

Мониторинг содержания диоксида углерода в тропосфере над бореальными экосистемами Сибири

А.В. Кухарский, А.Б. Успенский

ГУ НИЦ космической гидрометеорологии «Планета», Москва
e-mail: uspensky@planet.iitp.ru

В связи с недостаточностью наземной сети наблюдений за концентрацией и потоками атмосферного диоксида углерода (CO_2) исследованы возможности дистанционного определения концентрации CO_2 в атмосфере по данным спутниковых измерений ИК-зондировщика высокого спектрального разрешения AIRS (спутник EOS-Aqua). На основе анализа информативности спутниковых данных отобрано подмножество наиболее чувствительных каналов по отношению к вариациям концентрации CO_2 в длинноволновой и коротковолновой частях измеряемого спектра. Предложен и испытан метод восстановления по данным AIRS усредненного по высоте (в средней и верхней тропосфере) отношения смеси диоксида углерода X_{CO_2} , базирующийся на численном решении обратной задачи. Сравнение спутниковых оценок X_{CO_2} осредненных за месяц, с данными самолетных наблюдений над районами бореальных лесов (Новосибирская обл.) и экосистем (район Сургута) для 10 месяцев 2003 г. подтверждает возможность отслеживать сезонный ход X_{CO_2} с погрешностью 1-2 %. С помощью средств Интернет сформирован массив данных AIRS и необходимой дополнительной информации для обширного района экосистем Сибири и периода июль 2003г. и с помощью предложенного метода построена карта распределения X_{CO_2} для указанного района.

Ключевые слова: атмосферный диоксид углерода, ИК-зондировщик, AIRS, отношение смеси, обратная задача, радиационная модель.

Введение

Современная наземная сеть наблюдений за концентрацией и потоками диоксида углерода (CO_2) включает немногим более 100 станций и не обеспечивает глобальный мониторинг распределения атмосферного CO_2 с требуемым пространственным и временным разрешением (особенно, над океанами, зонами бореальных лесов). Измерения концентрации CO_2 на различных высотах (в диапазоне 500 м – 10 км) производимые с самолетов над конкретными регионами, см., напр., [1], являются эпизодическими и не могут существенно дополнить наземную сеть. Добиться радикального улучшения пространственного и временного разрешения глобальных данных о концентрации, источниках/стоках атмосферного CO_2 можно только путем развития дистанционных спутниковых методов измерений искомым характеристикам. При этом спутниковые оценки концентрации CO_2 должны быть достаточно точными, а именно относительная среднеквадратичная ошибка (СКО) оценивания усредненного по атмосферному слою отношения смеси диоксида углерода X_{CO_2} , должна составлять около 1% или порядка 3-4 млн.⁻¹ и быть сравнима со скоростью его ежегодного возрастания (около 1.5 млн.⁻¹/год).

К настоящему времени теоретически и экспериментально проработаны возможности дистанционного определения со спутников параметров вертикального распределения концентрации CO_2 в тропосфере и нижней стратосфере по данным измерений:

- уходящего теплового (ИК) излучения с помощью ИК-зондировщиков высокого спектрального разрешения типа AIRS/EOS Aqua, IASI/MetOp [3, 4];
- уходящего излучения в ближнем ИК диапазоне спектра (БИК) с помощью зондировщика атмосферных газов Sciamachy/Envisat [5].

Показано, в частности, что

- для оценки средней по высоте концентрации CO_2 в слое 700-200 гПа с точностью порядка 1% можно использовать данные AIRS или IASI/MetOp, совмещенные с данными измерений спутникового микроволнового зондировщика типа AMSU-A, причем исходные данные AIRS, IASI (только «безоблачные») должны быть усреднены по площади $500 \times 500 \text{ км}^2$ и за временной промежуток порядка 2 недель (для улучшения отношения «сигнал/шум»).

Цель настоящего исследования – доработка предложенного ранее в [6] метода «обращения» данных AIRS для восстановления усредненного по высоте и за месячный период отношения смеси атмосферного диоксида углерода X_{CO_2} , а также анализ его пригодности для спутникового мониторинга X_{CO_2} над обширными районами бореальных лесов и экосистем Сибири.

Аппаратура AIRS (Atmospheric InfraRed Sounder) или атмосферный ИК-зондировщик на борту спутника EOS/Aqua (НАСА, США, запущен в 2002 г.) представляет собой диффракционный спектрометр, измеряющий уходящее тепловое излучение на верхней границе атмосферы в диапазоне 3.7-15.4 мкм или $650\text{-}2675 \text{ см}^{-1}$ при переходе от длин волн λ к волновым числам ν (2378 каналов с разрешением $\Delta\nu$ от 0.6 до 2.0 см^{-1}) и поперечным режимом сканирования; в каждой строке сканирования 90 пикселей (уровень L1), линейный размер пикселя для измерений в надир – 13.5 км, см., напр. [4]. В состав полезной нагрузки EOS/Aqua включен, наряду с AIRS, микроволновой зондировщик AMSU-A, причем каждый пиксел AMSU-A покрывается блоком 3×3 пикселей AIRS. Функционирование AMSU-A обеспечивает получение независимых от данных AIRS оценок вертикального профиля температуры $T(p)$ (где p – давление) в пункте зондирования.

В разделе 2 статьи дано краткое описание предлагаемого метода интерпретации или «обращения» данных AIRS для получения оценок X_{CO_2} , а также обсуждаются результаты валидации оценок X_{CO_2} , полученных в экспериментах по «обращению» реальных данных AIRS для двух районов Западной Сибири и 10 месяцев 2003 г. В разделе 3 рассмотрено применение метода для построения карты распределения величин X_{CO_2} над Сибирью.

Метод анализа данных AIRS и результаты валидации спутниковых оценок

Достаточно детальное описание предлагаемого метода анализа («обращения») данных для получения X_{CO_2} вместе с результатами валидации спутниковых оценок представлены в [6, 7]. В данном разделе приведем краткое описание основных процедур предложенного метода, а также остановимся на результатах валидации спутниковых оценок для двух районов Западной Сибири.

Как известно [3, 4, 6, 7], основные трудности и ограничения детектирования вариаций CO_2 по данным спутниковых ИК-зондировщиков высокого спектрального разрешения состоят в следующем:

1. Мониторинг концентрации CO_2 в атмосфере (оценки X_{CO_2} или профиля отношения смеси $Q(p)$) по данным ИК-зондировщиков типа AIRS, IASI затруднен тем, что измерения, чувствительные к вариациям CO_2 , также чувствительны к вариациям вертикального профиля температуры $T(p)$ и наличию облачности в поле зрения прибора – главным мешающим факторам.

2. Весовые функции в уравнении радиационного переноса для CO_2 – чувствительных каналов (якобианы излучения по $Q(p)$) «приподняты», их максимумы находятся в слое 200-350 гПа, что объясняет малую чувствительность сигнала в этих каналах к вариациям CO_2 в нижней тропосфере;

3. Малая чувствительность измерений по отношению к вариациям профиля $Q(p)$ позволяет дистанционно оценивать с приемлемой точностью только интегральные характеристики, например, усредненное по высоте отношение смеси X_{CO_2} .

Для дистанционного определения X_{CO_2} или $Q(p)$ по данным измерений ИК-зондировщиков возможны 2 подхода: - восстановление «полного» вектора состояния x ;

- восстановление X_{CO_2} или $Q(p)$ с использованием априорной информации о $T(p)$ и других м. ф. Недостатком первого подхода является алгоритмическая сложность и вычислительная трудоемкость; кроме того, требуется дополнительная информация для выделения в сигнале вариаций, связанных с вариациями X_{CO_2} . Второй подход включает процедуры, более простые алгоритмически и менее трудоемкие.

При разработке метода «обращения» данных AIRS за основу был принят второй подход. В результате анализа информативности данных AIRS отобрано подмножество из 15 CO_2 – чувствительных каналов, включая 9 длинноволновых (ДВ) каналов в спектральном диапазоне 699-705 cm^{-1} и 6 коротковолновых (КВ) каналов в диапазоне 1939-2107 cm^{-1} , см. [6, 8]. Измерения в этих каналах использованы для получения оценок X_{CO_2} . Как уже отмечено выше, максимумы весовых функций (CO_2 - якобианов) находятся в слое 200-350 гПа, что ограничивает возможность получения оценок X_{CO_2} в нижней и средней тропосфере.

