

ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ АТМОСФЕРЫ, ГИДРОСФЕРЫ И ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

УДК 551.510.41:551.507.362.2

Сравнение спутниковых и самолетных измерений газового состава в тропосфере над Югом Западной Сибири

М.Ю. Аршинов¹, С.В. Афонин¹, Б.Д. Белан¹, В.В. Белов¹, Ю.В. Гриднев¹,
Д.К. Давыдов¹, Т. Machida², Ph. Nédélec³, J.-D. Paris⁴, А.В. Фофонов^{1*}

¹Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634021, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1, Россия

²Национальный институт исследования окружающей среды
16-2 Onogawa, Tsukuba, Japan

³Лаборатория аэрологии
14, Avenue E. Belin, 31400, Toulouse, France

⁴Лаборатория исследования климата и окружающей среды, Unite mixte CEA-CNRS, Bat709,
CEL' Orne des Merisiers 91191 GIF SUR YVETTE, Paris, France

Поступила в редакцию 27.05.2013 г.

Проведено сравнение вертикальных профилей концентрации O_3 , CO , CO_2 и CH_4 , измеренных с помощью самолета-лаборатории Ту-134 «Оптик» (СМЛ) и восстановленных по данным прибора IASI, установленного на борту метеорологического спутника Европейского космического агентства (MetOp). Показано, что абсолютные различия концентраций озона, полученных на СМЛ и MetOp, могут изменяться от 3 до 18 млрд⁻¹ на высоте 0,5 км и от -8 до -38 млрд⁻¹ на 7 км. Относительные различия находятся в диапазоне 8 ... 30% на уровне 0,5 км и -12 ... 88% на уровне 7 км. Для профилей CO абсолютные различия концентрации CO могут изменяться от 32 до 103 млрд⁻¹ на высоте 0,5 км и от -18 до 23 млрд⁻¹ на высоте 3 км. Относительные различия находятся в диапазоне -4 ... 48% на уровне 0,5 км и -8 ... 20% на уровне 7 км. Максимальная разность всех профилей концентрации метана достигает в пограничном слое 150 млрд⁻¹, а минимальная -10 млрд⁻¹. Средняя относительная разность изменяется от 2,8 до -0,5%. Максимальная - по всем полетам находится в диапазоне от 7,8 до 1,2%, минимальная - от -0,4 до -3,4%. Средняя разность CO_2 - в коридоре $\pm 1,5$ млн⁻¹, в то время как индивидуальные профили несопоставимы. Максимальные и минимальные разности по всем полетам дают большую величину, а именно в пограничном слое атмосферы 10 и -12 млн⁻¹ соответственно. Максимальные и минимальные относительные отклонения по всем полетам составляют 2,3 и -3,3% в пограничном слое соответственно. Выше пограничного слоя относительные отклонения уменьшаются до $\pm 1,0\%$.

Ключевые слова: атмосфера, газ, зондирование; atmosphere, gas, sensing.

Введение

Внимание мирового сообщества в последние несколько десятилетий обращено к проблеме глобальных изменений окружающей среды и климата. Значительная группа ученых придерживается мнения, что наблюдается устойчивая тенденция к повышению среднглобальной температуры воздуха за счет антропогенного воздействия, увеличивающихся выбросов парниковых газов и поглощающих солнечное излучение компонентов воздуха, таких как элементарный углерод (сажа). Другая группа ученых считает, что наблюдаемые вариации темпе-

ратуры укладываются в рамки естественных глобальных циклов. Для оценки возможных изменений климата широко используется численное моделирование по разным сценариям тенденций изменения объема выбросов, основанное на данных измерений состава воздуха на действующей сети станций Всемирной метеорологической организации (ВМО). При этом сеть станций ВМО, с одной стороны, небольшая, а с другой - они неравномерно распределены по земному шару. Это сильно осложняет процесс моделирования изменений климата и делает неоднозначной интерпретацию его результатов.

Решение проблемы обеспечения данными современных моделей изменения климата многие ученые связывают с организацией и проведением спутникового мониторинга атмосферы и подстилающей поверхности. В настоящее время запущены и осуществляются дистанционное зондирование десятки космических аппаратов, совершенствуются методы и методики зондирования, оцениваются погрешности измерений

* Михаил Юрьевич Аршинов (michael@iao.ru); Сергей Васильевич Афонин; Борис Денисович Белан (bbd@iao.ru); Владимир Васильевич Белов (belov@iao.ru); Юрий Владимирович Гриднев; Денис Константинович Давыдов (denic@iao.ru); Toshinobu Machida; Philippe Nédélec; Jean-Daniel Paris; Александр Владиславович Фофонов (alenfo@iao.ru).

того или иного параметра [1–8]. Однако для использования данных спутникового зондирования в целях мониторинга состава воздуха требуется, чтобы погрешность измерений не превышала 1–3% измеряемой величины [1–3, 8]. Валидацию получаемых со спутника данных обычно проводят по наземным [9] или самолетным данным [1–3, 10–14].

Для сопоставления спутниковых и самолетных данных, проведенного французскими учеными, использовались результаты проекта POLARCAT, в ходе которого самолетное зондирование выполнялось с борта WP-3D «Orion» (NOAA), DC-8 «Electra» (NASA), ATR-42 (CNRS), DLR Falcon-20 (CNRS) и российского Ан-30 «Оптик-Э» (ИОА СО РАН) [10–13]. Для интерферометра IASI (Infrared Atmospheric Sounding Interferometer) ошибки восстановления профиля CO составляют 21% в нижней и 10% в верхней тропосфере. Сопоставление данных по общему содержанию CO, выполненное для SCIAMACHY (SCanning Imaging Absorption SpectroMeter for Atmospheric Cartography), наоборот, дало хорошие результаты. Расхождение в большинстве случаев не превышало 4–6%. Корреляция между спутниковыми и самолетными данными об общем содержании O₃ лежит в пределах $r = 0,67 \pm 0,68$. Она сильно уменьшается над заснеженной поверхностью. Следует отметить, что проводимые сопоставления показывают заметные расхождения как по времени года, так и по различным регионам. Поэтому верификация спутниковых измерений для различных регионов по-прежнему актуальна.

Авторы данной статьи осуществляют самолетное зондирование атмосферы над Сибирским регионом с начала 80-х гг. XX в. и по настоящее время. В конце 2011 г. в Институте была введена в эксплуатацию станция приема спутниковой информации 2.4 XLB фирмы Orbital Systems (США). Получаемая со станции информация позволяет начать верификацию спутниковых данных по результатам самолетного зондирования в нашем регионе. Это и является целью данной работы.

1. Регион работ и получаемая информация

Работы по определению вертикального распределения газов и аэрозоля вначале выполнялись на самолете-лаборатории Ан-30 «Оптик-Э» [15, 16]. Затем весь комплекс оборудования был перенесен на самолет-лабораторию Ту-134 «Оптик» [17], в дальнейшем СМЛ.

Для измерений CO₂ использовался анализатор Li-Cor 6262, недисперсионный инфракрасный анализатор, модифицированный в LSCE. В прибор была включена система, которая регулирует температуру, поток и давление поступающего воздуха. Поступающий в прибор заборный воздух осушался с использованием перхлората магния. Частота регистрации составляла 0,5 Гц. Калибровка прибора выполнялась в полете через каждые 30 мин, с использованием поверочных смесей с тремя различными концентрациями («высокая», «низкая» и «справочная»).

Эти газы находятся в баллонах высокого давления, которые используются последовательно. Концентрации газов были проверены в лаборатории LSCE до установки на борт самолета и соответствуют первичным стандартам WMO-CO₂ от NOAA/ESRL. Используемые концентрации составляли $370,60 \pm 0,01$, $380,47 \pm 0,01$ и $409,76 \pm 0,01$ млн⁻¹ соответственно.

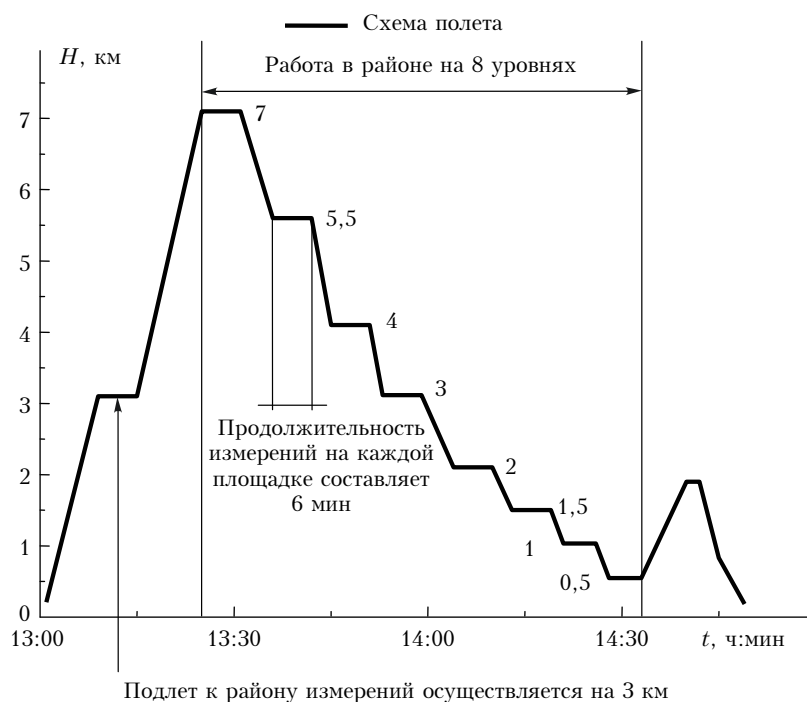
Измерения оксида углерода CO производились корреляционным газоанализатором модели 48CTL фирмы Thermo Environmental Instruments. Диапазоны измерений: 0 ... 500, 1000, 5000, 10000 млрд⁻¹. Газоанализатор модифицирован в Laboratoire d'Aérodologie и описан в [18]. Он является полностью автоматизированным инструментом, позволяющим проводить измерения с точностью 5 млрд⁻¹. Модифицированный вариант осуществляет проверку нуля прибора каждые 20 мин. Для этого применяется новый датчик IR с лучшим охлаждением и температурным регулированием.

В связи с тем что существует проблема измерения озона в условиях, отклоняющихся от фоновых (она ранее обсуждалась в [19, 20]), на борту использовали три одновременно работающих озонметра: хемилюминесцентный 3-02П, разработанный и изготовленный в ЗАО «ОПТЭК» (г. Санкт-Петербург, Россия), и два ультрафиолетовых — Модель-49С Thermo Environment Inc. (США). Озонметры калибровались с помощью генератора озона ГС-2 также производства ЗАО «ОПТЭК». Подвод и отвод воздуха от приборов осуществлялись по тефлоновым трубкам.

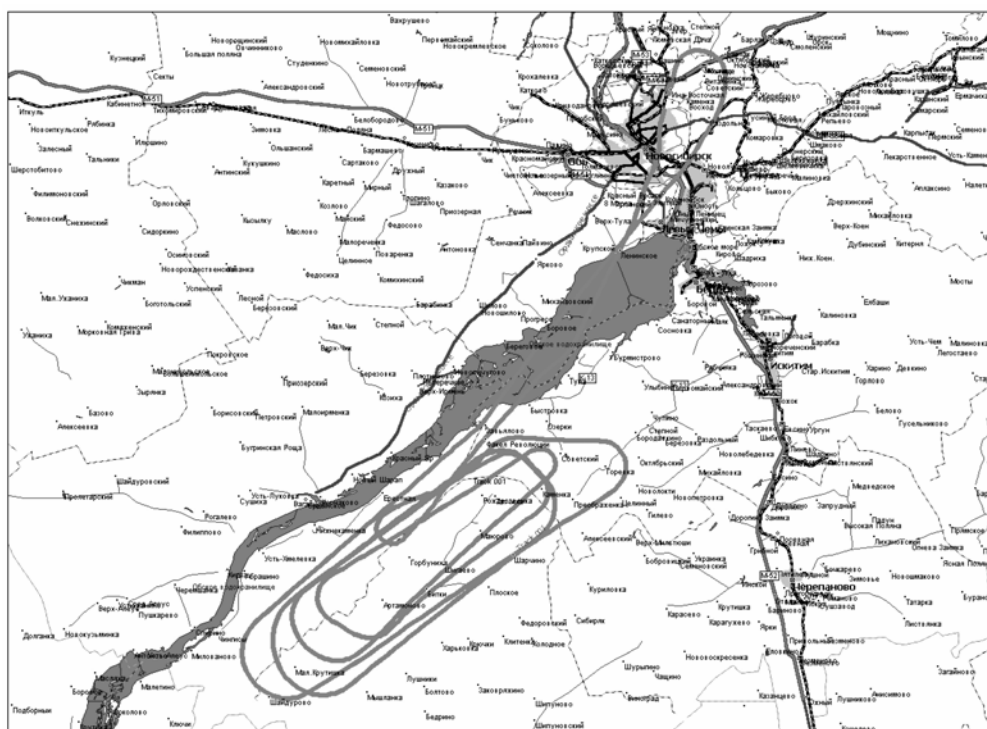
В 2011 г. комплекс оборудования самолета-лаборатории Ту-134 «Оптик» был дополнен прецизионным измерителем CO₂, CH₄, H₂O фирмы Picarro, модель G2301-*m*. Прибор предназначен для измерения концентрации диоксида углерода, метана и водяного пара в атмосфере. Диапазоны измерений: CO₂ 0–1000 млн⁻¹; CH₄ 0–20 млн⁻¹; H₂O 0–7 об% H₂O/39 °С точки росы (неконденсирующейся). Погрешность CO₂ < 200 млрд⁻¹; CH₄ < 1,5 млрд⁻¹; H₂O < 150 млн⁻¹. Периодичность измерений 1,2 с.

Полеты СМЛ Ту-134 «Оптик» с июля 1997 г. по настоящее время проводятся по следующей традиционной схеме. Ежемесячно вылет планируется на третью декаду каждого месяца на 13:00 местного времени из г. Новосибирска. Из-за плохой погоды (низкой видимости, сильной облачности, осадков и т.д.) или технической невозможности организовать полет он может быть перенесен на ближайшие дни с хорошей погодой. Поэтому часть вылетов производится в первую декаду следующего месяца.

Типовой вертикальный профиль полета приведен на рис. 1, а. Горизонтальная проекция полета показана на рис. 1, б. Видно, что район работ находится юго-западнее Новосибирска — крупного промышленного центра Сибири. Он выбран исходя из двух обстоятельств: 1) близость к аэропорту (соответственно, экономия подлетного непроизводительного летного времени); 2) с учетом розы ветров, чтобы промвыбросы Новосибирска не оказывали влияния на измерения состава воздуха.



a



b

Рис. 1. Схема вертикального зондирования газового состава: *a* – вертикальный профиль; *b* – горизонтальная проекция полета

На каждой площадке (их восемь) рабочих уровней продолжительность измерений равна 6 мин полета. Помимо непрерывной работы всего измерительного комплекса производится также отбор забортно-

го воздуха в резервуары для последующего анализа и аспирация взвешенных частиц на фильтры.

Для анализа были взяты вертикальные профили концентрации газов, полученные нами в течение

2012–2013 гг. Они сопоставлялись с профилями, восстановленными по прибору IASI, который установлен на борту метеорологического спутника Европейского космического агентства (MetOp). Использовались стандартные методы обращения данных IASI [21, 22].

Пространственное разрешение кадра, полученного с помощью прибора IASI, зависит от угла наблюдения. Номинальное (при надирных измерениях) пространственное разрешение составляет 25 км и на конце скана размер пикселя равен 39 × 20 км. Достичь точного совпадения профилей в пространстве и времени, измеренных с помощью самолета-лаборатории и спутника, довольно сложно. Поэтому для сопоставления отбирались случаи, когда профили, полученные на СМЛ и IASI, максимально приближались друг к другу. Насколько это критично,

видно из рис. 2, где приведены вертикальные профили, измеренные на самолете-лаборатории и восстановленные по данным прибора IASI в трех пикселях для отдельных дней. Координаты и время зондирования на самолете-лаборатории и спутнике (IASI) приведены в таблице.

Из рис. 2 следует, что профили, полученные на СМЛ и прибором IASI, могут существенно отличаться. Правда, здесь приведены профили с наибольшими различиями. Причем совпадение по времени измерения рассматриваемых профилей оказывается не обязательным. В обоих вариантах совпадение лучше у профилей, которые восстановлены по IASI в более поздние сроки. Поэтому при нахождении средних различий использовались профили, которые имели меньшую разность с данными самолета-лаборатории.

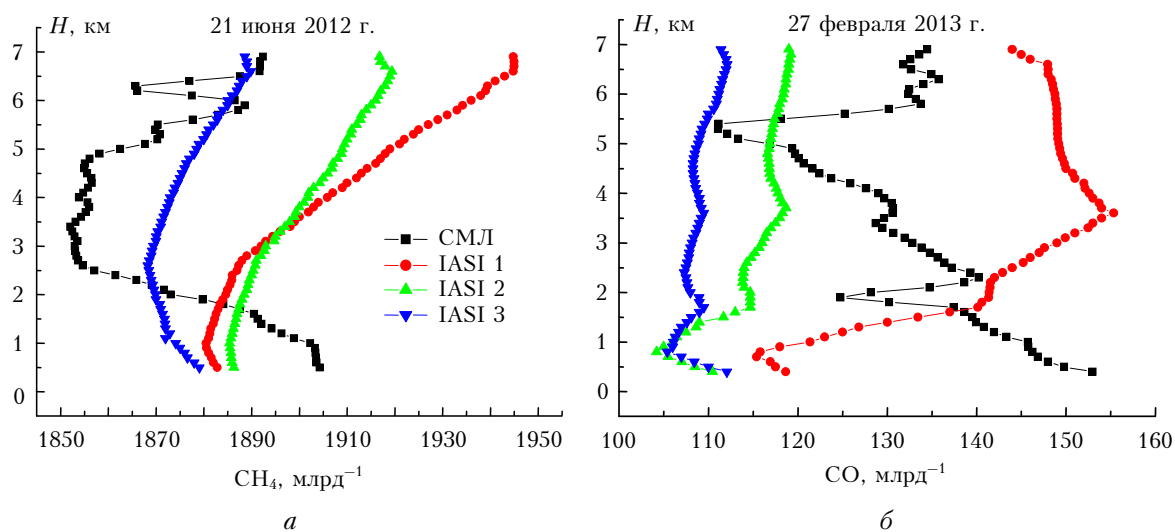


Рис. 2. Вертикальное распределение газов, измеренное с помощью СМЛ и спутника IASI (IASI 1, IASI 2, IASI 3): а – метан; б – оксид углерода

Координаты и время спутникового и самолетного зондирования, использованные для построения рис. 2

Дата	Самолет-лаборатория		Спутник MetOp (IASI)	
	Время по Гринвичу	Координаты	Время по Гринвичу	Координаты
21 июня 2012 г.	06:10 – 08:06	54,0–54,5° с.ш.; 81,8–82,9° в.д.	3:53	IASI 1: 55,176° с.ш.; 82,084° в.д.
			5:35	IASI 2: 55,231° с.ш.; 82,759° в.д.
			15:23	IASI 3: 55,073° с.ш.; 83,103° в.д.
27 февраля 2013 г.	07:03 – 08:33	54,0–54,5° с.ш.; 81,8–82,9° в.д.	3:59	IASI 1: 54,420° с.ш.; 81,850° в.д.
			5:38	IASI 2: 54,258° с.ш.; 81,732° в.д.
			15:29	IASI 3: 54,490° с.ш.; 82,517° в.д.

2. Результаты сопоставления профилей газов, измеренных на СМЛ и прибором IASI

2.1. Озон

Все рассмотренные случаи сопоставления профилей озона, измеренных на самолете-лаборатории и восстановленных по IASI, можно разделить на 3 группы (рис. 3).

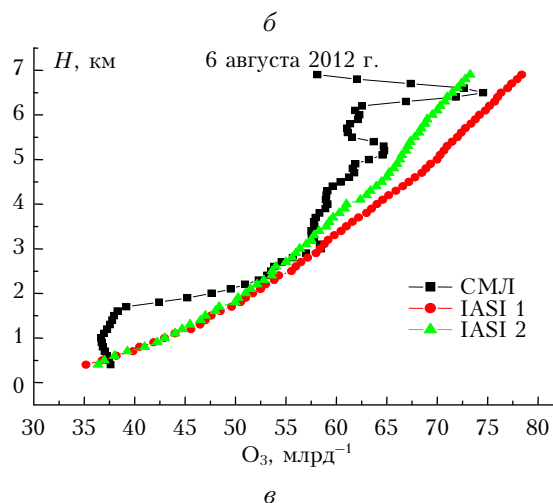
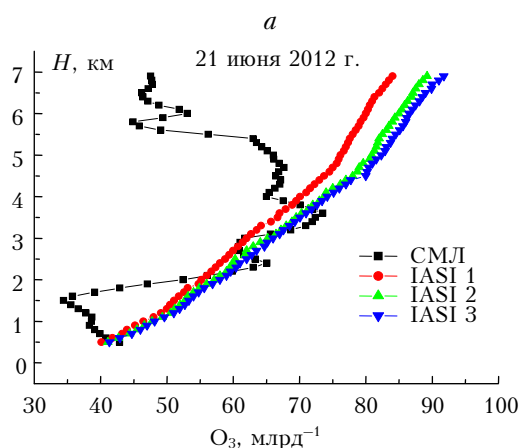
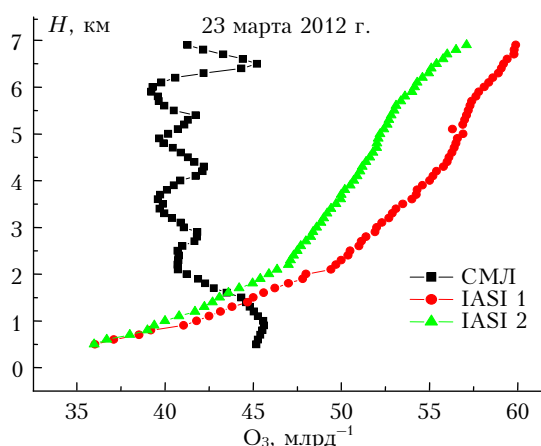


Рис. 3. Вертикальное распределение озона по данным СМЛ и спутника IASI

К первой группе, которая составляет примерно 50% всех анализируемых случаев, можно отнести вариант, представленный на рис. 3, а. Для него характерны занижение концентрации озона, измеренной спутниковым зондировщиком IASI в пограничном слое атмосферы, и явное завышение в свободной тропосфере.

Во вторую группу попадут профили концентраций, совпадающие в значительном слое тропосферы, как это показано на рис. 3, б. Таких случаев оказывается порядка 30%.

Третья группа, когда концентрации озона отличаются в пределах коридора погрешностей двух методов, составляет примерно 20% (рис. 3, в).

Из анализа средних за весь рассматриваемый период профилей озона можно сделать следующие выводы.

Средние профили озона, измеренные на борту самолета-лаборатории и восстановленные по IASI, отражают наиболее представительную группу, а именно: заниженных спутником значений в пограничном слое и завышенных (по сравнению с фактическими данными) по мере подъема (рис. 4, а).

Причем разница между профилями концентраций, полученных на СМЛ и IASI, растет с увеличением высоты. Вследствие этого средняя разница в концентрациях озона (СМЛ – IASI) изменяется от 10 млрд⁻¹ на уровне 0,5 км до –23 млрд⁻¹ на высоте 7 км (рис. 4, б). Максимальные по всем профилям различия составляют 18 млрд⁻¹ на высоте 0,5 км и –8 млрд⁻¹ на высоте 7 км. Минимальные различия также по всем профилям изменятся от 3 до –38 млрд⁻¹ в том же диапазоне высот.

Поскольку озон имеет заметный годовой ход, то, чтобы найти относительные погрешности его измерения прибором IASI, разность концентраций нормировали на значения, полученные с борта самолета-лаборатории: (СМЛ – IASI)/СМЛ. Эти данные представлены на рис. 4, из которого видно, что средняя относительная разность положительна только в пограничном слое и равна 22% на высоте 0,5 км. Выше 1,0 км она становится отрицательной и достигает 47% на уровне 7 км. Максимальная относительная разность изменяется от 30 до –12% в слое 0,5–7,0 км. Минимальная по всем профилям относительная разность на высоте 0,5 км составляет 8% и достигает –88% на уровне 7 км.

Таким образом, проведенное сопоставление показывает, что абсолютные различия концентрации озона, измеренные на СМЛ и прибором IASI, могут изменяться от 3 до 18 млрд⁻¹ на высоте 0,5 км и от –8 до –38 млрд⁻¹ на 7 км. Относительная разность находится в диапазоне +8 ... +30% на уровне 0,5 км и –12 ... –88% на уровне 7 км. Полученные различия значительно больше, чем найденные в [11, 23, 24]. По-видимому, заложенная в алгоритм обработки модель вертикального распределения озона нуждается в корректировке. По крайней мере, на это указывают ранее выполненные измерения озона [25, 26].

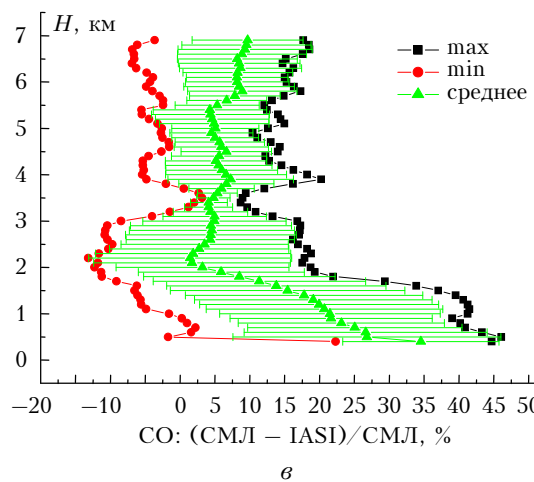
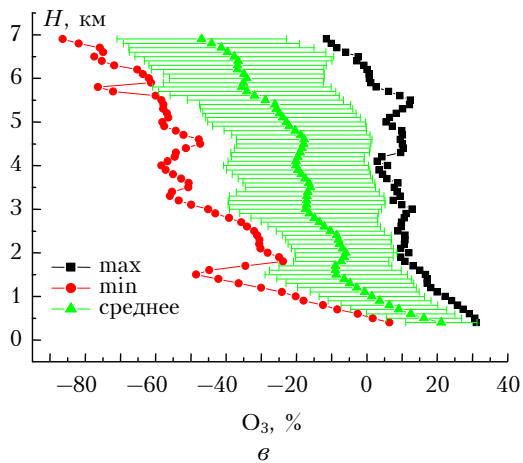
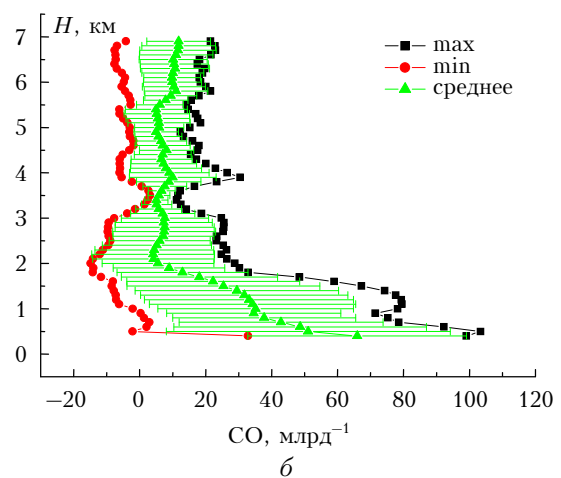
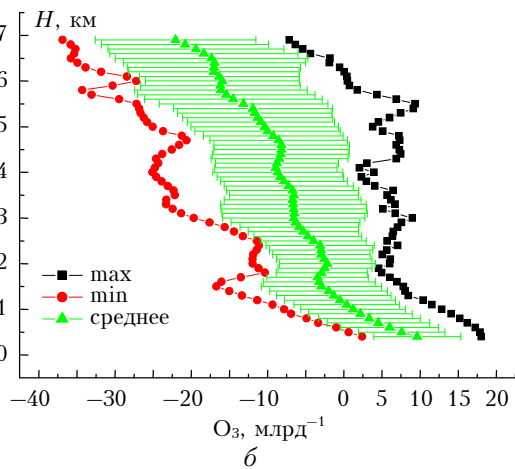
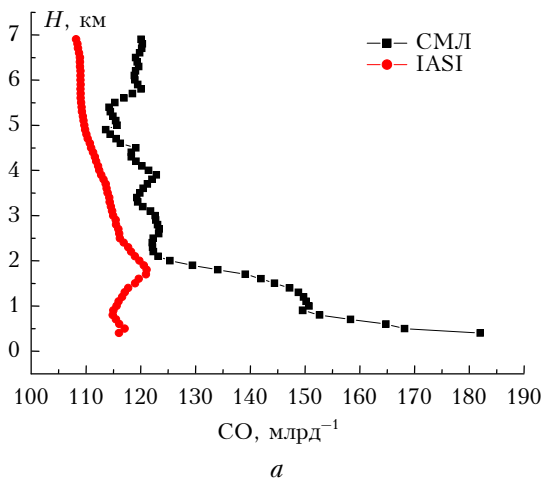
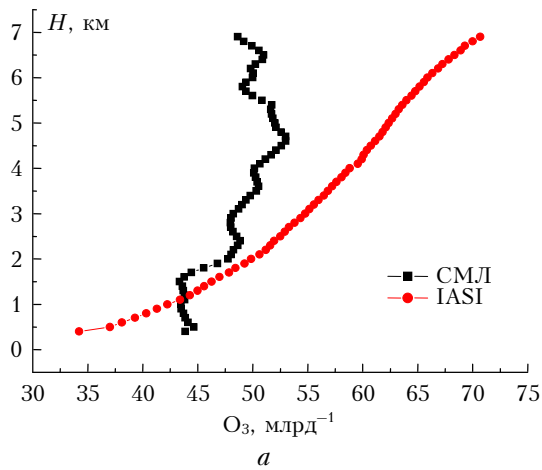


Рис. 4. Средние вертикальные профили озона и их различия: *a* – средние профили; *б* – различия СМЛ – IASI в абсолютных единицах; *в* – относительные различия $(\text{СМЛ} - \text{IASI})/\text{СМЛ}$

2.2. Оксид углерода

Для оксида углерода различия между вертикальными профилями, измеренными с помощью СМЛ и восстановленными по IASI, также можно разделить на три группы, как и для озона. Поскольку картина будет близка к той, что изображена на рис. 4, то сразу перейдем к анализу средних характеристик, представленных на рис. 5.

Рис. 5. Средние вертикальные профили оксида углерода и их различия: *a* – средние профили; *б* – различия СМЛ – IASI в абсолютных единицах; *в* – относительные различия $(\text{СМЛ} - \text{IASI})/\text{СМЛ}$

Из рис. 5, *a* видно, средние концентрации оксида углерода, измеренные на СМЛ и восстановленные по IASI, очень сильно отличаются в пограничном слое атмосферы до высоты 2 км. Выше этого слоя ход концентраций, измеренных разными приборами, подобен и близок по абсолютным величинам.

Подобным же образом ведет себя и средняя разность концентраций CO , полученных на СМЛ и прибором IASI (рис. 5, б). Видно, что на уровне 0,5 км она достигает 63 млрд^{-1} и падает до 3 млрд^{-1} вблизи 2 км. В слое от 2 до 7 км средняя разность (СМЛ – IASI) варьирует в пределах $3\text{--}10 \text{ млрд}^{-1}$. Максимальная разность, найденная по всем полетам, изменяется от 103 млрд^{-1} на уровне 0,6 км до 11 млрд^{-1} на высоте 3,3 км, а затем вновь возрастает до 20 млрд^{-1} на уровне 7 км. Минимальная разность (также по всем полетам) лежит в диапазоне $32 \dots -18 \text{ млрд}^{-1}$.

При переходе к относительным значениям разности концентраций картина меняется незначительно (рис. 5, в). Средняя относительная разность максимальна на высоте 0,5 км и достигает 35% от значения концентрации CO , измеренной на борту самолета-лаборатории. Максимальная относительная разность, найденная по всем полетам, изменяется от 48% на уровне 0,6 км до 10% на высоте 3,3 км, а затем вновь возрастает до 20% на уровне 7 км. Минимальная относительная разность (также по всем полетам) лежит в диапазоне $23 \dots -14\%$.

Таким образом, абсолютные различия концентраций CO , полученных на борту СМЛ и прибором IASI, могут изменяться от 32 до 103 млрд^{-1} на высоте 0,5 км и от -18 до 23 млрд^{-1} на высоте 3 км. Относительные разности находятся в диапазоне $4 \dots 48\%$ на уровне 0,5 км и $-8 \dots 20\%$ на уровне 7 км. Полученные различия значительно близки к найденным в [12, 13]. Асимметрия отклонения этих различий (СМЛ – IASI) указывает на то, что модель вертикального распределения CO , заложенная в алгоритм обработки данных, полученных зондировщиком IASI, более реалистично отражает фактические профили.

2.3. Метан

Если характеризовать профили метана, то в 60% случаев прибор IASI занижает его концентрации в пограничном слое атмосферы и значительно завышает в свободной тропосфере. В 30% случаев концентрация метана, восстановленная по IASI, меньше фактической во всем слое атмосферы и только в 10% случаев можно найти их близость.

При осреднении картина несколько выравнивается, хотя и не совсем (рис. 6, а). Видно, что профили, полученные на борту СМЛ и прибором IASI, как бы находятся в противофазе. При этом IASI занижает концентрацию метана в пограничном слое почти на 50 млрд^{-1} , что очень много, и завышает в средней тропосфере на 10 млрд^{-1} .

Такие различия в данных отражаются и в средних разностях концентраций, зафиксированных двумя приборами (рис. 6, б). Видно, что средние разности максимальны в пограничном слое и достигают 50 млрд^{-1} . Затем они уменьшаются в средней тропосфере до -10 млрд^{-1} . Далее наблюдается уменьшение разности вблизи уровня 7 км. Максимальная разность по данным всех профилей достигает в пограничном слое 150 млрд^{-1} , а минимальная -10 млрд^{-1} . Мак-

симальная и минимальная разности в средней тропосфере вблизи уровня 4 км составляют соответственно 60 и -63 млрд^{-1} . В верхней части профиля на высоте 7 км они равны $+42$ и -38 млрд^{-1} соответственно.

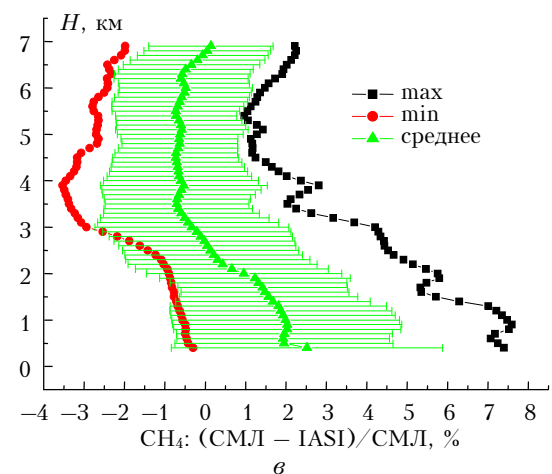
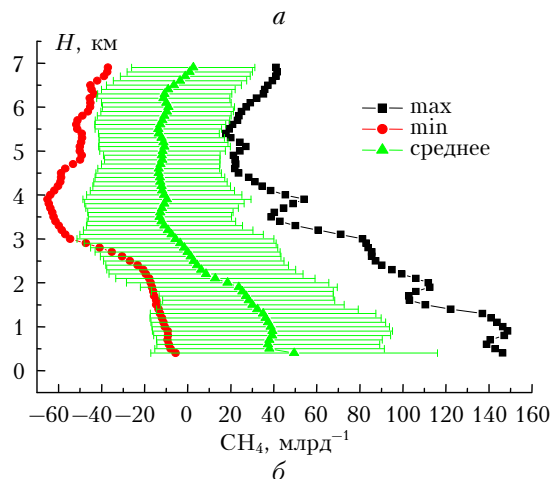
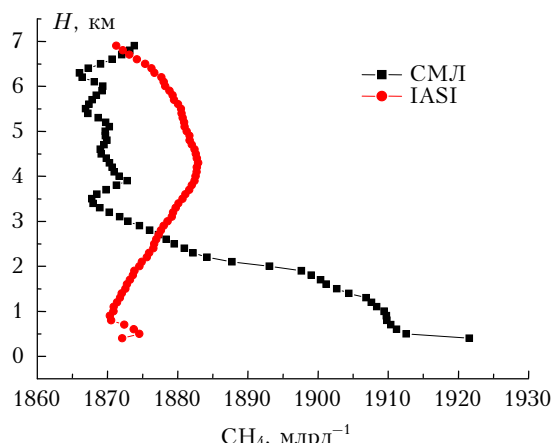


Рис. 6. Средние вертикальные профили метана и их различия: а – средние профили; б – различия СМЛ – IASI в абсолютных единицах; в – относительные разности $(\text{СМЛ} - \text{IASI})/\text{СМЛ}$

Относительные разности, нормированные на концентрацию метана, измеренную с помощью СМЛ, представлены на рис. 6, в. Средняя относительная

разность изменяется от 2,8 до $-0,5\%$. Максимальная же по всем полетам лежит в диапазоне от 7,8 до 1,2%, минимальная — от $-0,4$ до $-3,4\%$. Это значительно больше, чем требуется в [1–3]. Очевидно, что применяемая в алгоритме модель нуждается в корректировке [27, 28].

2.4. Диоксид углерода

В [27, 28] мы также обращали внимание на то, что используемые модели вертикального распределения CO_2 нуждаются в корректировке. В подтверждение этих слов приведем рис. 7, на котором представлены профили CO_2 , измеренные на СМЛ и восстановленные по данным IASI 6 августа 2012 г.

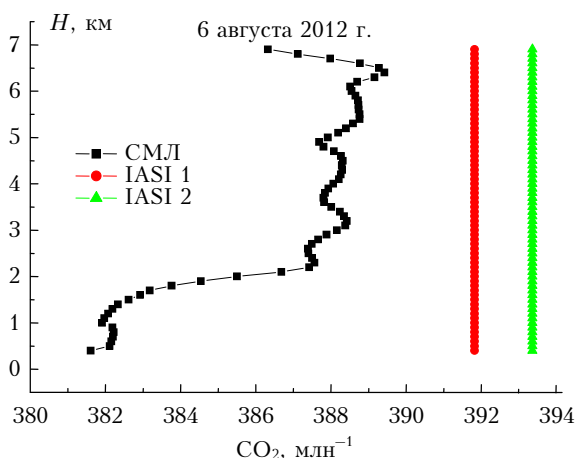


Рис. 7. Вертикальное распределение диоксида углерода над Югом Западной Сибири

Из рис. 7 видно, что профили, полученные прибором IASI, не только не отражают вертикальную изменчивость концентрации CO_2 , но и дают завышенные значения по сравнению с фактически наблюдаемыми.

Осреднение профилей не спасает ситуацию (рис. 8). Данные рис. 8, а, представляющие средние по всем полетам профили, показывают, что в самых нижних слоях прибор IASI занижает концентрацию CO_2 на несколько млн^{-1} . Выше пограничного слоя, наоборот, примерно на такую же величину завышает. При этом спутниковый профиль ни в какой мере не соответствует фактически наблюдаемому.

При переходе к средним различиям между профилями, полученными на СМЛ и прибором IASI (рис. 8, б), можно увидеть парадокс: средняя разница $(\text{СМЛ} - \text{IASI})$ лежит в коридоре $\pm 1,5 \text{ млн}^{-1}$. В этом смысле правы авторы [2, 3], которые при осреднении по большой площади получили такие же оценки.

Максимальные и минимальные разности по всем полетам дают большую величину, а именно: в пограничном слое атмосферы 10 и -12 млн^{-1} соответственно. Причем они значительно уменьшаются уже на верхней границе погранслоя, где составляют -4 и 4 млн^{-1} . Они несколько возрастают на уровне 6–7 км до $\pm 6 \text{ млн}^{-1}$.

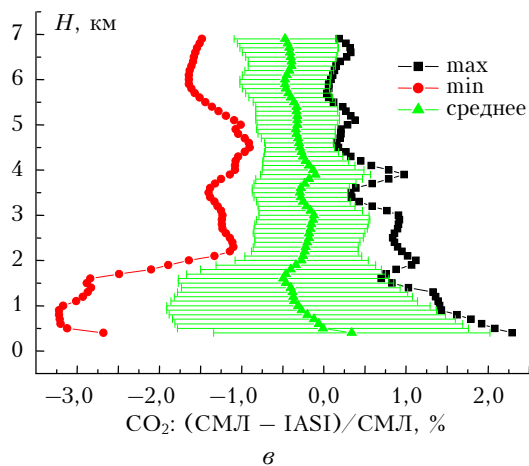
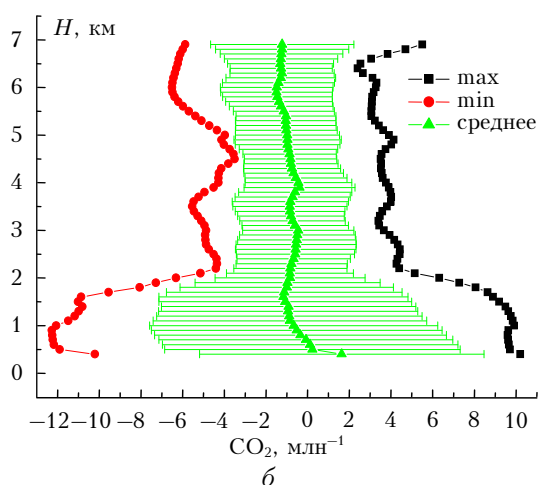
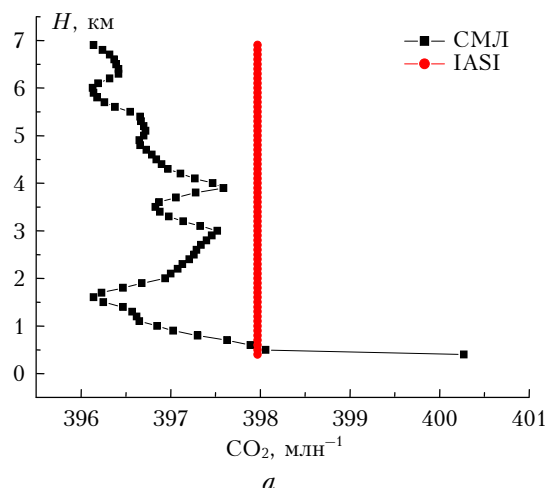


Рис. 8. Средние вертикальные профили диоксида углерода и их различия: а — средние профили; б — различия СМЛ — IASI в абсолютных единицах; в — относительные разности $(\text{СМЛ} - \text{IASI})/\text{СМЛ}$

Нормировка разности на абсолютное значение дает среднюю величину отклонения $\pm 0,5\%$, что вполне допустимо по требованиям [1–3]. При этом максимальные и минимальные относительные отклонения по всем полетам составляют 2,3 и $-3,3\%$ в пограничном слое соответственно. Выше пограничного слоя относительные отклонения уменьшаются до

$\pm 1,0\%$. Причем при несимметричных средних профилях наблюдается симметричное отклонение в разности концентраций, полученных на борту СМЛ и прибором IASI. Это, на наш взгляд, еще один парадокс, который появляется при измерениях CO_2 спутниковым зондировщиком IASI.

Заключение

Таким образом, проведенный анализ показал, что абсолютные разности концентраций озона, полученных на СМЛ и прибором IASI, могут изменяться от 3 до 18 млрд⁻¹ на высоте 0,5 км и от -8 до -38 млрд⁻¹ на высоте 7 км. Относительные разности находятся в диапазоне 8% ... +30% на уровне 0,5 км и -12 ... 88% на уровне 7 км. Полученные нами различия значительно больше, чем приведенные в [11, 23, 24].

Сравнение профилей CO показало, что абсолютные различия концентрации CO (СМЛ - IASI) могут изменяться от 32 до 103 млрд⁻¹ на высоте 0,5 км и от -18 до 23 млрд⁻¹ на высоте 3 км. Относительные разности находятся в диапазоне 4 ... 48% на высоте 0,5 км и -8 ... 20% на высоте 7 км.

Максимальная разность по данным всех профилей метана достигает в пограничном слое 150 млрд⁻¹, а минимальная -10 млрд⁻¹. Максимальная и минимальная разности в средней тропосфере вблизи уровня 4 км составляют 60 и -63 млрд⁻¹ соответственно. Средняя относительная разность изменяется от 2,8 до -0,5%. Максимальная по всем полетам находится в диапазоне от 7,8 до 1,2%, минимальная - от -0,4 до -3,4%.

При сопоставлении концентрации CO_2 наблюдается парадокс, который состоит в следующем. Средняя разность лежит в коридоре $\pm 1,5$ млн⁻¹, в то время как индивидуальные профили несопоставимы. Максимальные и минимальные разности по всем полетам дают большую величину, а именно: в пограничном слое атмосферы 10 и -12 млн⁻¹ соответственно. Причем они значительно уменьшаются уже на верхней границе погранслоя, где составляют -4 и 4 млн⁻¹, и несколько возрастают на уровне 6-7 км до ± 6 млн⁻¹. Максимальные и минимальные относительные отклонения по всем полетам составляют 2,3 и -3,3% в пограничном слое соответственно. Выше пограничного слоя относительные отклонения уменьшаются до $\pm 1,0\%$.

Исследования проведены в рамках Международной ассоциированной лаборатории «МАЛ ЯК-АЭРОСИБ» при поддержке Национального центра научных исследований Франции и РФФИ, Фонда глобальных исследований окружающей среды для Национальных институтов Министерства окружающей среды Японии, программы Президиума РАН № 4, программы ОНЗ РАН № 5, междисциплинарных интеграционных проектов СО РАН № 35, 70 и 131, грантов РФФИ № 11-05-00470, 11-05-00516, 11-05-93116 и 11-05-93118, госконтрактов Минобрнауки № 11.519.11.5009, 11.518.11.7045, 14.515.11.0030 и 8325.

1. 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.
2. 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.
3. 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.
4. Поляков А.В., Тимофеев Ю.М., Успенский А.Б. Возможности определения содержания озона и малых газовых составляющих по данным спутниковых ИК-зондировщиков высокого спектрального разрешения (ИКФС-2) // Исслед. Земли из космоса. 2010. № 3. С. 3-11.
5. Поляков А.В., Тимофеев Ю.М., Успенский А.Б. Температурно-влажностное зондирование атмосферы по данным спутникового ИК-зондировщика высокого спектрального разрешения ИКФС-2 // Исслед. Земли из космоса. 2009. № 5. С. 5-10.
6. Поляков А.В., Тимофеев Ю.М., Косцов В.С. Спутниковое температурное зондирование атмосферы в облачных условиях // Исслед. Земли из космоса. 2012. № 5. С. 37-42.
7. Сафронов А.Н., Фокеева Е.В., Ракитин В.С., Юрганов Л.Н., Гречко Е.И. Эмиссия окиси углерода летом 2010 г. в Центральной части Среднерусской равнины и оценка их неопределенности при использовании различных карт растительности // Исслед. Земли из космоса. 2012. № 4. С. 30-46.
8. Крамчинова Е.К., Успенский А.Б. Мониторинг общего содержания озона в атмосфере по данным российского геостационарного метеоспутника «Электро-Л» // Исслед. Земли из космоса. 2013. № 2. С. 37-42.
9. Поляков А.В., Тимофеев Ю.М., Walker К.А. Сравнение спутниковых и наземных измерений содержания фтористого водорода в атмосфере // Исслед. Земли из космоса. 2012. № 4. С. 57-61.
10. 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., Khattatov B., Lamarque J.-F., Law K.S., Nédélec P., Paris J.-D., Podolske J.R., Prunet P., Schlager H., Szopa 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.
11. Pommier M., Clerbaux C., Law K.S., Ancellet G., Bernath P., Coheur P.-F., Hadji-Lazaro J., Hurtmans D., Nédélec P., Paris J.-D., Ravetta F., Ryerson T.B., Schlager H., Weinheimer A.J. Analysis of IASI tropospheric O₃ data over the Arctic during POLARCAT campaigns in 2008 // Atmos. Chem. Phys. 2012. V. 12, N 16. P. 7371-7389.
12. de Laat T.J., Dijkstra R., Schrijver H., Nédélec P., Aben I. Validation of six years of SCIAMACHY carbon monoxide observations using MOZAIC CO profile measurements // Atmos. Measur. Technol. 2012. V. 5, N 9. P. 2133-2142.
13. De Wachter E., Barret B., Le Flochmön E., Pavellin E., Matricardi M., Clerbaux C., Hadji-Lazaro J., George M., Hurtmans D., Coheur P.-F., Nédélec P., Cammas J.P. Retrieval of MetOp-A/IASI CO profiles

- and validation with MOZAIC data // *Atmos. Measur. Technol.* 2012. V. 5, N11. P. 2843–2857.
14. *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. 2003–2012.
 15. *Зуев В.Е., Белан Б.Д., Кабанов Д.М., Ковалевский В.К., Лукьянов О.Ю., Мелишкин В.Е., Миклушев М.К., Панченко М.В., Пеннер И.Э., Покровский Е.В., Сакерин С.М., Терпугова С.А., Тумаков А.Г., Шаманаев В.С., Щербатов А.И.* Самолет-лаборатория Ан-30 «Оптик-Э» для экологических исследований // *Оптика атмосф. и океана.* 1992. Т. 5, № 10. С. 1012–1021.
 16. *Antokhin P.N., Arshinov M.Yu., Belan B.D., Davydov D.K., Zhidovkin E.V., Ivlev G.A., Kozlov A.V., Kozlov V.S., Panchenko M.V., Penner I.E., Pestunov D.A., Simonenkov D.V., Tolmachev G.N., Fofonov A.V., Shamaev V.S., Shmargunov V.P.* Optik-É AN-30 aircraft laboratory: 20 years of environmental research // *Atmos. and Ocean. Technol.* 2012. V. 29, N 11. P. 64–75.
 17. *Анохин Г.Г., Антохин П.Н., Аршинов М.Ю., Барсук В.Е., Белан Б.Д., Белан С.Б., Давыдов Д.К., Ивлев Г.А., Козлов А.В., Козлов В.С., Морозов М.В., Панченко М.В., Пеннер И.Э., Пестунов Д.А., Сиков Г.П., Симоненков Д.В., Синицын Д.С., Толмачев Г.Н., Филиппов Д.В., Фофанов А.В., Чернов Д.Г., Шаманаев В.С., Шмаргунов В.П.* Самолет-лаборатория Ту-134 «Оптик» // *Оптика атмосф. и океана.* 2011. Т. 24, № 9. С. 805–816.
 18. *Nédélec P., Cammas J.P., Thouret V., Athier G., Cousin J.M. et al.* An improved infrared carbon monoxide analyser for routine measurements aboard commercial Airbus aircraft: technical validation and first scientific results of the MOZAIC III programme // *Atmos. Chem. Phys.* 2003. V. 3, N 5. P. 1551–1564.
 19. *Arshinov M.Yu., Belan B.D., Krasnov O.A., Kovalevskii V.K., Pirogov V.A., Plotnikov A.P., Tolmachev G.N., Fofonov A.V.* Comparison of ultraviolet and chemiluminescent ozonometers // *Atmos. Oceanic Opt.* 2002. V. 15, N 8. P. 656–658.
 20. *Dunlea E.J., Herndon S.C., Nelson D.D., Volkamer R.M., Lamb B.K., Allwine E.J., Grutter M., Ramos Villegas C.R., Marquez C., Blanco S., Cardenas B., Kolb C.E., Molina L.T., Molina M.J.* Technical note: Evaluation of standard ultraviolet absorption ozone monitors in a polluted urban environment // *Atmos. Chem. Phys.* 2006. V. 6, N 10. P. 3163–3180.
 21. *Crevoisier C., Chédin A., Matsueda H., Machida T., Armante R., Scott N.A.* First year of upper tropospheric integrated content of CO₂ from IASI hyperspectral infrared observations // *Atmos. Chem. Phys.* 2009. V. 9, N 14. P. 4797–4810.
 22. *August T., Klaes D., Schlüssel P., Hultberg T., Crapeau M., Arriaga A., O’Carroll A., Coppens D., Munro R., Calbet X.* IASI on Metop-A: Operational Level 2 retrievals after five years in orbit // *J. Quant. Spectrosc. and Radiat. Transfer.* 2012. V. 113, N 11. P. 1340–1371. doi:10.1016/j.jqsrt.2012.02.028.
 23. *Parrington M., Palmer P.I., Henze D.K., Tarasick D.W., Hyer E.J., Owen R.C., