

МОНИТОРИНГ КОНЦЕНТРАЦИИ ДИОКСИДА УГЛЕРОДА И ОБЩЕГО СОДЕРЖАНИЯ МЕТАНА В ТРОПОСФЕРЕ НАД СИБИРЬЮ ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВЫХ ИК-ЗОНДИРОВЩИКОВ AIRS, IASI

© 2011 г. А. Б. Успенский^{1*}, А. В. Кухарский¹, С. В. Романов², А. Н. Рублев^{1, 2}

¹Государственное учреждение

¹Научно-исследовательский центр космической гидрометеорологии “Планета”, Москва

²Российский научный центр “Курчатовский институт”, Москва,

*E-mail: uspensky@planet.iitp.ru

Поступила в редакцию 17.06.2010 г.

Создание спутниковых ИК-зондировщиков высокого спектрального разрешения AIRS (EOS/Aqua), IASI (MetOp) открывает новые возможности дистанционного определения средне-тропосферной концентрации диоксида углерода (X_{CO_2}) и общего содержания метана (Q_{CH_4}) в атмосфере, что важно в контексте климатических исследований, а также ввиду недостаточности наземной наблюдательной сети за CO_2 и CH_4 . В работе представлена усовершенствованная схема восстановления X_{CO_2} по данным AIRS, с помощью которой построены карты пространственного распределения X_{CO_2} по данным AIRS для июля 2003 г. и июля 2010 г., покрывающие Сибирь. Подобная методология была также применена для восстановления “мгновенных” значений X_{CO_2} по данным IASI (в условиях отсутствия облачности) для 7 июля 2008 г. и района проведения эксперимента YAK-AEROSIB. Сравнение спутниковых оценок с квазисинхронными самолетными наблюдениями дает величину погрешности порядка 2.2 млн.⁻¹. Для восстановления Q_{CH_4} по данным IASI создан итерационный физический алгоритм. Работоспособность предложенного алгоритма была оценена в экспериментах с реальными данными IASI, покрывающими Сибирский регион за несколько дней июля 2008 г. Валидация спутниковых оценок Q_{CH_4} выполнена путем сравнения с пространственно-совмещенными и квазисинхронными оценками Q_{CH_4} по данным AIRS. Величины стандартного отклонения между обоими типами оценок не превосходят 3%.

Ключевые слова: диоксид углерода, метан, ИК-зондировщик, обратная задача, итерационный алгоритм обращения, радиационная модель, валидация

ВВЕДЕНИЕ

Как известно, изменения концентрации атмосферных долгоживущих парниковых газов — диоксида углерода (CO_2) и метана (CH_4) — оказывает существенное влияние на климат Земли, см. например (Кондратьев, 2004; Семенов, 2004). Современная наземная сеть наблюдений парниковых газов, действующая в рамках Программы Глобальной службы атмосферы (ГСА или GAW-Global Atmospheric Watch) Всемирной метеорологической организации (ВМО), включает около 100 станций (Бюллетень ВМО, 2008) и не обеспечивает глобальный мониторинг распределения атмосферных CO_2 , CH_4 с требуемым пространственным и временным разрешением (особенно над океанами, зонами бореальных лесов и экосистем). Измерения концентрации CO_2 на различных высотах (в диапазоне 500 м–10 км), производимые с самолетов над конкретными регионами, см. например (Arshinov et al., 2005; Аршинов и др.,

2006), являются эпизодическими и не могут существенно дополнить наземную сеть.

Добиться радикального улучшения пространственного и временного разрешения глобальных данных о концентрации атмосферного CO_2 можно только путем развития дистанционных (спутниковых) методов измерений. При этом спутниковые оценки концентрации CO_2 должны быть достаточно точными, а именно относительная среднеквадратичная ошибка (СКО) оценивания среднего отношения смеси диоксида углерода в тропосфере 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 концентрации CO_2 в тропосфере и нижней стратосфере по данным измерений уходящего ИК-излучения с помощью спутниковых ИК-зондировщиков высокого спектрального разрешения типа AIRS/EOS Aqua, IASI/MetOp.

В работе (Chédin et al., 2003) показано, что для оценки средней в слое 700–200 гПа концентрации CO_2 с точностью порядка 1% можно использовать данные AIRS или IASI (при отсутствии облачности в поле зрения прибора), совмещенные с данными измерений спутникового микроволнового зондировщика типа AMSU-A, причем исходные данные AIRS, IASI должны быть усреднены по площади $500 \times 500 \text{ км}^2$ и за временной промежуток порядка двух недель.

Описание современных подходов к дистанционному определению концентрации CO_2 по данным AIRS можно найти в (Shahine et al., 2005; Maddy et al., 2008; Strow, Hannon, 2008; Uspensky et al., 2005, 2007, 2008; Успенский и др., 2006; Кухарский, Успенский, 2009). Обзор методов обращения данных IASI для восстановления X_{CO_2} приведен в (Crevoisier et al., 2009).

Аналогично ситуации со спутниковым мониторингом содержания диоксида углерода, в последние 15 лет активно развиваются дистанционные методы получения глобальных данных о распределении метана в атмосфере (ввиду недостаточности наземной сети наблюдений). Данные ИК-зондировщиков AIRS, IASI пригодны для дистанционного определения общего содержания метана в тропосфере Q_{CH_4} , см., например (Успенский и др., 1998; Turquet et al., 2004). Учитывая относительно малую изменчивость глобальных распределений Q_{CH_4} (не более 5%), погрешность спутникового оценивания этой величины (относительная СКО) не должна превосходить 2–4%.

Целями настоящего исследования являются:

- доработка и применение метода определения по данным AIRS усредненной за месячный период величины X_{CO_2} (Кухарский, Успенский, 2009) для спутникового мониторинга диоксида углерода в тропосфере над обширными районами бореальных лесов и экосистем Сибири;
- разработка и испытание метода оценки X_{CO_2} по данным IASI над районами Сибири;
- разработка и испытание метода оценки Q_{CH_4} по данным IASI.

Аппаратура AIRS (Atmospheric InfraRed Sounder) или атмосферный ИК-зондировщик на борту американского спутника EOS/Aqua (запущен в 2002 г.) представляет собой диффракционный спектрометр, измеряющий уходящее тепловое излучение на верхней границе атмосферы в диапазоне 3.7–15.4 мкм ($650\text{--}2675 \text{ см}^{-1}$ при переходе от длин волн λ к волновым числам ν) в 2378 каналах с разрешением $\Delta\nu$ от 0.6 до 2.0 см^{-1} и поперечным режимом сканирования; в каждой строке сканирования 90 пикселей, линейный размер пикселя для измерений в надир – 13.5 км, см., например (Shahine et al., 2005). 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.

Аппаратура IASI (Infrared Atmospheric Sounding Interferometer) или атмосферный ИК-зондировщик на борту европейского метеоспутника MetOp представляет собой интерферометр Майкельсона, с помощью которого регистрируется спектр уходящего теплового излучения в диапазоне 3.63–15.5 мкм (или $645\text{--}2760 \text{ см}^{-1}$). В спектре имеется 8461 отсчетов (каналов) с разрешением 0.5 см^{-1} после аподизации. Пространственное разрешение в надире составляет 12 км для одного субпикселя, измерения IASI группируются по “большим” пикселям, состоящим из четырех субпикселей. В строке сканирования – 30 больших пикселей, см., например (Crevoisier et al., 2009).

В статье также дано краткое описание предлагаемого метода анализа или “обращения” данных AIRS для получения оценок X_{CO_2} , а также обсуждаются результаты валидации оценок X_{CO_2} для двух районов Западной Сибири и 10 месяцев 2003 г. Рассмотрено применение метода для построения карты распределения величин X_{CO_2} над Сибирью. Описаны методики восстановления X_{CO_2} и Q_{CH_4} по данным IASI и приведены результаты их испытания на реальных данных IASI для Сибирского региона.

МЕТОД АНАЛИЗА ДАННЫХ AIRS И РЕЗУЛЬТАТЫ ВАЛИДАЦИИ СПУТНИКОВЫХ ОЦЕНОК

Предлагаемый метод анализа данных AIRS для получения оценок X_{CO_2} является развитием подхода (Shahine et al., 2005) и вместе с результатами валидации спутниковых оценок изложен в (Uspensky et al., 2008a, 2008b; Кухарский, Успенский, 2009). В данном разделе приведем краткое описание основных процедур предложенного метода, а также суммируем результаты валидации спутниковых оценок для двух районов Западной Сибири.

Как известно (Chédin et al., 2003; Shahine et al., 2005; Успенский и др., 2006, 2008a), основные трудности и ограничения детектирования вариаций CO_2 по данным спутниковых ИК-зондировщиков высокого спектрального разрешения состоят в следующем:

- получение оценок X_{CO_2} или профиля отношения смеси $Q(p)$, где p – давление, затруднено тем, что измерения AIRS и IASI, чувствительные к вариациям концентрации CO_2 , намного более сильно чувствительны к вариациям вертикального профиля температуры $T(p)$ и наличию облачности в поле зрения прибора – главным мешающим факторам;

— максимумы весовых функций в уравнении радиационного переноса для CO_2 — чувствительных каналов находятся в слое 200–350 гПа, что объясняет малую чувствительность сигналов в этих каналах к вариациям концентрации CO_2 в нижней тропосфере;

— малая чувствительность и недостаточная информативность измерений по отношению к вариациям профиля $Q(p)$ позволяет дистанционно оценивать с приемлемой точностью только интегральные характеристики, например среднее в верхнетропосферном слое отношение смеси X_{CO_2} .

Для дистанционного определения X_{CO_2} или $Q(p)$ по данным измерений ИК-зондировщиков возможны два подхода: 1) восстановление “полного” вектора состояния x ; 2) восстановление X_{CO_2} или $Q(p)$ с использованием априорной информации о $T(p)$ и других компонентах вектора состояния.

При разработке метода “обращения” данных AIRS за основу был принят второй подход как менее трудоемкий. В результате анализа информативности данных AIRS отобрано подмножество из 15 CO_2 -чувствительных каналов, включая девять длинноволновых (ДВ) каналов в спектральном диапазоне 699–705 cm^{-1} и шесть коротковолновых (КВ) каналов в диапазоне 1939–2107 cm^{-1} . Максимумы весовых функций для этих каналов находятся в слое 200–350 гПа, что ограничивает возможность получения оценок X_{CO_2} в нижней и средней тропосферах.

