, 51, Россия

²Atmosphere 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 10.01.2014 г.

Обработана серия спектров пропускания атмосферы высокого разрешения в ближнем ИК-диапазоне 4000–10000 см⁻¹, зарегистрированных на Уральской атмосферной Фурье-станции в Коуровке в период 2012–2013 гг. Решена обратная задача восстановления средней концентрации CO₂ и CH₄ в атмосферном столбе из измеренных спектров. В полученных данных по концентрации атмосферного метана в пределах ошибки восстановления не наблюдается выраженного сезонного цикла, тогда как в концентрации CO₂ явно выражены сезонные вариации с достаточно большой амплитудой, наблюдаемые также в результатах спутникового зондирования. Сравнение среднемесячных данных спутникового зондирования японского сенсора TANSO-FTS/GOSAT в исследуемом регионе демонстрирует хорошее согласие с восстановленными значениями концентрации CO₂, а в среднемесячных данных по CH₄ корреляция практически не наблюдается. В результате из полученных данных наземного и спутникового зондирования определена амплитуда сезонных колебаний CO₂ в атмосферном столбе в районе Коуровки, которая составляет 14–15 ppm, что характеризует мощность фотосинтеза лесной экосистемы Урала.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, Фурье-спектрометрия, углеродсодержащие парниковые газы, CO₂, CH₄, GOSAT, FTIR, валидация, Уральская атмосферная станция; atmospheric remote sensing, FTIR spectrometry, carbon gases, greenhouse gases, CO₂, CH₄, GOSAT, validation, Ural Atmospheric Station.

Введение

Палеоклиматические исследования [1, 2] выявили сильную взаимосвязь между температурным режимом Земли и содержанием парниковых газов в атмосфере. Диоксид углерода CO₂ и метан CH₄ являются двумя наиболее важными антропогенными парниковыми газами, участвующими в процессе глобального потепления [3]. В результате индустриализации за последнее столетие наблюдается стремительный рост атмосферных концентраций CO₂ и CH₄, что приводит к росту средней температуры на планете [4–10]. Согласно данным прямых приземных измерений в обсерватории Mauna Loa [11] на Гавайях, за 50 лет наблюдений скорость роста содержания CO₂ в атмосфере непрерывно росла и составляет сейчас более 2 ppm в год.

Несмотря на важную роль двуокиси углерода и метана в изменении климата на планете, до сих пор не хватает количественной информации об источниках и стоках этих газов [12–17]. В январе 2009 г. по совместному проекту Японского агентства аэрокосмических исследований и Национального института исследований окружающей среды в Цукубе (Япония) был запущен космический спутник GOSAT (Global Greenhouse Gas Observation by Satellite) [18] с целью мониторинга глобальных распределений относительных концентраций CO₂ и CH₄ в атмосферном столбе, используя гиперспектральные измерения. Определение средних по столбу концентраций CO₂ и CH₄, обозначаемых далее как XCO₂ и XCH₄, осуществляется из спектров теплового излучения планеты и отраженного солнечного излучения, измеряемых сенсором TANSO-FTS (Thermal And Near infrared Sensor for carbon Observations – Fourier Transform Spectrometer), установленным на борту спутника [19].

Для валидации спутниковых данных используют прямые самолетные подспутниковые измерения вертикальных профилей концентрации искоемых газов в различных регионах земного шара [20–28].

* Никита Валерьевич Рокотян (nrkotyan@gmail.com); Ryoichi Imasu (imasu@aori.u-tokyo.ac.jp); Вячеслав Иосифович Захаров (v.zakharov@remotesensing.ru); Константин Геннадьевич Грибанов (kgribanov@remotesensing.ru); Марина Юрьевна Хаматнурова (khamatnurova@wsibiso.ru).

Институтом оптики атмосферы СО РАН активно ведутся самолетные измерения концентраций парниковых и загрязняющих атмосферу газов для накопления их временных значений и валидации спутниковых данных на территории Западной Сибири [22–24]. Результаты экспериментов по валидации восстанавливаемых из спектров спутника GOSAT значений XCO_2 и XCH_4 с использованием самолетных измерений в целом демонстрируют хорошее согласие [20, 21].

Также для валидации спутниковых данных используются результаты наземного дистанционного зондирования станций TCCON (The Total Carbon Column Observing Network) [29] и NDACC (Network for the Detection of Atmospheric Composition Change) [30]. Заявленная точность восстановления XCO_2 и XCH_4 в сети TCCON из измеряемых спектров выше 0,25% (1 ppm для CO_2 и 5 ppb для CH_4) [29]. Анализ восстанавливаемых значений XCO_2 и XCH_4 путем сравнения их с измерениями наземной сети по слежению за содержанием углеродсодержащих парниковых газов в атмосферном столбе методом ИК-Фурье-спектроскопии TCCON выявил значительное занижение спутниковых значений по сравнению с наземными наблюдениями [31].

Сравнение значений XCO_2 и XCH_4 , полученных различными алгоритмами восстановления, продемонстрировало лучшее согласие между спутниковыми и наземными измерениями [32, 33]. Поскольку географическая область исследования в данных работах ограничена зарубежными станциями, расположенными вне территории России, валидация спутниковых данных на обширной территории России, в особенности на высоких широтах, остается важной задачей.

Уральская атмосферная станция в Коуровке, оборудованная ИК-Фурье-интерферометром Bruker IFS 125M, производит регулярные измерения спектров пропускания атмосферой прямого солнечного излучения в ближнем ИК-диапазоне с целью дистанционного мониторинга атмосферного состава, соответствующего требованиям точности, установленным стандартом TCCON. Станция располагается в фоновом лесном массиве (57,036° с.ш., 59,546° в.д., 270 м над у. м.) и является уникальной на территории России. В работе [34] с помощью моделирования общей атмосферной циркуляции было показано, что измерения, проводимые на Уральской атмосферной станции, являются репрезентативными, в том числе и для региона Западной Сибири. В 2013 г. было организовано добавление Уральской атмосферной станции в перечень специальных точек наблюдения спутника GOSAT, что в будущем позволит производить эксперименты по валидации спутниковых измерений. Оборудование на станции является полностью или частично автоматизированным. Это дает возможность производить измерения удаленно с максимальной частотой. Регистрация интерферограмм происходит в режиме DC, после чего производится коррекция вариаций интенсивности солнечного излучения согласно алгоритму, предложенному в работе [35]. Такой подход минимизирует негативное

влияние аэрозольного загрязнения и легкой облачности на результаты зондирования. Одновременно с измерениями спектров ведутся измерения метеорологических параметров: давления, влажности, температуры и горизонтальных компонент скорости ветра.

В настоящей статье приведены результаты дистанционного зондирования XCO_2 и XCH_4 в атмосфере на Уральской атмосферной Фурье-станции за 2012–2013 гг., которые сравниваются с данными спутникового зондирования GOSAT в Уральском регионе.

Восстановление XCO_2 и XCH_4 из наземных ИК-Фурье-измерений

Задача определения атмосферных параметров из измеряемых спектров пропускания атмосферы в общем случае является некорректной обратной задачей, решение которой может быть неоднозначным и неустойчивым [36]. В данной работе восстановление значений XCO_2 и XCH_4 проводилось с применением программного комплекса GFIT [29, 37], используемого в сети TCCON. Алгоритм восстановления средней концентрации искомого газа в атмосферном столбе, реализованный в программном пакете GFIT, использует устойчивый метод решения обратной задачи, основанный на методе масштабирования профиля начального приближения искомого газа и базируется на минимизации следующей целевой функции:

$$J = \sum_i \frac{(y_i - F(\alpha, \beta, \nu_i + \delta, \gamma_1 \mathbf{x}_1, \dots, \gamma_m \mathbf{x}_m))^2}{\sigma_i^2}, \quad (1)$$

где F – спектр, рассчитанный прямой моделью; y_i – измеренный спектр; ν_i – волновое число в i -м спектральном канале; α и β – значения уровня и наклона континуальной подложки; δ – частотный сдвиг измеренного спектра; $\gamma_1, \dots, \gamma_m$ – коэффициенты масштабирования профилей начального приближения подгоняемых газов $\mathbf{x}_1, \dots, \mathbf{x}_m$, m – число подгоняемых газов; σ_i – неопределенность значения в i -м спектральном канале. Так как в GFIT используется техника масштабирования профиля начального приближения, то это означает, что в процедуре восстановления не производится определение вертикального профиля и определяется только полное число молекул интересующих газов в атмосферном столбе. Согласно [9] такой подход является значительно менее ресурсоемким, что позволяет быстро обрабатывать большие объемы данных, и менее чувствительным к некоторым систематическим ошибкам в контурах спектральных линий. Полученное таким способом решение для XCO_2 и XCH_4 является устойчивым к уровню шума в спектре и слабо зависит от профиля начального приближения.

Спектральные интервалы, используемые для восстановления так называемых относительных концентраций XCO_2 и XCH_4 в атмосферном столбе, приведены в таблице. Относительные концентрации XCO_2 и XCH_4 представляют собой отношение

восстанавливаемого полного содержания CO_2 и CH_4 к восстанавливаемому полному содержанию O_2 в атмосферном столбе соответственно.

Спектральные интервалы для восстановления XCO_2 и XCH_4

Газ	Центр спектрального интервала, см^{-1}	Ширина, см^{-1}	Другие газы, участвующие в подгонке
CH_4	5938,00	116,00	CO_2 H_2O N_2O
CH_4	6002,00	11,10	CO_2 H_2O HDO
CH_4	6076,00	138,00	CO_2 H_2O HDO
CO_2	6220,00	80,00	H_2O HDO CH_4
CO_2	6339,50	85,00	H_2O HDO
O_2	7885,00	240,00	H_2O HF CO_2

Источником информации о параметрах линий молекулярного поглощения является собственная спектроскопическая база данных, основанная на банке спектроскопических параметров HITRAN 2008 [38] с добавлениями и эмпирическими корректировками. В качестве априорных вертикальных профилей давления, влажности и температуры используются данные реанализа NCEP/NCAR [39], скорректированные

с помощью локальных метеорологических измерений в Коуровке.

Спутниковые наблюдения

Для сравнения с результатами наземных наблюдений были взяты данные измерений спутника GOSAT в окрестности ± 800 км от Уральской атмосферной станции в Коуровке. На рис. 1 представлено расположение точек наблюдения спутника относительно станции наземных наблюдений. При сравнении результатов зондирования обычно получаем систематические сдвиги между восстанавливаемыми значениями концентраций искоемых газов в атмосфере. Возможной причиной таких сдвигов является неопределенность в спектроскопических параметрах, на которые полагаются техники по восстановлению атмосферного состава. При сравнении результатов определения XCO_2 и XCH_4 мы обнаружили, что спутниковые данные систематически завышены приблизительно на 3 ppm для CO_2 и 0,03 ppm для CH_4 .

Далее в представленных результатах была произведена коррекция значений посредством сдвига спутниковых данных на найденные величины.

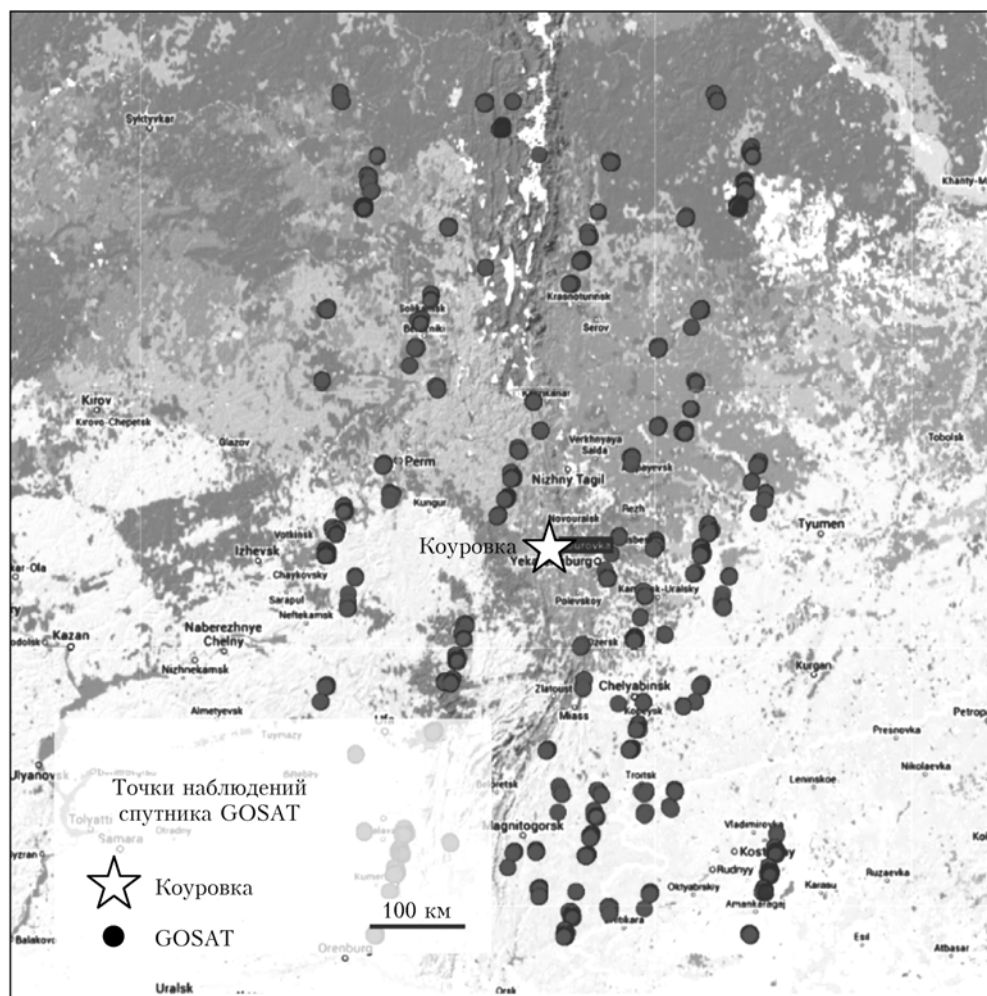


Рис. 1. Точки наблюдений японского спутника GOSAT в районе Уральской атмосферной станции в Коуровке

Результаты сравнения наземного и спутникового зондирования

Временные ряды средневзвешенных относительных концентраций XCO_2 и XCH_4 , восстановленные из наземных измерений на Уральской атмосферной станции, представлены на рис. 2 совместно с результатами зондирования спутника GOSAT в различных точках вблизи пункта наземного зондирования. На рис. 3 приведены результаты, усредненные по месяцам, а также по всей территории спутникового зондирования.

Как в средневзвешенных, так и в среднемесечных наземных и спутниковых значениях концентрации CO_2 наблюдается отчетливо выраженный сезонный цикл. Глубина цикла составляет 14–15 ppm, что характеризует мощность фотосинтеза Уральской лесной экосистемы как достаточно высокую. Также виден тренд в сторону увеличения концентрации CO_2 в атмосфере со скоростью приблизительно 2 ppm/год. Что касается результатов определения относительной концентрации CH_4 , в районе Уральской атмосферной станции четко выраженного сезонного цикла CH_4

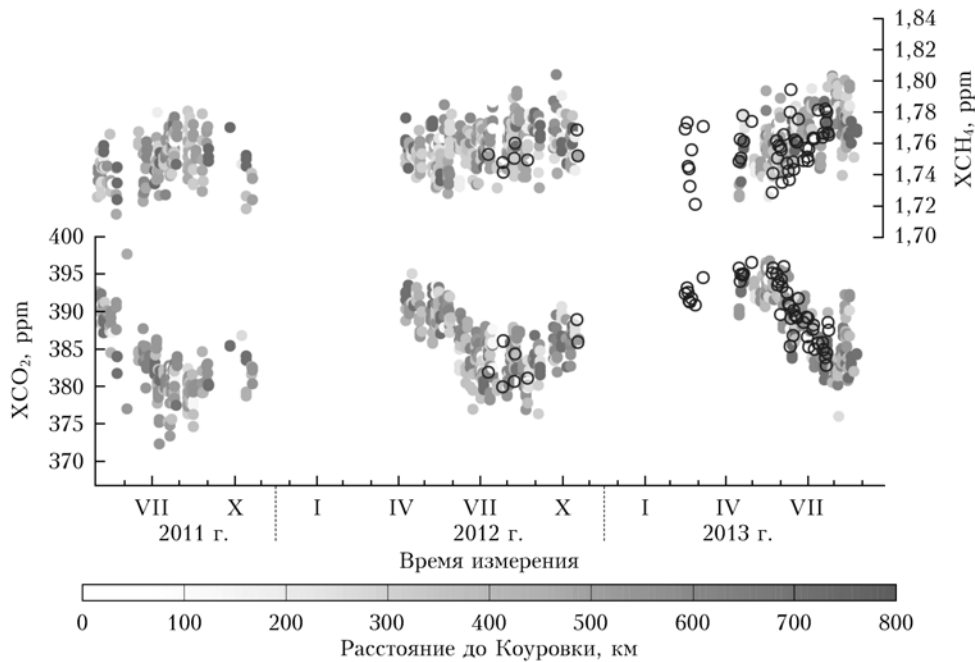


Рис. 2. Результаты восстановления XCH_4 и XCO_2 из спектров пропускания, измеренных на Уральской атмосферной станции с 2012 по 2013 г. (окружности), и соответствующие им спутниковые данные (круги). Тоновая шкала отображает расстояние от точки спутникового измерения до станции в Коуровке

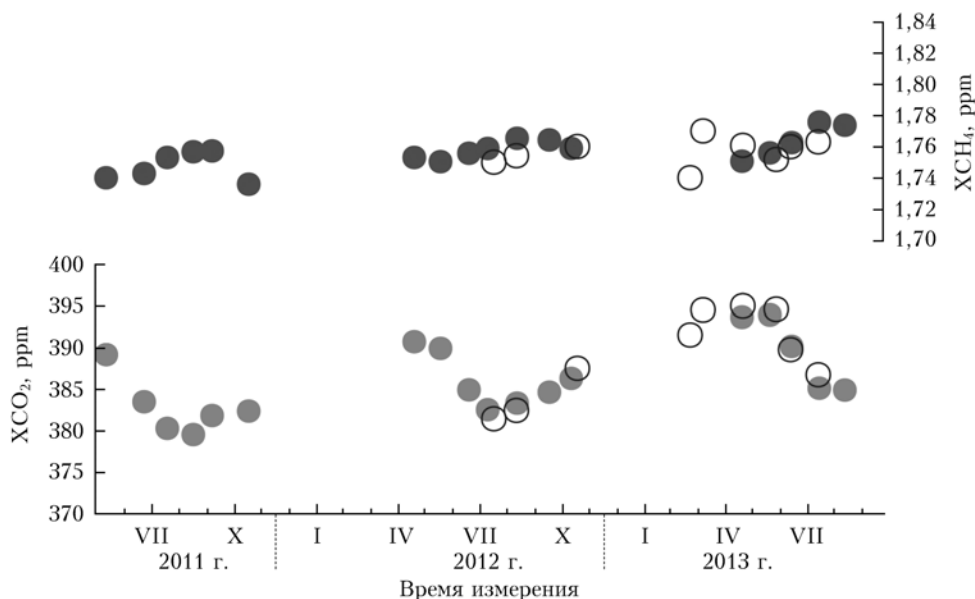


Рис. 3. Среднемесечные результаты восстановления XCH_4 и XCO_2 из спектров пропускания, измеренных на Уральской атмосферной станции с 2012 по 2013 г. (окружности), и соответствующие им усредненные спутниковые данные (круги)

не наблюдается, однако за последние два года в спутниковых данных отмечается тренд роста относительной концентрации CH_4 в среднем около 0,01 ppm в год.

На рис. 4 приведена диаграмма рассеяния среднемесячных значений концентрации XCO_2 , полученных из спутниковых данных, и результатов наземных измерений. Среднемесячные значения демонстрируют очень хорошую корреляцию $r = 0,98$. Между среднедневными значениями она составляет 0,82.

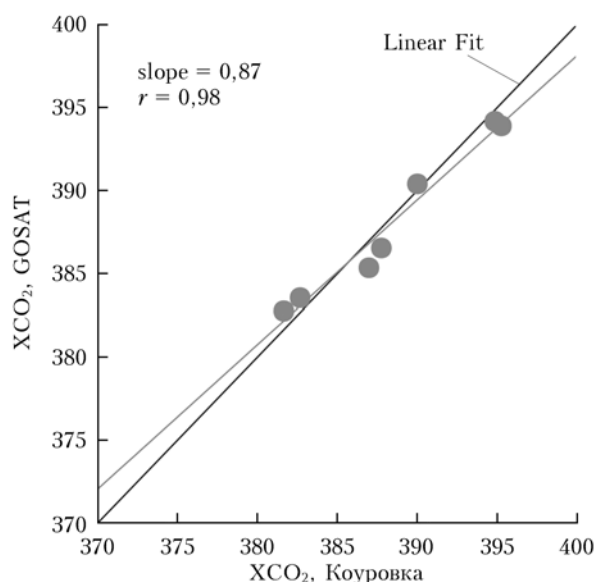


Рис. 4. Диаграмма рассеяния среднемесячных спутниковых результатов и результатов наземного зондирования XCO_2 . Коэффициент корреляции $r = 0,98$

Коэффициент наклона при аппроксимации прямой равен 0,87. В то же время существенной корреляции между среднемесячными значениями XCH_4 не наблюдается (0,66 для среднедневных результатов), что можно объяснить наличием локальных источников метана, расположенных в области точек наблюдения спутника, по которым производилось усреднение спутниковых результатов.

Заключение

Произведено восстановление относительной средней концентрации CO_2 и CH_4 в атмосферном столбе из ИК-Фурье-спектров пропускания атмосферы, зарегистрированных на Уральской атмосферной станции в Коуровке в 2012–2013 гг. Сравнение результатов восстановления XCO_2 , усредненных по месяцам, с результатами спутникового зондирования сенсора TANSO-FTS/GOSAT в близости пункта наземных наблюдений демонстрирует хорошее согласие с коэффициентом корреляции 0,98 и коэффициентом наклона 0,87 при аппроксимации прямой. Определена амплитуда сезонного хода CO_2 в атмосфере Урала, равная приблизительно 15 ppm. Локальный тренд в росте концентрации CO_2 составляет около 2 ppm/год. В то же время, несмотря на близкий диапазон значений XCH_4 из спутниковых и назем-

ных измерений, корреляция между среднемесячными результатами практически отсутствует.

В целом, высокая корреляция между наземными и спутниковыми результатами XCO_2 говорит о достоверности восстанавливаемых значений, однако отсутствие согласия между результатами восстановления относительной концентрации метана в атмосфере требует дополнительного исследования.

1. Jouzel J. A brief history of ice core science over the last 50 years // *Clim. Past*. 2013. V. 9, N 6. P. 2525–2547.
2. MacFarling Meure C., Etheridge D., Trudinger C., Steele P., Langenfelds R., van Ommen T., Smith A., Elkins J. Law Dome CO_2 , CH_4 , and N_2O ice core records extended to 2000 years BP // *Geophys. Res. Lett.* 2006. V. 33. L14810. 4 p.
3. Solomon S., Qin D., Manning M., Chen Z., Marquis M., Averyt K.B., Tignor M., Miller H.L. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis* // Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Cambridge University Press, 2007. 996 p.
4. Francey R.J., Trudinger C.M., van der Schoot M., Law R.M., Krummel P.B., Langenfelds R.L., Steele L.P., Allison C.E., Stavert A.R., Andres R.J., Rodenbeck C. Atmospheric verification of anthropogenic CO_2 emission trends // *Nat. Clim. Change*. 2012. V. 3, N 5. P. 520–524.
5. Olivier J.G.J., Janssens-Maenhout G., Peters J.A.H.W. Trends in global CO_2 emissions, 2012 Report. PBL Netherlands Environmental Assessment Agency. The Hague, Joint Research Centre. 2012. 39 p.
6. Schneising O., Buchwitz M., Reuter M., Heymann J., Bovensmann H., Burrows J.P. Long-term analysis of carbon dioxide and methane column-averaged mole fractions retrieved from SCIAMACHY // *Atmos. Chem. Phys.* 2011. V. 11, N 6. P. 2863–2880.
7. Schneising O., Heymann J., Buchwitz M., Reuter M., Bovensmann H., Burrows J.P. Anthropogenic carbon dioxide source areas observed from space: Assessment of regional enhancements and trends // *Atmos. Chem. Phys.* 2013. V. 13, N 5. P. 2445–2454.
8. Schneising O., Reuter M., Buchwitz M., Heymann J., Bovensmann H., Burrows J.P. Terrestrial carbon sink observed from space: Variation of growth rates and seasonal cycle amplitudes in response to interannual surface temperature variability // *Atmos. Chem. Phys.* 2014. V. 14, N 1. P. 133–141.
9. Dlugokencky E.J., Bruhwiler L., White J.W.C., Emmons L.K., Novelli P.C., Montzka S.A., Masarie K.A., Lang P.M., Crotwell A.M., Miller J.B., Gatti L.V. Observational constraints on recent increases in the atmospheric CH_4 burden // *Geophys. Res. Lett.* 2009. V. 36, N 18. L18803. 5 p.
10. Rigby M., Prinn R.G., Fraser P.J., Simmonds P.G., Langenfelds R.L., Huang J., Cunnold D.M., Steele L.P., Krummel P.B., Weiss R.F., O'Doherty S., Salameh P.K., Wang H.J., Harth C.M., Mühle J., Porter L.W. Renewed growth of atmospheric methane // *Geophys. Res. Lett.* 2008. V. 35, N 22. L22805. 6 p.
11. URL: <http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/>
12. Kirschke S., Bousquet P., Ciais P., Saunois M., Canadell J.G., Dlugokencky E.J., Bergamaschi P., Bergmann D., Blake D.R., Bruhwiler L., Cameron-Smith P., Castaldi S., Chevallier F., Feng L., Fraser A., Heimann M., Hodson E.L., Houweling S., Josse B., Fraser P.J., Krummel P.B., Lamarque J.-F., Langenfelds R.L., Le Quére C.,

- Naik V., O'Doherty S., Palmer P.I., Pison I., Plummer D., Poulter B., Prinn R.G., Rigby M., Ringeval B., Santini M., Schmidt M., Shindell D.T., Simpson I.J., Spahni R., Steele L.P., Strode S.A., Kengo Sudo K., Szoopa S., van der Werf G.R., Voulgarakis A., van Weele M., Weiss R.F., Williams J.E., Zeng G. Three decades of global methane sources and sink // *Nat. Geosci.* 2013. V. 6, N 10. P. 813–823.
13. Bergamaschi P., Houweling H., Segers A., Krol M., Frankenberg C., Scheepmaker R.A., Dlugokencky E., Wofsy S.C., Kort E.A., Sweeney C., Schuck T., Brenninkmeijer C., Chen H., Beck V., Gerbig C. Atmospheric CH₄ in the first decade of the 21st century: Inverse modeling analysis using SCIAMACHY satellite retrievals and NOAA surface measurements // *J. Geophys. Res.* 2013. V. 118, N 13. P. 7350–7369.
14. Ciais P., Dolman A.J., Bombelli A., Duren R., Peregon A., Rayner P.J., Miller C., Gobron N., Kinderman G., Marland G., Gruber N., Chevallier F., Andres R.J., Balsamo G., Bopp L., Bréon F.-M., Broquet G., Dargaville R., Battin T.J., Borges A., Bovensmann H., Buchwitz M., Butler J., Canadell J.G., Cook R.B., DeFries R., Engelen R., Gurney K.R., Heinze C., Heimann M., Held A., Henry M., Law B., Luyssaert S., Miller J., Moriyama T., Moulin C., Myeni R.B., Nussli C., Obersteiner M., Ojima D., Pan Y., Paris J.-D., Piao S.L., Poulter B., Plummer S., Quegan S., Raymond P., Reichstein M., Rivier L., Sabine C., Schimel D., Tarasova O., Valentini R., van der Werf G., Wickland D., Williams M., Zehner C. Current systematic carbon cycle observations and needs for implementing a policy-relevant carbon observing system // *Biogeosciences Discuss.* 2013. V. 10, N 7. P. 11447–11581.
15. Houweling S., Krol M., Bergamaschi P., Frankenberg C., Dlugokencky E.J., Morino I., Notholt J., Sherlock V., Wunch D., Beck V., Gerbig C., Chen H., Kort E.A., Röckmann T., Aben I. A multi-year methane inversion using SCIAMACHY, accounting for systematic errors using TCCON measurements // *Atmos. Chem. Phys.* 2014. V. 14, N 8. P. 3991–4012.
16. Canadell J.G., Ciais P., Dhakal S., Dolman H., Friedlingstein P., Gurney K.R., Held A., Jackson R.B., Le Quééré C., Malone E.L., Ojima D.S., Patwardhan A., Peters G.P., Raupach M.R. Interactions of the carbon cycle, human activity, and the climate system: a research portfolio // *Curr. Opin. Environ. Sustainabil.* 2010. V. 2, N 4. P. 301–311.
17. Stephens B.B., Gurney K.R., Tans P.P., Sweeney C., Peters W., Bruhwiler L., Ciais P., Ramonet M., Bousquet P., Nakazawa T., Aoki S., Machida T., Inoue G., Vimmichenko N., Lloyd J., Jordan A., Heimann M., Shibistova O., Langenfelds R.L., Steele L.P., Francey R.J., Denning A.S. Weak northern and strong tropical land carbon uptake from vertical profiles of atmospheric CO₂ // *Science.* 2007. V. 316, N 5832. P. 1732–1735.
18. 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.
19. Yoshida Y., Ota Y., Eguchi N., Kikuchi N., Nobuta K., Tran H., Morino I., Yokota T. Retrieval algorithm for CO₂ and CH₄ column abundances from short-wavelength infrared spectral observations by the greenhouse gases observing satellite // *Atmos. Measur. Technol.* 2011. V. 4, N 4. P. 717–734.
20. Inoue M., Morino I., Uchino O., Miyamoto Y., Yoshida Y., Yokota T., Machida T., Sawa Y., Matsueda H., Sweeney C., Tans P.P., Andrews A.E., Biraud S.C., Tanaka T., Kawakami S., Patra P.K. Validation of XCO₂ derived from SWIR spectra of GOSAT TANSO-FTS with aircraft measurement data // *Atmos. Chem. Phys.* 2013. V. 13, N 19. P. 9771–9788.
21. Tanaka T., Miyamoto Y., Morino I., Machida T., Nagahama T., Sawa Y., Matsueda H., Wunch D., Kawakami S., Uchino O. Aircraft measurements of carbon dioxide and methane for the calibration of ground-based high-resolution Fourier Transform Spectrometers and a comparison to GOSAT data measured over Tsukuba and Moshiri // *Atmos. Measur. Technol.* 2012. V. 8, N 5. P. 2005–2012.
22. Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Давыдов Д.К., Inoue G., Краснов О.А., Machida T., Maksutov Sh.Sh., Недэ-лэк Ф., Рамонет М., Суас Ф., Толмачев Г.Н., Фофонов А.В. Организация мониторинга парниковых и окисляющих атмосферу компонент над территорией Сибири и некоторые его результаты. 1. Газовый состав // *Оптика атмосф. и океана.* 2006. Т. 19, № 11. С. 948–955.
23. Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Давыдов Д.К., Inoue G., Maksutov Sh.Sh., Machida T., Фофонов А.В. Вертикальное распределение парниковых газов над Западной Сибирью по данным многолетних измерений // *Оптика атмосф. и океана.* 2009. Т. 22, № 5. С. 457–464.
24. Аршинов М.Ю., [Афонин С.В.], Белан Б.Д., Белов В.В., Гриднев Ю.В., Давыдов Д.К., Machida T., Nédélec Ph., Paris J.-D., Фофонов А.В. Сравнение спутниковых и самолетных измерений газового состава в тропосфере над Югом Западной Сибири // *Оптика атмосф. и океана.* 2013. Т. 26, № 9. С. 773–782.
25. Klonecki A., Pommier M., Clerbaux C., Ancellet G., Cammas J.-P., Coheur P.-F., Cozic A., Diskin G.S., Hadji-Lazaro J., Hauglustaine D.A., Hurtmans D., Khatatov B., Lamarque J.-F., Law K.S., Nédélec P., Paris J.-D., Podolske J.R., Prunet P., Schlager H., Szoopa S., Turquety S. Assimilation of IASI satellite CO fields into a global chemistry transport model for validation against aircraft measurements // *Atmos. Chem. Phys.* 2012. V. 12, N 10. P. 4493–4512.
26. Успенский А.Б., Кухарский А.В., Романов С.В., Рублев А.Н. Мониторинг концентрации диоксида углерода и общего содержания метана в тропосфере над Сибирью по данным спутниковых ИК-зондировщиков AIRS, IASI // *Исслед. Земли из космоса.* 2011. № 1. С. 14–21.
27. Кухарский А.В., Успенский А.Б. Определение средней концентрации диоксида углерода в тропосфере по данным спутникового ИК-зондировщика высокого спектрального разрешения // *Метеорол. и гидрол.* 2009. № 4. С. 15–28.
28. Кухарский А.В., Успенский А.Б. Мониторинг содержания диоксида углерода в тропосфере над бореальными экосистемами Сибири // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса.* 2010. Т. 7, № 4. С. 204–211.
29. Wunch D., Toon G.C., Wennberg P.O., Wofsy S.C., Stephens B.B., Fischer M.L., Uchino O., Abshire J.B., Bernath P., Biraud S.C., Blavier J.-F.L., Boone C., Bowman K.P., Browett E.V., Campos T., Connor B.J., Daube B.C., Deutscher N.M., Diao M., Elkins J.W., Gerbig C., Gottlieb E., Griffith D.W.T., Hurst D.F., Jimenez R., Keppel-Aleks G., Kort E.A., Macatangay R., Machida T., Matsueda H., Moore F., Morino I., Park S., Robinson J., Roehl C.M., Sawa Y., Sherlock V., Sweeney C., Tanaka T., Zondlo M.A. Calibration of the Total Carbon Column Observing Network using aircraft profile data // *Atmos. Measur. Technol.* 2010. V. 3, N 5. P. 1351–1362.
30. Hannigan J.W., Coffey M.T., Goldman A. Semi-Autonomous FTS Observation System for Remote Sensing of

- Stratospheric and Tropospheric Gases // J. Atmos. Ocean Technol. 2009. V. 26. P. 1814–1828.
31. *Morino I., Uchino O., Inoue M., Yoshida Y., Yokota T., Wennberg P.O., Toon G.C., Wunch D., Roehl C.M., Notholt J., Warneke T., Messerschmidt J., Griffith D.W.T., Deutscher N.M., Sherlock V., Connor B., Robinson J., Sussmann R., Rettinger M.* Preliminary validation of column-averaged volume mixing ratios of carbon dioxide and methane retrieved from GOSAT short-wavelength infrared spectra // Atmos. Measur. Technol. 2011. V. 4, N 6. P. 1061–1076.
 32. *Notholt J., Blumenstock T., Brunner D., Buchmann B., Dils B., De Mazière M., Popp Ch., Sussmann R.* Product validation and algorithm selection report (PVASR), ESA Climate Change Initiative (CCI). Final report. 22 August 2012 // URL: <http://www.esa-ghg-cci.org/?q=node/95>
 33. *Cogan A.J., Boesch H., Parker R.J., Feng L., Palmer P.I., Blavier J.-F.L., Deutscher N.M., Macatangay R., Notholt J., Roehl C., Warneke T., Wunch D.* Atmospheric carbon dioxide retrieved from the Greenhouse gases Observing SATellite (GOSAT): Comparison with ground-based TCCON observations and GEOS-Chem model calculations // J. Geophys. Res. Atmos. 2012. V. 117. D21301. 17 p.
 34. *Gribanov K., Jouzel J., Bastrikov V., Bonne J.-L., Breon F.-M., Butzin M., Cattani O., Masson-Delmotte V., Rokotyan N., Werner M., Zakharov V.* Developing a Western Siberia reference site for tropospheric water vapour isotopologue observations obtained by different techniques (*in situ* and remote sensing) // Atmos. Chem. Phys. 2014. V. 14, N 12. P. 5943–5957.
 35. *Keppel-Aleks G., Toon G.C., Wennberg P.O., Deutscher N.M.* Reducing the impact of source brightness fluctuations on spectra obtained by Fourier-transform spectrometry // Appl. Opt. 2007. V. 46, N 21. P. 4774–4779.
 36. *Rodgers C.D.* Inverse Methods for Atmospheric Sounding: Theory and Practice. Singapur: World Scientific Publishing, 2000. 238 p.
 37. *Wunch D., Toon G.C., Blavier J.-F.L., Washenfelder R.A., Notholt J., Connor B.J., Griffith D.W.T., Sherlock V., Wennberg P.O.* The total carbon column observing network // Philosophical Transactions of the Royal Society – Series A // Phys. and Eng. Sci. 2011. V. 369, N 1943. P. 2087–2112.
 38. *Rothman L.S., Gordon I.E., Barbe A., Benner D.C., Bernath P.F., Birk M., Boudon V., Brown L.R., Campargue A., Champion J.P.* The HITRAN 2008 molecular spectroscopic database // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer. 2009. V. 110, N 9–10. P. 533–572.
 39. *Kalnay E., Kanamitsu M., Kistler R., Collins W., Deaven D., Gandin L., Iredell M., Saha S., White G., Woolen J., Zhu Y., Leetmaa A., Reynolds R.* The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project // Bull. Amer. Meteorol. Soc. 1996. V. 77, N 3. P. 437–471.

N.V. Rokotyan, R. Imasu, V.I. Zakharov, K.G. Gribanov, M.Yu. Khamaturova. **The amplitude of the CO₂ seasonal cycle in the atmosphere of Ural by ground-based and satellite remote sensing techniques.**

The series of ground-based high resolution Fourier-transform measurements of atmospheric transmittance in near infrared region (4000–10000 cm⁻¹) recorded at the Ural Atmospheric Station in 2012–2013 was processed in order to retrieve relative concentrations of CO₂ and CH₄ in atmospheric column. Retrieved values of methane concentration do not show a noticeable seasonal cycle, while retrieved CO₂ concentrations show clear seasonal variations with high amplitude, which are also observed in GOSAT measurements over Ural region. The estimated amplitude of CO₂ seasonal variations is 14–15 ppm. Intercomparison between ground-based and GOSAT measurements of CO₂ shows a good agreement, while satellite values are overestimated by approximately 3 ppm. There is no noticeable correlation between CH₄ values, which one can explain by presence of local methane sources in the area of GOSAT observations.