Предложенный метод «обращения» данных AIRS и восстановления X_{CO_2} и базируется на численном решении обратной задачи и включает следующие этапы [6]:

- Отбираются измерения AIRS в CO_2 – каналах, не «искаженные» облачностью, или измерения, приведенные к условиям отсутствия облачности (уровня L2 – cloud cleared radiances).
- Для фиксированных временных промежутков Δt рассчитываются средние систематические смещения $\delta(\alpha) = \langle T_B^{obs}(\alpha) - T_B^{calc}(\alpha) \rangle$, $\alpha = 1, \dots, n$, где $\langle \dots \rangle$ означает осреднение по выборке за время Δt ; величины $\delta(\alpha)$ затем используются для коррекции $T_B^{calc}(\alpha)$ в процедуре численного решения обратной задачи.
- Расчет модельных радиационных температур T_B^{calc} производится с помощью быстрой радиационной модели SARTA, причем в качестве одной из компонент референсного вектора состояния x_0 в пункте зондирования берется профиль $T(p)$, восстановленный по данным микроволнового радиометра AMSU-A; в качестве других компонент берутся результаты тематической обработки данных AIRS в пункте зондирования (продукты AIRS уровня L2), а также референсный профиль отношения смеси CO_2 , равный X_{CO_2} .
- Обратная задача относительно X_{CO_2} решается численно с использованием итерационного алгоритма Гаусса-Ньютона, причем строятся 2 независимые оценки X_{CO_2} (ДВ) и X_{CO_2} (КВ) – по данным AIRS в подмножествах ДВ и КВ CO_2 - каналов соответственно.
- Выборки (кластеры) оценок $\{X_{\text{CO}_2}(\text{ДВ})\}$ и $\{X_{\text{CO}_2}(\text{КВ})\}$, полученных для временного промежутка Δt и области зондирования, подвергаются пространственно-временной фильтрации; затем на основе результирующих оценок X_{CO_2} (ДВ) и X_{CO_2} (КВ) строится средневзвешенная оценка X_{CO_2} величины X_{CO_2} . Типичные линейные размеры зондируемого региона составляют 100-250 км, период временного осреднения – от 2-х недель до одного месяца.

Следует отметить, что в отличие от [4, 9], предложенный метод применяется для анализа данных AIRS над сушей (а не над водной поверхностью).

Кратко об использовании модели SARTA [10]. Комплекс быстрых радиационных расчетов SARTA – Stand alone AIRS Radiative Transfer Algorithm обеспечивает моделирование измеряемых спектров уходящего излучения R по заданному вектору состояния x : $R = H(x)$, где H – оператор прямой задачи. Комплекс SARTA позволяет также вычислить матрицу якобианов (вариационных производных R по x). Вектор x содержит профили температуры, влажности, озона $T(p)$, $q(p)$, $q_{O_3}(p)$ и профили CO_2 , CO , CH_4 , заданные на сетке давлений (100 уровней в слое 1050-0.1 гПа), а также температуру и излучательную способность поверхности, приземные температуру и влажность. Всего в модели SARTA используются пять переменных газовых компонент: H_2O , O_3 , CO , CH_4 , CO_2 . Программный комплекс SARTA был модифицирован в части формирования векторов x и адаптирован для работы под ОС WINDOWS.

Остановимся теперь на результатах валидации спутниковых оценок X_{CO_2} . Для оценки эффективности предложенного метода и валидации результатов восстановления X_{CO_2} выполнена серия экспериментов с реальными данными AIRS (более 500 гранул за период январь-октябрь 2003 г.). В качестве «истинных» значений X_{CO_2} использованы результаты самолетных in-situ измерений CO_2 , выполненных в рамках Японско-Российского проекта по изучению парниковых газов для Сибирских экосистем. Район полетов – окрестность Обского водохранилища $54^{\circ}08' - 54^{\circ}33'$ с.ш., $81^{\circ} 51' - 82^{\circ}40'$ в.д., почти 90% занимают хвойные леса. Измерения проводились на высотах 0.5, 1, 1.5, 2, 3, 4, 5.5 и 7 км (доступны данные на 1, 3 и 7 км) [1, 2]. Подобные эксперименты проводились также для района Сургута ($60 - 62^{\circ}$ с.ш., $70 - 75^{\circ}$ в.д.).

Результаты сопоставления спутниковых оценок X_{CO_2} с пространственно-совмещенными самолетными измерениями концентрации CO_2 представлены в [6, 7], причем в экспериментах по обращению» данных AIRS менялись периоды временного осреднения оценок, а также размеры области осреднения и объемы выборок исходных данных AIRS (за счет отбора «почти безоблачных» измерений и отбраковки измерений, приведенных к условиям отсутствия облачности, но с низким уровнем достоверности).