Предложенный метод “обращения” данных AIRS и восстановления X_{CO_2} базируется на численном решении обратной задачи и включает следующие этапы (Uspensky et al., 2008a, 2008b; Кухарский, Успенский, 2009):

1) для области зондирования Ω отбираются измерения AIRS в CO_2 -каналах, не искаженные облачностью, или измерения, приведенные к условиям отсутствия облачности;

2) для временных промежутков Δt (две недели или один месяц) рассчитываются средние систематические смещения между измеренными T_B^{obs} и модельными T_B^{calc} радиационными температурами $\delta(\alpha) = \langle T_B^{obs}(\alpha) - T_B^{calc}(\alpha) \rangle$, $\alpha = 1, \dots, n$, где $\langle \dots \rangle$ означает осреднение по выборке за период Δt , которые затем используются в процедуре численного решения обратной задачи;

3) расчет температур T_B^{calc} производится с помощью быстрой радиационной модели SARTA (Strow et al., 2003), 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 ре-

зультаты тематической обработки данных AIRS в пункте зондирования (продукты AIRS уровня L2), а также референсный профиль $Q^{ref}(p) \equiv X_{\text{CO}_2}$;

4) обратная задача относительно X_{CO_2} решается численно с использованием итерационного алгоритма Гаусса–Ньютона, причем независимо строятся оценки X_{CO_2} (ДВ) и X_{CO_2} (КВ) — по данным AIRS в подмножествах ДВ и КВ CO_2 -каналов соответственно;

5) выборки оценок $\{X_{\text{CO}_2}(\text{ДВ})\}$ и $\{X_{\text{CO}_2}(\text{КВ})\}$, полученных для временного промежутка Δt и области зондирования Ω , подвергаются пространственно-временной фильтрации, затем строится средневзвешенная оценка $X_{\text{CO}_2}^{СП}$.

Детали адаптации и использования быстрой радиационной модели SARTA приведены в (Кухарский, Успенский, 2009).

Следует отметить, что в отличие от (Chahine et al., 2005; Crevoisier et al., 2009; Strow, Hannon, 2008) предложенный метод применяется для анализа данных AIRS над сушей (а не над водной поверхностью). Кроме того, вместо статистического подхода (регрессия (Успенский и др., 2006), нейронно-сетевые алгоритмы (Crevoisier et al., 2009)) нами использовано численное решение обратной задачи.

Остановимся теперь на результатах валидации оценок $X_{\text{CO}_2}^{СП}$. Для этого выполнена серия экспериментов с реальными данными AIRS (более 500 гранул за период январь–октябрь 2003 г.), покрывающими два района Западной Сибири. В качестве истинных значений X_{CO_2} использованы результаты самолетных *in situ* измерений CO_2 , полученных в рамках Японско-Российского проекта по изучению парниковых газов для Сибирских экосистем. Район полетов — окрестность Обского водохранилища 54°08′–54°33′ с.ш., 81°51′–82°40′ в.д., почти 90% занимают хвойные леса. Измерения проводились на высотах от 0.5 до 7 км (доступны данные на 1, 3 и 7 км) (Arshinov et al., 2005). Подобные эксперименты проводились также для района Сургута (60°–62° с.ш., 70°–75° в.д.).

Результаты сопоставления оценок $X_{\text{CO}_2}^{СП}$ с пространственно-совмещенными самолетными измерениями концентрации CO_2 представлены в (Uspensky et al., 2008a, 2008b, 2009; Кухарский, Успенский, 2009), 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 отбраковки измерений, приведенных к условиям отсутствия облачности, но с низким уровнем достоверности).

Как следует из результатов сопоставлений, оценки $X_{\text{CO}_2}^{СП}$ для обоих регионов качественно вер-

но воспроизводят сезонную изменчивость концентрации диоксида углерода в тропосфере. Для оценки погрешности результатов спутникового зондирования рассчитывались величины $X_{CO_2}^{СП}$ от данных самолетных наблюдений на высотах 7 и 3 км в период январь–октябрь 2003 г. (усредненных за каждый месяц). Для Новосибирского региона величины X_{CO_2} 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 величины X_{CO_2} меняются в диапазоне 1.7–3.5 млн.⁻¹ при сравнении с самолетными данными на высоте 7 км. Из приведенных результатов следует возможность получения оценок $X_{CO_2}^{СП}$ над районами бореальных экосистем Сибири по данным ИК-зондировщика AIRS/EOS Aqua с относительной погрешностью порядка 1%.

ПОСТРОЕНИЕ КАРТ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ДИОКСИДА УГЛЕРОДА В ВЕРХНЕЙ ТРОПОСФЕРЕ НАД СИБИРЬЮ

Выполненные исследования позволили приступить к решению более сложной задачи, упомянутой во введении данной статьи, – созданию системы спутникового мониторинга тропосферной концентрации CO_2 над обширными территориями поверхности суши по данным AIRS. Выбранная область мониторинга Ω 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 построение среднемесячных оценок X_{CO_2} для двух летних месяцев – июля 2003 г. и июля 2010 г. Данные AIRS и продукты их обработки (уровней L1, L2) формируются в виде стандартных гранул для 45 строк сканирования по 30 пикселей в строке соответственно пикселям AMSU-A. Указанные данные находятся в свободном доступе в виде файлов HDF формата (<http://www.hdfgroup.org>) на FTP 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 измеренными радиациями (выраженными в мВт/м²/см⁻¹/ср) и такое же количество гранул с результатами восстановления компонент вектора состояния. Общий объем данных для отобранных гранул – 2400 Мб. При этом из “полных” спектров AIRS были отобраны измерения только в 30 каналах (из них пятнадцать CO_2 -чувствительных каналов в КВ- и ДВ-частях

спектра, пять CH_4 -чувствительных каналов и остальные десять каналов – в окнах прозрачности и полосе 15 мкм). Аналогичная процедура отбора данных AIRS и продуктов уровня L2 была реализована для области Ω и 30 дней июля 2010 г.

Программные средства, реализующие алгоритм восстановления X_{CO_2} , включают:

- разархивацию данных из HDF формата и отбор безоблачных пикселей;

- разбиение области Ω на совокупность ячеек ω_i (размер ячейки ω_i определен в 1.5° по широте и долготе) и расчет систематических смещений $\delta_i(\alpha)$ для каждой ячейки;

- расчет оценок $X_{CO_2}^{СП}(\omega_i)$ по методу, описанному в предыдущем разделе (измерения в КВ-каналах, а также в ДВ-каналах с большими смещениями для данной ячейки не используются).

Как уже отмечалось выше, одним из основных мешающих факторов при построении достоверных оценок $X_{CO_2}^{СП}$ является облачность в поле зрения прибора. Удовлетворительное качество процедуры отбора “безоблачных” измерений и измерений, приведенных к условиям отсутствия облачности (данные AIRS уровня L2), подтверждено путем сравнительного визуального анализа изображений полей радиационной температуры T_b в прозрачном канале с центром при 11.08 мкм и изображений выделенных фрагментов гранул (с “безоблачными” данными) для нескольких сроков июля 2003 г. и июля 2008 г.

На рис. 1 (см. на цветн. вклейке) приведены карты среднемесячных оценок $X_{CO_2}^{СП}$ для всей области мониторинга и двух месяцев (рис. 1а – июль 2003 г.; рис. 1б – июль 2010 г.). Косвенно о достоверности результатов мониторинга X_{CO_2} можно судить по тому, что для регионов Новосибирска и Сургута оценки $X_{CO_2}^{СП}$ имеют удовлетворительную точность согласно результатам сравнения с самолетными измерениями (см. выше).

МЕТОД АНАЛИЗА ДАННЫХ IASI ДЛЯ ОЦЕНИВАНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ДИОКСИДА УГЛЕРОДА

Как уже отмечалось, данные измерений ИК-зондировщика IASI при отсутствии облачности в поле зрения прибора могут быть использованы (совместно с измерениями микроволнового зондировщика AMSU-A) для получения количественной информации о содержании CO_2 в тропосфере и нижней стратосфере (Chedin et al., 2003). В последующих работах французских исследователей А. Шедена (А. Chedin), К. Кревуазье (С. Crevoisier) и др. был выполнен анализ информативности данных IASI по отношению к вариациям концентрации CO_2 , отобраны CO_2 -чувстви-

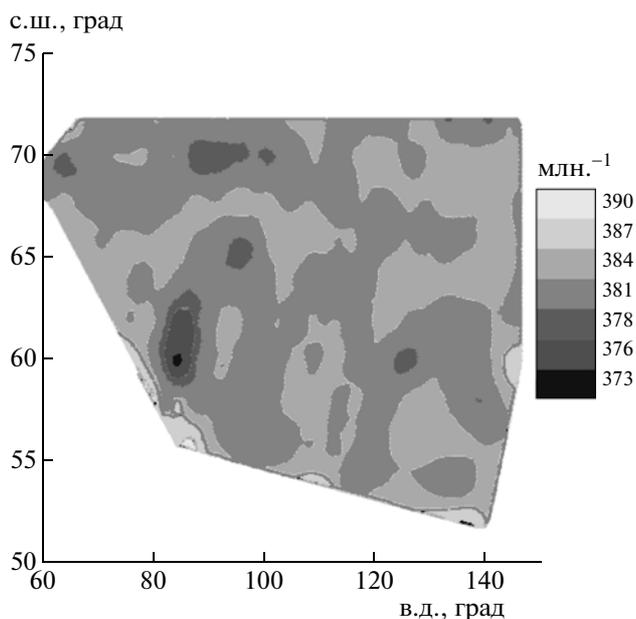


Рис. 2. Карта пространственного распределения оценок $X_{CO_2}^{СП}$, полученных по данным IASI за 7 июля 2008 г.

тельные каналы (в спектральном диапазоне $694.5\text{--}704.25\text{ см}^{-1}$) и предложен нелинейный регрессионный метод (нейронно-сетевой алгоритм) для построения оценок $X_{CO_2}^{СП}$, см. обзор (Crevoisier et al., 2009). Согласно результатам валидации (сравнения с самолетными измерениями концентрации CO_2 *in situ* и данными моделирования), точность спутниковых среднемесячных оценок $X_{CO_2}^{СП}$ над водной поверхностью в тропиках составляет около 2 млн.^{-1} (т.е. лучше 1%) при усреднении по ячейкам $5^\circ \times 5^\circ$.

Аналогичные исследования по анализу информативности данных IASI, выбору CO_2 -чувствительных каналов и разработке метода получения оценок X_{CO_2} по данным IASI выполнены авторами данной работы (Uspensky et al., 2008a, 2008b). Отобрано 16 CO_2 -чувствительных каналов в спектральной области $699\text{--}741\text{ см}^{-1}$. Для обработки метода обращения данных IASI, подобного описанному в разделе “Метод анализа данных AIRS и результаты валидации спутниковых оценок” данной статьи (но без использования данных в КВ каналах), были привлечены архивные данные международного эксперимента JAIveх по валидации измерений IASI, предоставленные специалистами университета шт. Висконсин (США). Указанный архив содержит, в частности, 60 спектров, зарегистрированных аппаратурой IASI при отсутствии облачности над территорией шт. Оклахома и Мексиканским заливом за период 19 апреля–4 мая 2007 г. в светлое и темное время суток, а также синхронные данные радиозонди-

рования (измерения дроп-зондов). В численных экспериментах с этими данными была проверена работоспособность модели радиационных расчетов из (Trotsenko et al., 2001), а также испытаны процедуры расчета и коррекции систематических смещений и оценки “мгновенных” значений X_{CO_2} (без временного усреднения) по данным измерений IASI в пяти отобранных CO_2 -чувствительных каналах (с центрами при 709.5 , 711.00 , 711.25 , 741.25 см^{-1}). Выполнить валидацию полученных оценок $X_{CO_2}^{СП}$ не удалось ввиду отсутствия независимых (наземных или самолетных) измерений концентрации CO_2 .

Дальнейшие работы по получению и валидации оценок $X_{CO_2}^{СП}$ проводились с использованием материалов, любезно предоставленных проф. К. Кампайро (С. Саму-Реугет) из Университета им. Пьера и Мари Кюри (Париж, Франция). Указанные материалы включают результаты самолетных измерений концентрации CO_2 , полученные в период выполнения российско-французского проекта JAK-AEROSIB по изучению углеродного и озонного цикла в Евразии (Paris et al., 2008). Эти данные дополнены выборкой измерений IASI (спектров, зарегистрированных в условиях отсутствия облачности) для соответствующих территории и временного периода.

На рис. 2 представлена карта пространственного распределения оценок $X_{CO_2}^{СП}$ по данным IASI за 7 июля 2008 г. для территории, покрывающей самолетные маршруты проекта JAK-AEROSIB. В качестве дополнительной информации о компонентах вектора состояния x в пунктах зондирования, необходимой для построения оценок $X_{CO_2}^{СП}$, использованы результаты тематической обработки данных IASI. Как видно из рис. 2, пространственная изменчивость значений $X_{CO_2}^{СП}$ в пределах рассматриваемой территории составляет около 20 млн.^{-1} .

Для валидации результатов спутникового зондирования оценки $X_{CO_2}^{СП}$ усреднялись по ячейкам $2^\circ \times 2^\circ$ и сравнивались с пространственно совмещенными самолетными измерениями концентрации CO_2 . Результаты сравнения представлены на рис. 3. СКО между спутниковыми и самолетными данными составляет 2.2 млн.^{-1} , что подтверждает работоспособность созданного метода анализа измерений IASI и его пригодность для организации спутникового мониторинга содержания CO_2 в тропосфере. Учитывая малый объем выборки, использованной для валидации, данный вывод следует считать предварительным.

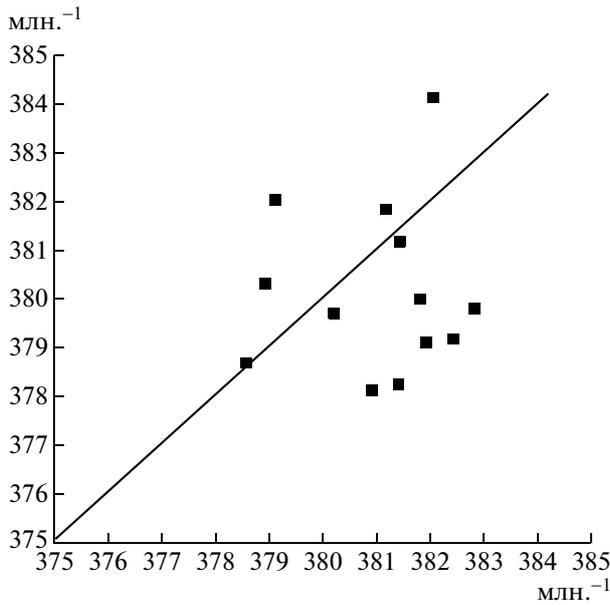


Рис. 3. Сравнение спутниковых оценок X_{CO_2} с самолетными наблюдениями (черные квадраты – спутниковые оценки, прямая линия – самолетные наблюдения).

ОЦЕНИВАНИЕ ОБЩЕГО СОДЕРЖАНИЯ МЕТАНА В ТРОПОСФЕРЕ ПО ДАННЫМ IASI

Данные IASI, описанные в предыдущем разделе, были использованы для отработки и испытания метода дистанционного определения Q_{CH_4} . Выполненные ранее теоретические проработки и

численные эксперименты (Успенский и др., 1998, 2005; Uspensky et al., 2008b, 2009) позволили:

- исследовать информативность данных измерений IASI по отношению к вариациям Q_{CH_4} и выделить четыре CH_4 -чувствительных канала с центрами при 1332.50, 1341.75, 1342.75, 1346.6 cm^{-1} ;
- создать и испытать метод оценивания Q_{CH_4} по данным IASI, основанный на численном решении обратной задачи и привлечении дополнительной информации о профилях температуры и влажности в пунктах зондирования;
- сформулировать требования к точности задания дополнительной информации;
- получать теоретические оценки погрешности результатов дистанционного определения Q_{CH_4} .

Установлено также, что задача оценивания Q_{CH_4} значительно проще задачи дистанционного определения X_{CO_2} вследствие гораздо более сильной чувствительности измерений IASI к вариациям содержания метана (по сравнению со слабой чувствительностью данных IASI к вариациям содержания CO_2). Кроме того, при численном решении обратной задачи нет необходимости привлекать “независимые” данные о профиле $T(p)$.

Разработанный метод оценки $Q_{CH_4}^{СП}$ был испытан на выборке данных IASI за семь дней июля 2008 г., покрывающих Сибирский регион. На рис. 4 представлены карты пространственного распределения усредненных за период 7–23 июля и по ячейкам $2^\circ \times 2^\circ$ оценок Q_{CH_4} , полученных по данным AIRS (рис. 4а – продукт NASA) и по данным

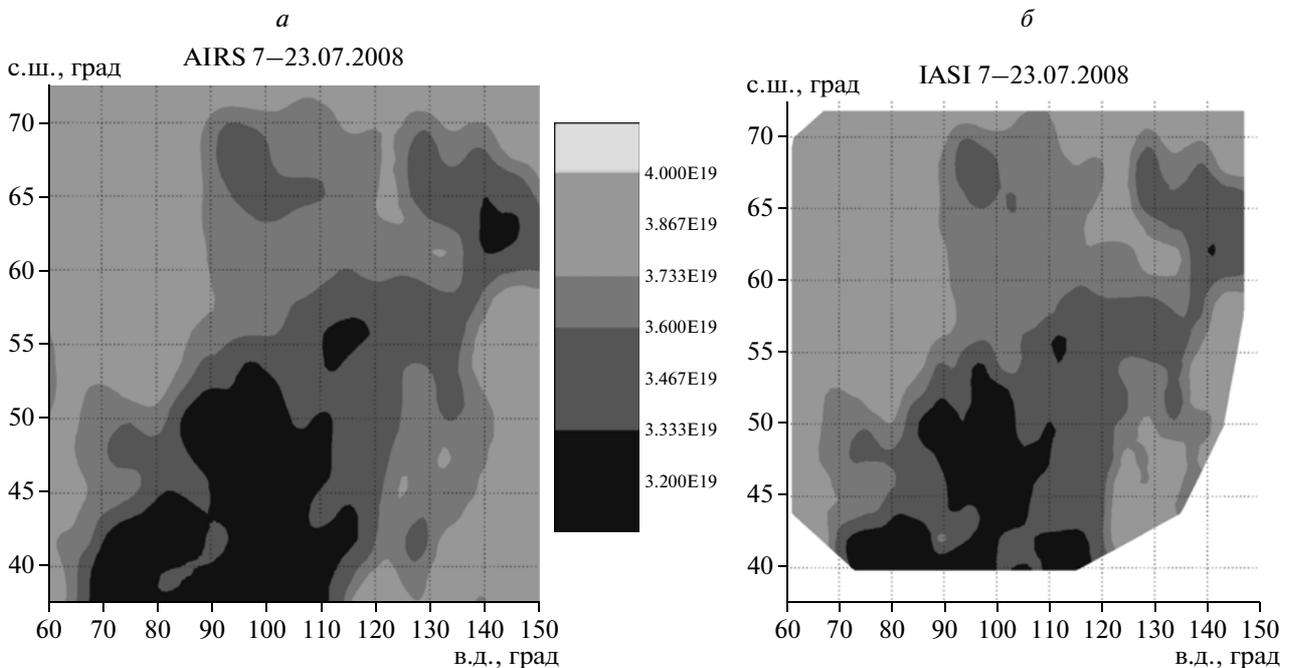


Рис. 4. Карты пространственного распределения оценок Q_{CH_4} для Сибирского региона: а – по данным AIRS; б – по данным IASI.

IASI (рис. 4б). Результаты определения общего содержания метана по данным AIRS были привлечены для косвенной оценки достоверности полученных значений $Q_{\text{CH}_4}^{\text{СП}}$. Визуальное сравнение рис. 4а и 4б показывает подобие пространственных распределений Q_{CH_4} . Кроме того, количественное сравнение обоих видов оценок Q_{CH_4} дает величины относительного СКО в диапазоне 1.0–3.0% для отдельных дней периода 7–23 июля 2008 г. при среднем значении 2.2 %. Из этих данных следует работоспособность созданного метода дистанционного определения Q_{CH_4} по данным IASI.

Для количественной оценки погрешности $Q_{\text{CH}_4}^{\text{СП}}$ необходимы независимые наблюдения (наземные, самолетные).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Суммируем в заключение основные результаты выполненных исследований.

Доработан и испытан метод определения по данным AIRS усредненного за месяц и среднего по верхнетропосферному слою отношения смеси диоксида углерода X_{CO_2} над бореальными экосистемами Сибири. 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.

С помощью предложенного метода выполнено построение карт пространственного распределения оценок X_{CO_2} (июль 2003 и 2010 г.) для района мониторинга, покрывающего Сибирь.

Разработан и испытан метод оценки X_{CO_2} (без усреднения по времени) по данным IASI. Метод обеспечивает построение карт пространственного распределения X_{CO_2} над Сибирским регионом с погрешностью не хуже 2.2 млн.⁻¹ при условии усреднения результатов по ячейкам $2^\circ \times 2^\circ$.

Разработан и испытан метод оценки общего содержания метана в тропосфере Q_{CH_4} по данным IASI. Метод позволяет строить карты пространственного распределения Q_{CH_4} над Сибирью, подобные аналогичным картам, построенным по данным AIRS.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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. Т. 19. № 11. С. 948–955.

Бюллетень ВМО по парниковым газам // ВМО. № 5. 23 ноября 2009. 5 с. <http://www.wmo.int/gaw>.

Кондратьев К.Я. Глобальные изменения климата: данные наблюдений и результаты численного моделирования // Исслед. Земли из космоса. 2004. № 2. С. 61–96.

Кухарский А.В., Успенский А.Б. Определение концентрации диоксида углерода в тропосфере по данным спутникового ИК-зондировщика высокого спектрального разрешения // Метеорология и гидрология. 2009. № 4. С. 25–28.

Семенов С.М. Парниковые газы и современный климат Земли. М.: Метеорология и гидрология, 2004. 175 с.

Успенский А.Б., Троценко А.Н., Рублев А.Н. и др. Определение общего содержания малых газовых составляющих атмосферы с помощью ИК-зондировщика IASI. II. Анализ точности результатов зондирования // Исслед. Земли из космоса. 1998. № 3. С. 79–86.

Успенский А.Б., Троценко А.Н., Рублев А.Н. Проблемы и перспективы анализа и использования данных спутниковых ИК-зондировщиков высокого спектрального разрешения // Исслед. Земли из космоса. 2005. № 5. С. 18–33.

Успенский А.Б., Кухарский А.В., Рублев А.Н. Детектирование тропосферных вариаций CO_2 по данным спутникового ИК-зондировщика высокого спектрального разрешения // Исслед. Земли из космоса. 2006. № 4. С. 42–51.

Arshinov M. Yu., Belan B. D., Inoue G. et al. Dynamics of the vertical distribution of CO_2 and CO concentrations over western Siberia (1997–2003). Advances in the geological storage of carbone dioxide // Int. Approaches to reduce anthropogenic greenhouse gas emissions / Eds. Lombardi S., Altunina I.K., Beanbien S.T. Kluwer. Acad. Publ., 2005. P. 11–16.

Chahine M., Barnet C.D., Olten E.T. 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. V. 32. № L22803. doi: 10.1029/2005GL024165.

Chédin A., Sounders R., Hollingsworth A. et al. The feasibility studies of monitoring CO_2 from high-resolution infrared sounders // J. Geophys. Res. 2003. V. 108. № D2.4064. doi: 10.1029/2001JD 001443.

Crevoisier C., Chédin A., Matsueda H. et al. First year of upper tropospheric integrated content of CO_2 from IASI hyperspectral infrared observations // Atmos. Chem. Phys. 2009. V. 9. P. 4797–4810.

Maddy E.S., Barnet C.D., Goldberg M. et al. CO_2 retrievals from the Atmospheric Infrared Sounder: Methodology and validation // J. Geophys. Res. 2008. V. 113. № D11301. doi:10.1029/2007JD009402.

Paris J.-D., Ciais P., Nedelec P. et al. The YAK-AEROSIB transcontinental aircraft campaigns: new insights on the transport of CO_2 , CO and O_3 across Siberia // Tellus B. 2008. V. 60. № 4. P. 551–568.

Strow L.L., Hannon S.E., DeSouza-Mackado S. et al. An overview of the AIRS radiative transfer model // IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens. 2003. V. 41. № 2. P. 303–313.

Strow L.S., Hannon S.E. A 4-year zonal climatology of lower tropospheric CO_2 derived from ocean-only Atmospheric Infrared Sounder observations // J. Geophys. Res. 2008. V. 113. № D18302. doi: 10.1029/2007JD009713.

Trotsenko A.N., Kopylov A.V., Rublev A.N. et al. LITM-FRTM: Fast radiative transfer model to simulate

IASI/METOP measurements // Proc. 2000 Eumetsat Meteor. Sat. Data User's Conf. 29.05–02.06.2000. Bologna, Italy. EUM P 29. P. 231–238.

Turquety S., Hadji-Lazaro J., Clerbaux C. et al. Operational trace gas retrieval algorithm for the Infrared Atmospheric Sounding Interferometer // J. Geophys. Res. 2004. V. 109. № D21301. doi: 10.1029/2004JD004821.

Uspensky A.B., Kukharsky A.V., Trotsenko A.N. et al. Progress and promise for observing tropospheric gas variations with satellite advanced sounders // Proc. Joint 2005 Eumetsat Meteorol. Sat. Conf. 19–24 September 2005. Dubrovnik, Croatia, 2005. P. 507–515.

Uspensky A.B., Kukharsky A.V., Romanov S.V. et al. Development of remote sensing techniques for detecting variations of atmospheric carbon dioxide concentration from

high-resolution infrared sounders // Proc. Joint 2007 Eumetsat Meteor. Sat. Conf. and the 15th AMS Sat. Met. & Oceanogr. Conf. 24–28 September 2007. Amsterdam, Netherlands, 2008a. EUM P. 50.

Uspensky A.B., Rublev A.N., Kukharsky A.V. et al. Derivation of tropospheric carbon dioxide and methane concentrations in the boreal zone from satellite-based hyper spectral infrared sounders data // Proc. ITSC-16. 07–13 May 2008. Angra dos Reis, Brazil, 2008b.

Uspensky A., Came-Pegret C., Rublev A., et al. Derivation of tropospheric carbon dioxide and methane concentration in the boreal zone from satellite high resolution infrared sounders data // Proc. Intern. Radiation Simp. 2008. 3–8 August 2008. Foz do Iguacu, Brazil. AIP Conf. Proc. 1100. Melville, N.Y., 2009. P. 347–350.

Monitoring of the Carbon Dioxide Mid-Tropospheric Mixing Ratio and Methane Total Column from IR Sounders AIRS and IASI

A. B. Uspensky¹, A. V. Kukharsky¹, S. V. Romanov², A. N. Rublev^{1,2}

¹State Research Center of Space Hydrometeorology “Planeta”, Moscow

²Russian Research Center “Kurchatov Institute”, Moscow

The development of space-borne hyper-spectral IR sounders (AIRS/EOS-Aqua, IASI/MetOp) opens new opportunities for detecting variations of atmospheric carbon dioxide (CO₂) and methane (CH₄) concentrations. The capabilities to retrieve atmospheric column-average CO₂ mixing ratio X_{CO_2} and column-average CH₄ mixing ratio (Q_{CH_4}) from satellite measurements is of significant importance in the context of climate change studies and due to sparse network of ground-based CO₂&CH₄ observations. This paper presents at first an updated status of X_{CO_2} retrieval scheme based on clear-sky or cloud-cleared AIRS data inversion algorithm. Basing on these results, two maps of monthly averaged X_{CO_2} estimates have been produced for extensive region of Siberia with spatial averaging about $1.5^\circ \times 1.5^\circ$ -one for July 2003 and second for July 2010. Similar methodology has been applied for the retrieval of “instant” X_{CO_2} from clear sky IASI data. The retrievals have been produced for July 7 2008 and for the region of airborne measurements made in the frame of YAK-AEROSIB campaign. The accuracy of X_{CO_2} retrievals assessed by comparison with aircraft flask CO₂ observations is about 2.2 ppmv. With respect to the CH₄ column retrieval from IASI data the approach has been developed based upon the application of iterative physical inversion algorithm to clear-sky IASI data. The performance of the retrieval algorithm is evaluated in the case study experiment involving IASI data covering the Siberia region. The feasibility of IASI-based Q_{CH_4} retrieval has been evaluated through comparison with collocated and quasi-synchronous AIRS-based Q_{CH_4} retrievals. The values of standard deviation between both products (averaged over the grid $2^\circ \times 2^\circ$) are less than 3%.

Key words: carbone dioxide, methane, IR sounder, inverse problem, radiative transfer model, validation

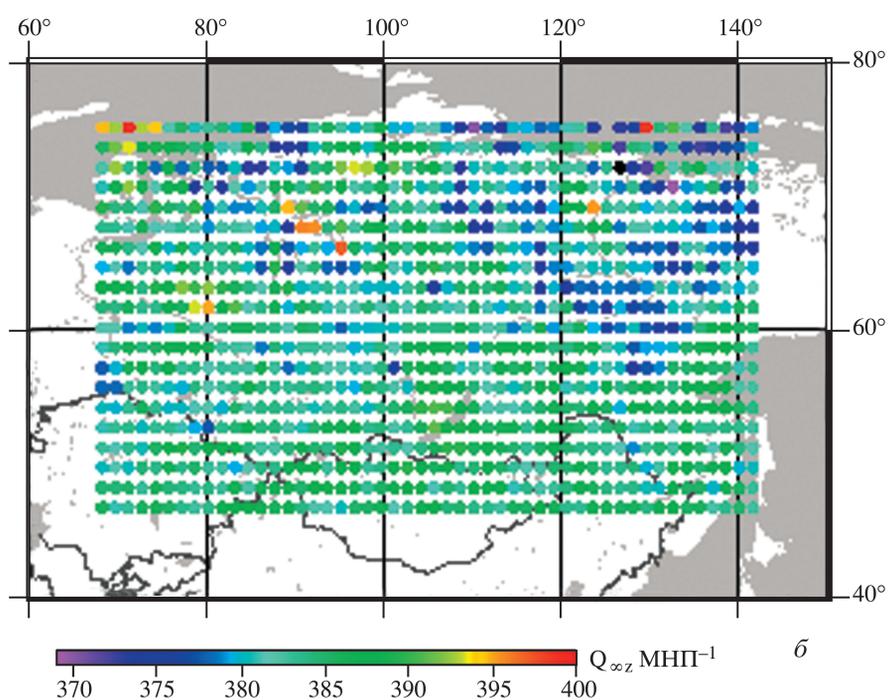
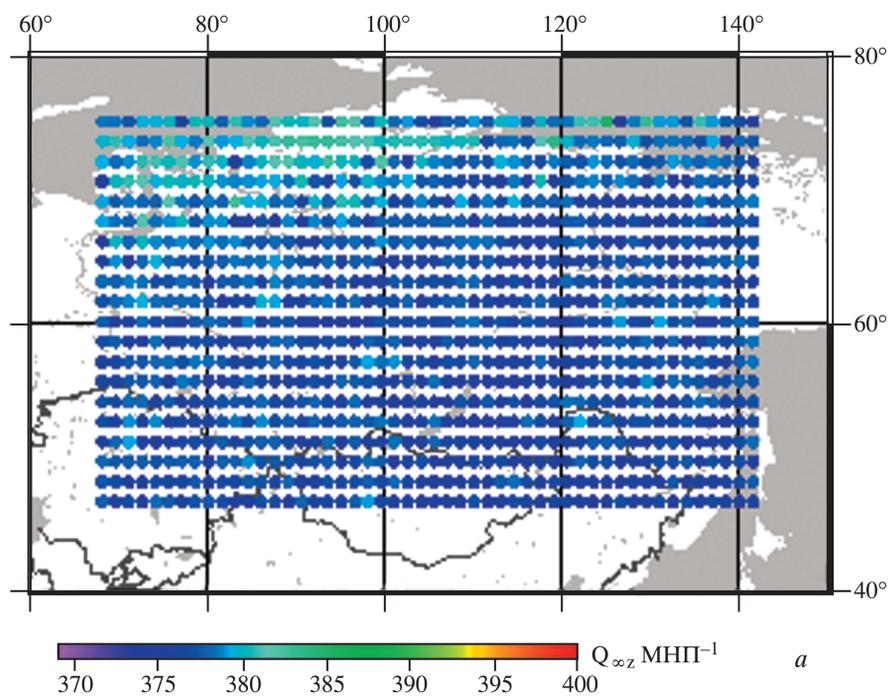


Рис. 1. Карты пространственного распределения оценок X_{CO_2} , полученных по данным AIRS, для Сибирского региона: *a* – июль 2003 г.; *б* – июль 2008 г.

