

А.А. Лагутин, Е.Ю. Мордвин, И.А. Шмаков

Содержание метана в тропосфере Западной Сибири по данным AIRS/Aqua*

A.A. Lagutin, E.Y. Mordvin, I.A. Shmakov

Tropospheric Methane in the West Siberia Derived from AIRS/Aqua

Представлены результаты восстановления отношения смеси метана в тропосфере Западной Сибири, полученные по данным зондирующего комплекса AIRS/Aqua. Установлено, что в каждом годовом цикле для рассмотренного в работе девятилетнего периода (2003–2011 гг.) содержание метана имеет не только зимний (январь–февраль) максимум, характерный для фоновых территорий, но и летний (июль–август) пик.

Ключевые слова: метан, тропосфера, Западная Сибирь, AIRS.

The results of retrieval of the methane mixing ratios in the troposphere of the West Siberia by the AIRS/Aqua sounding suite are presented. We've found that each yearly cycle belonging to the 2003–2011 period studied the methane contents has not only the winter (January to February) maximum usual for the background territories, but also a summer (July to August) peak.

Key words: methane, troposphere, West Siberia, AIRS.

1. Введение. Атмосферный метан — второй по важности долгоживущий парниковый газ. Он влияет на химический состав атмосферы и радиационный баланс Земли. Его вклад в радиационный форсинг составляет около 18% [1].

Концентрация метана в тропосфере определяется, главным образом, соотношением между количеством метана, поступающим в атмосферу с подстилающей поверхности (источниками), и содержанием в ней радикалов ОН (стоком). Сегодня известно, что реакции CH_4 с ОН, в которых образуется CH_3 и вода, удаляют почти 90% метана из тропосферы [1]. Другими стоками метана являются почва, реакции с хлором в пограничном слое атмосферы прибрежных зон океана и стратосфера.

За последние 200 лет концентрация метана в приземном слое атмосферы увеличилась почти в 2.5 раза и достигла к 2009 г. уровня 1794 млрд^{-1} [2]. В XX в. рост метана составил 1000 млрд^{-1} [3].

В течение двух последних десятилетий характерными особенностями поведения метана в атмосфере считаются отрицательный тренд скорости его роста при значительных вариациях в годовом ходе и достижение стационарного состояния в 1999–2006 гг. [4–6], а также новый рост в 2007–2009 гг. [5, 7, 8].

Многочисленные экспериментальные исследования и расчеты с использованием моделей разного уровня сложности позволили сформулировать

сценарии, в рамках которых возможно уменьшение скорости роста метана в последнем десятилетии прошлого века. Они включают уменьшение эмиссии из болотных комплексов и рисовых полей, из антропогенных источников на территории Восточной Европы и СССР в конце 1980-х и начале 1990-х, а также изменение содержания радикалов ОН в атмосфере (см., например: [6, 8–14], а также последние обзоры [2, 15]).

Новый рост концентрации в 2007–2008 гг. связывают с ростом эмиссии метана из болотных комплексов высоких широт ($> 50^\circ$ с.ш.) Северного полушария (из-за аномально высокой температуры в этой зоне в 2007 г.) и тропических болот (вследствие аномально высоких осадков в 2008 г.) [5, 8, 16].

Несмотря на большой объем выполненных исследований, полного понимания «метанового цикла» не достигнуто. Большая неопределенность существует в оценках вкладов различных типов источников на глобальном и региональном уровнях, их временной эволюции. Так, например, в [1] для вклада болотных комплексов — самого большого природного источника метана — даются оценки (100–231) Тг/год. Для Западной Сибири диапазон полученных оценок еще больше: от 1.6 до 20 Тг/год (см., например: [17]).

Главными причинами этой неопределенности является редкая сеть наблюдательных пунктов, пространственно-временная неоднородность потоков от многих природных и антропогенных источников, а также недостаточно широкое использование данных спутниковых приборов.

*Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (проект №11-07-12048), грантов Минобрнауки РФ и Интеграционного проекта СО РАН.

В статье исследуется поведение содержания метана в тропосфере Западной Сибири. Информационной базой работы являются данные зондирующего комплекса AIRS [18], установленного на спутнике Aqua [19]. Выбор этого комплекса в качестве основного источника информации обусловлен стабильностью параметров приборов комплекса в течение всего срока (2002–2011 гг.) работы спутника на орбите, имеющейся у авторов возможностью принимать в Центре космического мониторинга Алтайского госуниверситета передаваемый со спутника весь поток данных и проводить их обработку до уровня 2 [20], а также «всепогодностью» комплекса.

2. Зондирующий комплекс AIRS.

Зондирующий комплекс AIRS (Atmospheric InfraRed Sounder) на платформе Aqua сегодня включает четыре прибора: 2378-канальный ИК-зондировщик AIRS, 4-канальный спектро-радиометр AIRS/VisNIR, а также 13-канальный микроволновой радиометр AMSU-A1 и 2-канальный AMSU-A2. Данные этих приборов выделяются авторами из «сырого потока» Aqua, передаваемого со спутника по каналу прямого вещания и принимаемого в реальном времени станций Центра космического мониторинга Алтайского госуниверситета.

ИК-зондировщик AIRS [21] является центральным прибором комплекса. Гипер-спектрометр регистрирует интенсивность уходящего теплового излучения в диапазонах 3.74...4.61 мкм ($2169...2674\text{ см}^{-1}$), 6.20...8.22 мкм ($1217...1613\text{ см}^{-1}$), 8.8...15.4 мкм ($649...1136\text{ см}^{-1}$) с высоким спектральным разрешением $(\lambda/\Delta\lambda)\sim 1200$. Эти спектральные диапазоны включают важные для восстановления параметров атмосферы зоны поглощения углекислого газа (4.3 и 15 мкм), водяного пара (6.3 мкм), метана (7.6 мкм) и озона (9.6 мкм).

Использование данных микроволновых радиометров, обладающих низкой чувствительностью к основной части присутствующих в атмосфере облачных структур, при обработке показаний ИК-зондировщика AIRS высокого спектрального разрешения позволяет зондирующему комплексу AIRS осуществлять восстановление вертикальных профилей атмосферы даже при почти 90% закрытии зоны наблюдения облаками [22].

Реализованная в этих приборах технология измерений базировалась на идее [23] о возможности восстановления профиля температуры по структуре спектра уходящего теплового излучения. Физической основой этой технологии, которая считается основной и сегодня при измерениях в надирной геометрии, является тот факт, что генерация уходящего из атмосферы ИК-излучения в участках полос поглощения — излучения атмосферных газов с различной оптической плотностью осу-

ществляется различными слоями атмосферы. Это в свою очередь означает, что спектральное сканирование внутри конкретных полос поглощения газа на верхней границе атмосферы эквивалентно сканированию атмосферы в определенном диапазоне высот.

3. Пакеты обработки данных комплекса AIRS. Основой программных комплексов, использованных в работе при восстановлении характеристик атмосферы и подстилающей поверхности Земли по данным AIRS, является вычислительный пакет AIRS/AMSU. Он создан на базе операционного комплекса NASA версии 5.0.14.0 научной группой AIRS. Пакет, имеющий версию 5.2.1.0, получен Центром космического мониторинга Алтайского госуниверситета (лицензия GSFC/NASA) в Инженерно-космическом центре Висконсинского университета (Space Science and Engineering Center, University of Wisconsin-Madison, Madison WI).

Необходимая для работы пакета входная информация — данные приборов в формате PDS (Production Data Set). PDS-файл создается в Центре после распаковки принятого полного «сырого» потока Aqua и выделения с использованием пакета RT-STPS измерений каждого прибора зондирующего комплекса.

Пакет AIRS/AMSU v.5.2.1.0, состоящий из нескольких PGE (Product Generation Executive), осуществляет обработку этих данных до уровня 1B (геолоцированные калиброванные интенсивности) и затем до уровня 2 (восстановленные геофизические параметры).

Ключевым элементом алгоритма [22, 24], реализованного в вычислительном пакете, является процедура исключения из показаний ИК-зондировщика AIRS вклада облаков. После проведения этой «облачной» коррекции показания AIRS соответствуют той части сцены, для которой облачный покров отсутствует. Именно эти интенсивности используются на всех этапах решения обратной задачи восстановления геофизических параметров системы (см.: [22, 24]).

Восстановление характеристик атмосферы и подстилающей поверхности проводится в следующей последовательности:

- а) температура, коэффициенты излучения и отражения подстилающей поверхности;
- б) температурный профиль атмосферы;
- в) профиль влажности атмосферы;
- г) вертикальный профиль озона;
- д) вертикальный профиль CO;
- е) вертикальный профиль метана;
- ж) параметры облаков.