Как следует из результатов сопоставлений, спутниковые оценки X_{CO_2} для обоих регионов качественно верно воспроизводят сезонную изменчивость общего содержания диоксида углерода. Для оценки погрешности результатов спутникового зондирования рассчитывались величины СКО – среднеквадратических отклонений X_{CO_2} от данных самолетных наблюдений на высотах 7 и 3 км в период январь-октябрь 2003 г. (усредненных за каждый месяц). Для Новосибирского региона величины СКО находятся в диапазонах 1.5 – 2.8 и 1.2 – 2.5 млн⁻¹ при сравнении с самолетными наблюдениями концентрации CO_2 на высотах 7 и 3 км соответственно. Для региона Сургута СКО меняются в диапазоне 1.7 – 3.5 млн⁻¹ при сравнении с самолетными данными на высоте 7 км.

Из приведенных результатов следует возможность получения по данным ИК зондировщика AIRS/EOS Aqua оценок X_{CO_2} с относительной погрешностью порядка 1 %. Тем самым, подтверждается пригодность результатов спутникового мониторинга тропосферной концентрации атмосферного CO_2 с приемлемой точностью над районами бореальных экосистем Сибири.

Построение карты распределения CO₂ в верхней тропосфере над Сибирью

Выполненные исследования позволили поступить к экспериментам по решению более сложной задачи, упомянутой во Введении – созданию системы спутникового мониторинга по данным AIRS тропосферной концентрации CO₂ над обширными территориями поверхности суши. Область мониторинга в пределах 46° - 75° с.ш., 68° - 140° в.д. покрывает Сибирь и прилегающие районы. Учитывая большие объемы исходной спутниковой и дополнительной информации для выбранного региона, было решено начать с построения среднемесячных оценок X_{CO₂} для июля 2003г. Данные AIRS и продукты их обработки (уровней L1, L2) формируются в виде стандартных гранул. Гранулы с данными уровня L2 (результаты восстановления вектора состояния x и cloud cleared radiances) содержат данные для 45 строк сканирования по 30 пикселей в строке соответственно пикселям AMSU-A. Данные находятся в свободном доступе в виде файлов HDF формата (<http://www.hdfgroup.org>) на ФТП сайте, ftp://airspar1u.ecs.nasa.gov/data/s4pa//Aqua_AIRS_Level2/, а пользовательские средства поиска и отбора гранул (интерфейс) на сайте <http://mirador.gsfc.nasa.gov/cgi-bin/mirador/presentNavigation.pl?project=AIRS&tree=project>.

Для сплошного покрытия области мониторинга данными AIRS за 30 дней июля 2003 г. потребовалось более 700 гранул с яркостными температурами, выраженными в мВт/м²/см-1/ср и такое же количество гранул с данными восстановления атмосферной модели. Общий объём гранул - 2400Мб. В случае измерений AIRS было отобрано 30 каналов (из них 15 CO₂ – чувствительных каналов в коротковолновой и длинноволновой части спектра).

Программные средства, реализующие алгоритм восстановления X_{CO₂} включают следующие части

- разархивация данных из HDF формата и отбор безоблачных пикселей, так как некоторые гранулы могут содержать лишь единицы значимых пикселей;
- расчёт средних арифметических смещений для выбранных территориальных ячеек, для которых строится оценка. Размер ячеек определён в полтора градуса по широте и долготе, но имеется возможность его изменения;
- расчёт оценок содержания X_{CO₂} для каждого пикселя с учётом смещения, рассчитанного для ячейки, в которой данный пиксел попадает. Каналы, в которых смещения велики, не используются при решении обратной задачи;
- расчёт средневзвешенной оценки (медиана) для каждой ячейки и сохранение результата.

На рис. 1, составленном из 3-х частей, показано в качестве примера расположение одной из выбранных гранул за 14 июля 2003 г. относительно всей области мониторинга (верхняя правая часть рис.); границы гранулы показаны жирной сплошной линией. Здесь же кружками отмечены Новосибирск и Сургут, в окрестности которых выполнялась валидация спутниковых оценок X_{CO₂}, описанная выше.

Как уже отмечалось, одним из основных мешающих факторов при восстановлении X_{CO₂} является облачность в поле зрения прибора. В левой части рис. дано изображение поля радиационных температур для этой гранулы, зарегистрированных в одном из самых «прозрачных» каналов AIRS (центр канала – при 11.08 мкм). Более темному тону соответствуют области без облачного покрова, светлый тон соответствует наличию облачности над соответствующим районом. В правой нижней части рис. та же гранула изображена в

другой проекции, причем черным тоном выделены области, для которых измерения, отнесенные к «безоблачным» или приведенные к условиям отсутствия облачности, используются в процедуре восстановления X_{CO_2} .

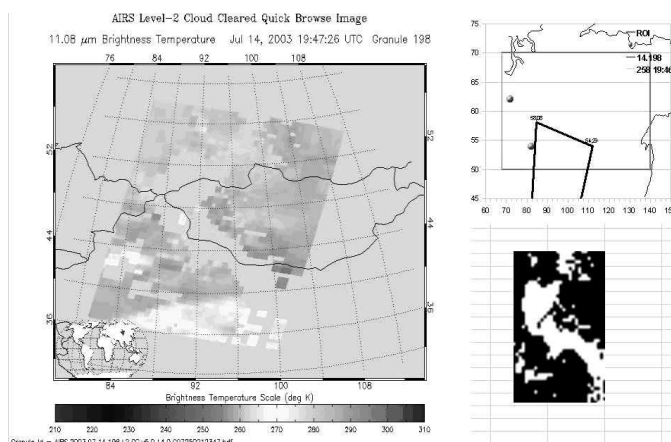


Рис. 1. Пример выделения данных AIRS уровня L2 в одной грануле, используемых для восстановления X_{CO_2}

На рис. 2 приведены результаты построения поля X_{CO_2} для всей области мониторинга. Косвенно о достоверности результатов мониторинга X_{CO_2} можно судить по тому, что для регионов Новосибирска и Сургута оценки X_{CO_2} имеют удовлетворительную точность согласно результатам сравнения с самолетными измерениями (см. выше).

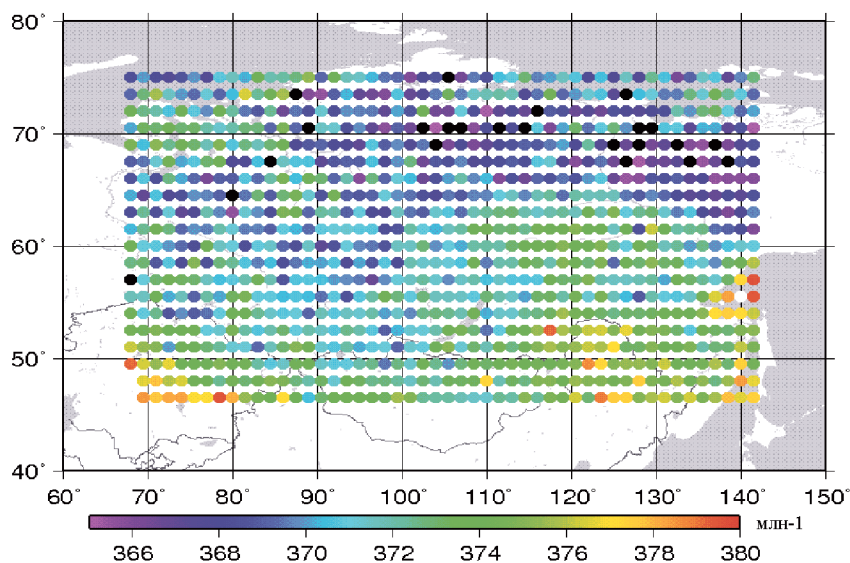


Рис.2. Карта среднемесячных значений X_{CO_2} для Сибирского региона, июль 2003

Суммируем в заключение основные результаты выполненных исследований.

1. Разработан и испытан на реальных на реальных спутниковых данных метод восстановления усредненного за месяц и среднего по верхнетропосферному слою отношения смеси диоксида углерода X_{CO_2} над бореальными экосистемами Сибири. В качестве исходной спутниковой информации использованы измерения ИК-зондировщика AIRS в подмножестве CO_2 – чувствительных каналов, классифицированные как «безоблачные» или

приведенные к условиям отсутствия облачности, а также дополнительная информация – продукты обработки данных AIRS (уровня L2) и результаты восстановления профилей температуры T(p) по данным микроволнового зондировщика AMSU-A.

2. Согласно результатам валидации для двух районов Западной Сибири предложенный метод позволяет строить оценки X_{CO_2} , правильно воспроизводящие сезонную изменчивость концентрации CO_2 в верхней тропосфере.

3. С помощью предложенного метода выполнено построение карты распределения усредненного за месяц (июль 2003) X_{CO_2} для района мониторинга, покрывающего Сибирь.

4. Дальнейшие работы включают адаптацию метода оценки X_{CO_2} к данным ИК-зондировщика IASI/MetOp, а также анализ его применимости к данным аппаратуры ИКФС-2 (Фурье спектрометр, который включен в состав полезной нагрузки перспективного отечественного метеоспутника «Метеор-М» № 2).

Работа выполнена при частичной поддержке гранта РФФИ № 09-05-13532-офи_ц.

Литература

1. Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Давыдов Д.К. и др. Организация мониторинга парниковых и окисляющих атмосферу компонент над территорией Сибири и некоторые его результаты. 1. Газовый состав. – Оптика атмосферы и океана, 2006, 19, № 11, с. 948-955.
2. Arshinov M. Yu., B.D.Belan, G.Inoue et al. Dynamics of the vertical distribution of CO_2 and CO concentrations over western Siberia (1997-2003). In Advances in the geological storage of carbone dioxide. International Approaches to reduce anthropogenic greenhouse gas emissions. - Ed. S. Lombardi, I.K. Altunina, S.T. Beanbien. Kluwer Acad. Publ., 2005, pp. 11-16.
3. Chédin A., R.Sounders, A.Hollingsworth et al. The feasibility studies of monitoring CO_2 from high resolution infrared sounders. - Journ. Geophys. Res., 2003, vol. 108, N D2, 4064 doi: 10.1029/2001JD 001443.
4. Chahine M., et al. On the determination of atmospheric minor gases by the method of vanishing partial derivatives with application to CO_2 . – Geophys. Res. Lett., 2005, 32, L22803, doi: 10.1029/2005GL024165.
5. Рублев А.Н., Успенский А.Б. Оценка концентрации углекислого газа в тропосфере по данным измерений спектрометра Sciamachy в условиях облачности. – Исслед. Земли из космоса, 2006, № 6, с. 31-41.
6. Кухарский А.В., Успенский А.Б. Определение средней концентрации атмосферного диоксида углерода в тропосфере по данным спутникового ИК-зондировщика высокого спектрального разрешения. // Метеорология и гидрология, 2009, № 4, с. 15-28.
7. Uspensky, C. Camy-Peyret, A. Rublev et al. Derivation of Tropospheric Carbon Infrared Sounders Data. Current problems in atmospheric radiation (IRS 2008). AIP Conf. Pcoceedings N 1100, Melville, New York, 2009, pp. 347-350.
8. Crevoisier C., A. Chedin, N.A. Scott. AIRS channel selection for CO_2 and other trace gas retrievals. - Q.J.R. Meteorol. Soc., 2003, vol. 129, pp. 2719-2740.
9. Crevoisier C., S.Heilliette, A.Chedin et al. Mid-tropospheric CO_2 concentration retrieval from AIRS observations in the tropics. - Geophys Res. Lett., 2004, vol. 31, L. 17106, doi: 10.1029/2004 GL 020141.
10. Strow L.L., S.E.Hannon, S.DeSouza-Mackado et al. An overview of the AIRS radiative transfer model. - IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens., 2003, vol. 41, N 2, pp.303-313.

Monitoring of carbon dioxide mean tropospheric concentration over Siberian ecosystems from satellite-based high-resolution infrared sounders data

A.V.Kukharsky, A.B.Uspensky

State Research Center "Planeta", Moscow
e-mail: uspensky@planet.iitp.ru

Due to sparse network of ground-based carbon dioxide (CO₂) observations the capabilities and limitations to retrieve atmospheric column-average CO₂ mixing ratio X_{CO_2} from satellite measurements with high-resolution infrared sounder AIRS (EOS/Aqua) have been investigated. The sensitivity studies have been carried out and a set of the most informative channels was selected for X_{CO_2} retrieval. The original method to derive mid to high tropospheric X_{CO_2} from cloud-free AIRS measurements has been developed and tested based on physical inversion algorithm. The validation exercise carried out with actual AIRS data for two areas in Western Siberia (Novosibirsk and Surgut regions) and for 10 months of year 2003 demonstrates that the retrieved monthly averaged X_{CO_2} values reproduce seasonal variations of sought quantities with a precision about 1-2 % comparing to in-situ airborne observations. AIRS data together with necessary information have been downloaded from NASA site for vast Siberia region (for July 2003). The developed methodology have been applied to these data for producing the map of spatial X_{CO_2} distribution over Siberia.

Keywords: Atmospheric carbon dioxide, IR sounder, AIRS, mixing ratio, inverse problem, radiative model.