Решение возникающей на этом этапе нелинейной некорректной задачи находят с применением итерационного алгоритма [24].

В результате обработки данных зондирующего комплекса AIRS пакетом AIRS/AMSU v.5.2.1.0 создаются HDF-файлы, идентичные операционным продуктам GSFC/NASA [25]. Параметры атмосферы и подстилающей поверхности — продукты уровня 2 — представлены в файлах вида AIRS.2011.11.30.202.L2.RetStd.v5.2.1.0.D11335112-835.hdf и AIRS.2011.11.30.202.L2.RetSup.v5.2.1.0.-D11335112835.hdf.

Первый файл содержит стандартные продукты, второй, в дополнение к стандартным, включает также и исследовательские продукты.

Для проверки правильности функционирования всей технологической цепочки «прием данных — распаковка — геокодирование — калибровка — обработка данных до уровня 2» были проведены сопоставления данных пакета AIRS/AMSU с результатами операционного алгоритма GSFC/NASA. Анализ показал, что получаемые авторами результаты практически совпадают с данными GSFC/NASA (см. также: [20]).

4. Метан в верхней тропосфере. В зоне линий поглощения метана около 7.66 мкм расположено примерно 200 каналов AIRS. Данные 71 канала применяются для восстановления профиля метана [26]. На этом этапе обработки используются также определенные ранее по измерениям других каналов AIRS профили температуры и влажности, температура и коэффициенты излучения подстилающей поверхности.

В силу того, что в диапазоне 7.66 мкм находятся и линии водяного пара, высотное положение слоя максимальной чувствительности зондирующего комплекса AIRS к метану зависит от географической зоны наблюдения и сезона. В [27] установлено, что в Северном полушарии для средних широт зона максимальной чувствительности находится на 50–250 гПа ниже уровня тропопаузы $P_{\text{тр}}$. Дальнейшие исследования показали [28], что более точно границы слоя максимальной чувствительности AIRS можно задать как $500/\sqrt{P_{\text{тр}}}$ и $2500/\sqrt{P_{\text{тр}}}$, т.е. верхний уровень этого слоя $P_{\text{тр}} + 500/\sqrt{P_{\text{тр}}}$, а нижний — $P_{\text{тр}} + 2500/\sqrt{P_{\text{тр}}}$. Количество метана именно в этом диапазоне давлений используется в работе для количественной оценки содержания CH_4 в свободной тропосфере.

Переход от восстановленного количества молекул метана в столбе слоя N (молекул/см²) (продукт CH_4CDSup в L2.RetStd.v5.2.1.0.) к отношению смеси N (млрд⁻¹) осуществлялся следующим равенством

$$N(\text{млрд}^{-1}) = k \cdot T \cdot N(\text{молекул/см}^2) / (P \cdot \Delta H), \quad (1)$$

где k — постоянная Больцмана; T — средняя тем-

пература слоя; P — среднее давление воздуха в слое; ΔH — толщина слоя. Последняя величина находилась согласно барометрическому закону.

5. Результаты и выводы. На данном этапе исследований восстановление отношения смеси метана проведено для 2003–2011 гг. в двух зонах Западной Сибири. Координаты первой зоны — (55–65° с.ш., 60–90° в.д.), второй — (45–55° с.ш., 60–90° в.д.). Эти зоны покрывают практически все болотные комплексы региона [17].

Для 2007–2011 гг. информационной основой были данные зондирующего комплекса, получаемые Центром космического мониторинга Алтайского госуниверситета 2–3 раза в сутки в режиме реального времени. Данные для 2003–2006 гг. были получены с сайта [25]. Обработка всех данных проводилась с использованием одного вычислительного пакета. Некоторые результаты приведены на рисунках 1–3.

Рисунок 1 демонстрирует поведение отношения смеси метана в слое максимальной чувствительности для всего рассматриваемого девятилетнего периода — 2003–2011 гг. Точки на рисунке показывают усредненные по зоне значения содержания метана в тропосфере для каждого прохода спутника, покрывающего зону, а линия — скользящее среднее за 14 дней.

Нетрудно увидеть, что в каждом годовом цикле содержание метана имеет не только зимний (январь–февраль) максимум, характерный для фоновых территорий [2], но и летний (июль–август) пик.

Следует отметить, что впервые такой характер поведения отношения смеси метана в тропосфере установлен в [29]. Вывод о присутствии летнего максимума в годовом ходе метана в приземном слое атмосферы Западной Сибири недавно сделан в [30].

Полученные данные также показывают, что в 2003–2006 гг. содержание CH_4 в тропосфере практически не менялось. Установленный для этого периода тренд примерно равен -1 млрд⁻¹/год. Некоторое повышение в 2003 г. могло быть вызвано пожарами в средних широтах Северного полушария [8].

Новый рост концентрации метана в тропосфере происходил в 2007–2009 гг. В этот период содержание метана в тропосфере увеличилось на ~ 15 млрд⁻¹. С 1 января 2007 г. по 1 января 2008 г. отношение смеси метана в рассматриваемых зонах 1 и 2 увеличилось на 3.4 и 4.6 млрд⁻¹ соответственно.

В 2009–2011 гг. содержание метана в тропосфере Западной Сибири снова уменьшилось. Изменение содержания метана особенно большое в первой зоне.

Аномалии отношения смеси метана показаны на рисунке 2. Они получены путем вычитания

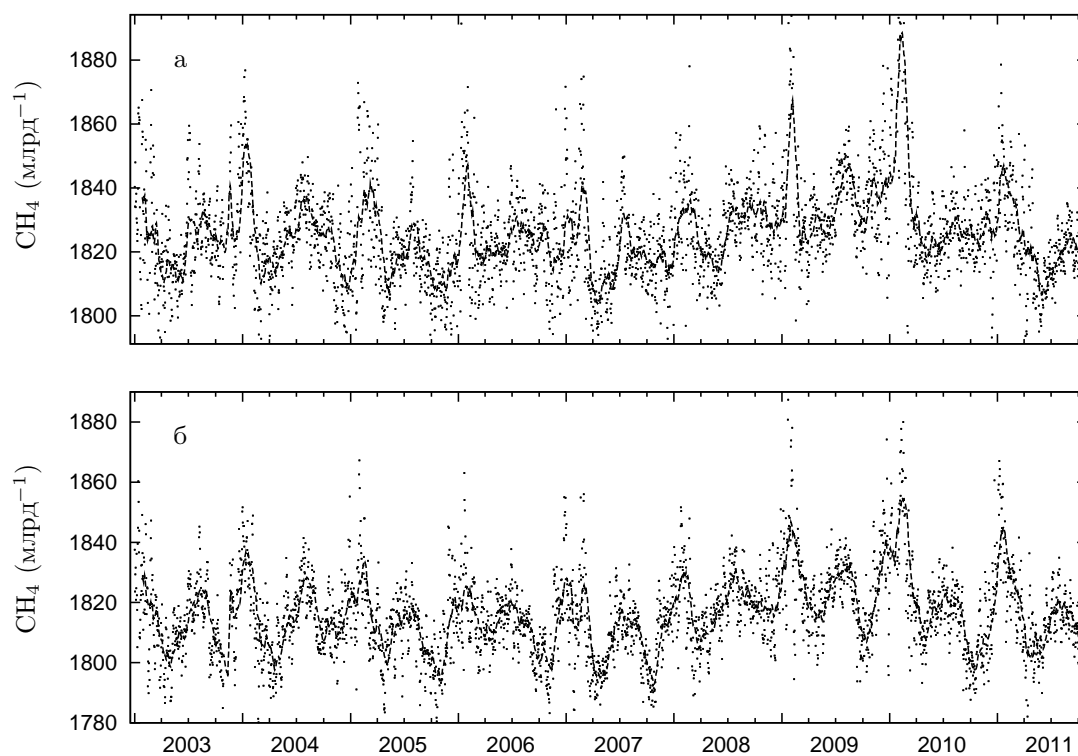


Рис. 1. Годовой ход и межгодовая изменчивость отношения смеси метана в тропосфере Западной Сибири для зон 1 (а) и 2 (б)

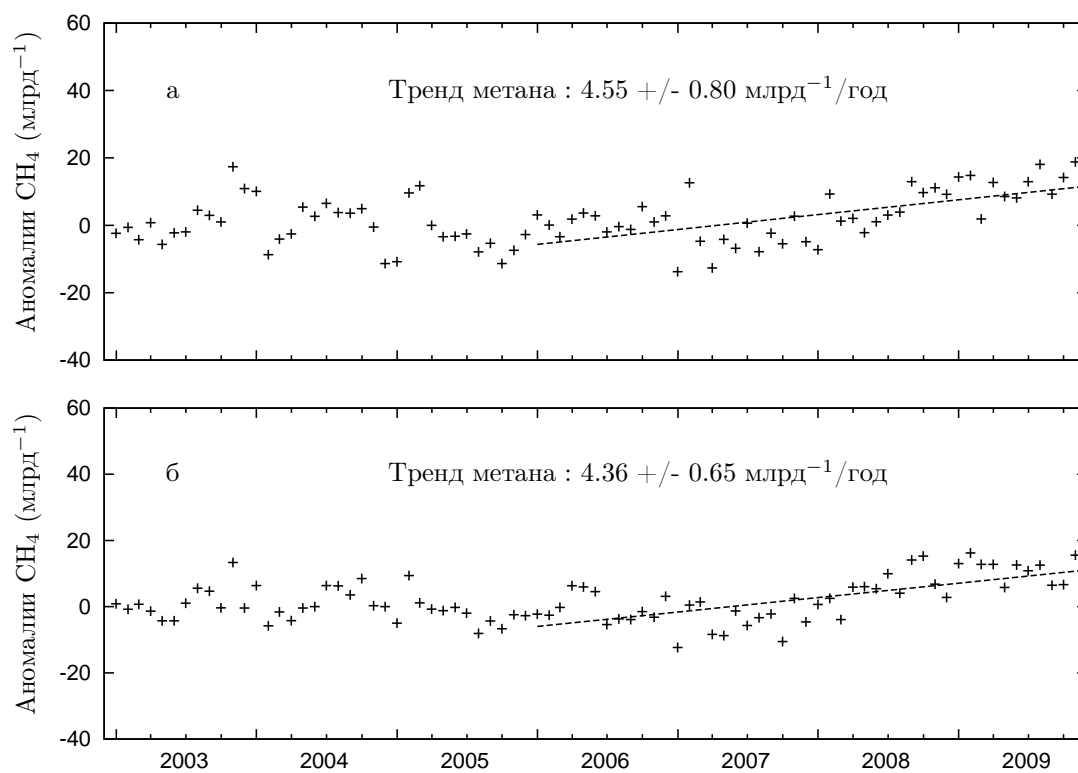


Рис. 2. Аномалии отношения смеси метана для зон 1 (а) и 2 (б) и тренды в 2006–2009 гг.

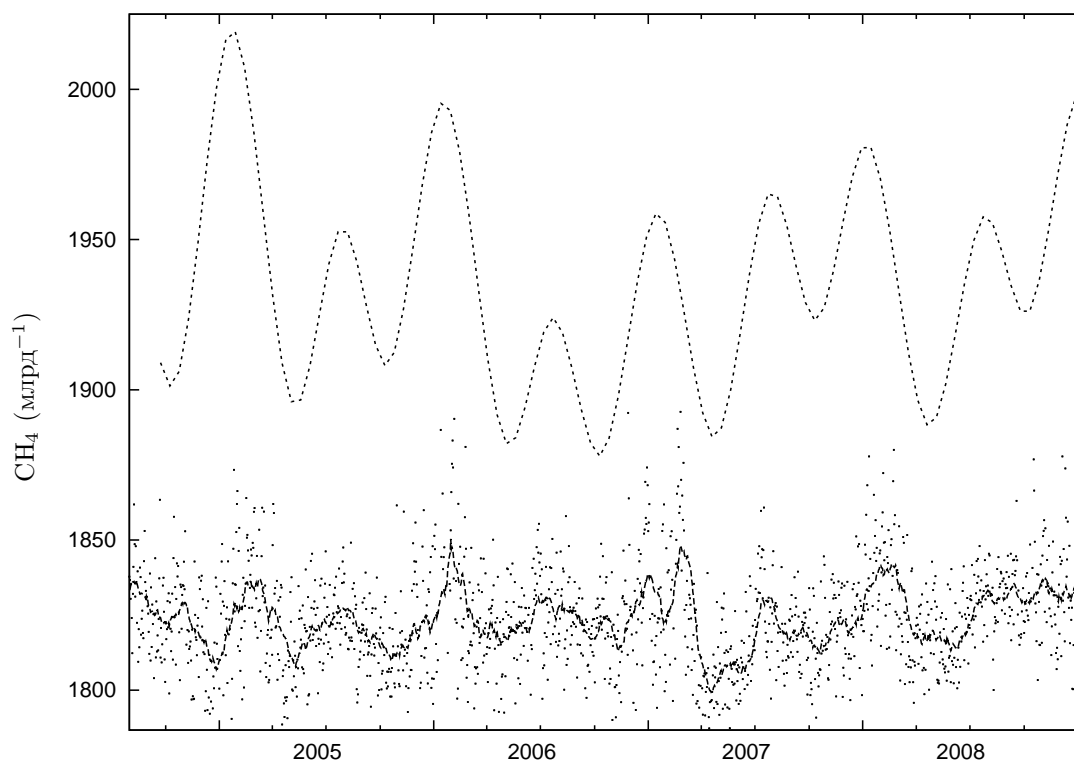


Рис. 3. Годовой ход и межгодовая изменчивость отношения смеси метана в районе расположения наблюдательного пункта Карасевое ($58^{\circ}14'$ с.ш., $82^{\circ}24'$ в.д.). Пунктирная линия — содержание метана в приземном слое по [30], точки и сплошная линия — данные настоящей работы для тропосферы для области ($3 \times 3^{\circ}$) с центром в пункте Карасевое.

среднемесячных значений для 2003–2006 гг. из данных для 2003–2009 гг. Значения трендов представлены на рисунке 2.

На рисунке 3 результаты настоящей работы для тропосферы сопоставляются с наземными данными [30], полученными в наблюдательном пункте Карасевое ($58^{\circ}14'$ с.ш., $82^{\circ}24'$ в.д.). Видно, что летом период роста метана в тропосфере практически совпадает или даже несколько опережает период увеличения содержания метана в наземном пункте.

Полученные в работе результаты позволяют сделать следующие выводы.

1. В каждом годовом цикле для рассмотренного в работе девятилетнего периода (2003–2011 гг.) отношение смеси метана имеет зимний (январь–февраль) и летний (июль–август) максимумы.
2. Положительный тренд установлен лишь для 2006–2009 гг. В зоне 1 величина тренда составляет 4.55 ± 0.8 млрд $^{-1}$ /год, в зоне 2 — 4.36 ± 0.65 млрд $^{-1}$ /год.

Библиографический список

1. IPCC. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of working group I to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change / Solomon S., Qin D., Manning M. et al. (eds). New York, 2007.
2. Dlugokencky E.J., Nisbet E.G., Fisher R., Lowry D. Global atmospheric methane: budget, changes and dangers // Phil. Trans. R. Soc. A. — 2011. — V. 369.
3. Ferretti D.F., Miller J.B., White J.W.C. et al. Unexpected changes to the global methane budget over the past 2000 years // Science. — 2005. — V. 309.
4. Dlugokencky E.J., Steele L.P., Lang P.M. et al. The growth rate and distribution of atmospheric methane // J. Geophys. Res. — 1994. — V. 99 (D8).
5. Dlugokencky E.J., Bruhwiler L., White J.W.C. et al. Observational constraints

- on recent increases in the atmospheric CH₄ burden // *Geophys. Res. Lett.* — 2009. — V. 36.
6. Dlugokencky E.J., Masarie K.A., Lang P.M., Tans P.P. Continuing decline in the growth rate of the atmospheric methane burden // *Nature*. — 1998. — V. 393.
7. Rigby M., Prinn R.G., Fraser P.J. et al. Renewed growth of atmospheric methane // *Geophys. Res. Lett.* — 2008. — V. 35.
8. Bousquet P., Ringeval B., Pison I. et al. Source attribution of the changes in atmospheric methane for 2006–2008 // *Atmos. Chem. Phys.* — 2011. — V. 11.
9. Monteil G., Houweling S., Dlugokencky E.J. Interpreting methane variations in the past two decades using measurements of CH₄ mixing ratio and isotopic composition // *Atmos. Chem. Phys.* — 2011. — V. 11.
10. Kai F.M., Tyler S.C., Randerson J.T., Blake D.R. Reduced methane growth rate explained by decreased Northern Hemisphere microbial sources // *Nature*. — 2011. — V. 476.
11. Worthy D.E.J., Chan E., Ishizawa M. et al. Decreasing anthropogenic methane emissions in Europe and Siberia inferred from continuous carbon dioxide and methane observations at Alert, Canada // *J. Geophys. Res.* — 2009. — V. 114.
12. Bousquet P., Ciais P., Miller J.B. et al. Contribution of anthropogenic and natural sources to atmospheric methane variability // *Nature*. — 2006. — V. 443.
13. Li C., Qiu J., Frohling S. et al. Reduced methane emissions from large-scale changes in water management of China's rice paddies during 1980–2000 // *Geophys. Res. Lett.* — 2002. — V. 29.
14. Fiore A.M., Horowitz L.W., Dlugokencky E.J. et al. Impact of meteorology and emissions on methane trends, 1990–2004 // *Geophys. Res. Lett.* — 2006. — V. 33.
15. O'Connor F.M., Boucher O., Gedney N. et al. Possible role of wetland, permafrost and methane hydrates in the methane cycle under future climate change: A review // *Rev. Geophysics*. — 2010. — V. 48.
16. Fisher R.E., Sriskantharajah S., Lowry D. et al. Arctic methane sources: Isotopic evidence for atmospheric inputs // *Geophys. Res. Lett.* — 2011. — V. 38.
17. Глаголев М.В., Сирий А.А., Лапшина Е.Д., Филиппов И.В. Изучение потоков углеродсодержащих парниковых газов в болотных экосистемах Западной Сибири // *Вестник ТГПУ*. — 2010. — №3 (93).
18. Aumann H.H., Chahine M.T., Gautier C. et al. AIRS/AMSU/HSB on the Aqua mission: Design, science objectives, data products, and processing systems // *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* — 2003. — V. 41, No. 2.
19. Parkinson C.L. Aqua: An Earth-Observing Satellite mission to examine water and other climate variables // *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* — 2003. — V. 41, No. 2.
20. Лягутин А.А., Никулин Ю.А., Лягутин Ал.А. и др. Математические технологии оперативного регионального спутникового мониторинга характеристик атмосферы и подстилающей поверхности. Ч.: 2. AIRS // *Вычислительные технологии*. — 2007. — Т. 12, №5.
21. Pagano T.S., Aumann H.H., Hagan D.E., Overoye K. Prelaunch and in-flight radiometric calibration of the Atmospheric Infrared Sounder (AIRS) // *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* — 2003. — V. 41, No. 2.
22. Susskind J., Blaisdell J.M., Iredell L. et al. Improved temperature sounding and quality control methodology using AIRS/AMSU data: The AIRS science team version 5 retrieval algorithm // *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* — 2011. — V. 49, No. 3.
23. Kaplan L.D. Inference of atmospheric structures from satellite remote radiation measurements // *J. Opt. Soc. Amer.* — 1959. — V. 49.
24. Susskind J., Barnet C.D., Blaisdell J.M. Retrieval of atmospheric and surface parameters from AIRS/AMSU/HSB data in the presence of clouds // *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* — 2003. — V. 41, No. 2.
25. NASA AIRS data FTP [Электронный ресурс]. — 2011. — URL: <ftp://airspar1u.ecs.nasa.gov>
26. Xiong X., Barnet C., Maddy E. et al. Characterization and validation of methane products from the Atmospheric Infrared Sounder (AIRS) // *J. Geophys. Res.* — 2008. — V. 113.
27. Xiong X., Barnet C., Wei J. et al. Information-based mid-upper tropospheric methane derived from Atmospheric Infrared Sounder (AIRS) and its validation // *Atmos. Chem. Phys. Discuss.* — 2009. — V. 9.
28. Xiong X., Barnet C., Maddy E. et al. Seven years' observation of mid-upper tropospheric methane from Atmospheric Infrared Sounder // *Remote Sens.* — 2010. — V. 2.
29. Xiong X., Barnet C., Zhuang Q. et al. Mid-upper tropospheric methane in the high Northern Hemisphere: Spaceborne observations by AIRS, aircraft measurements, and model simulations // *J. Geophys. Res.* — 2010. — V. 115.
30. Sasakawa M., Shimoyama K., Machida T. et al. Continuous measurements of methane from a tower network over Siberia // *Tellus*. — 2010. — V. 62B.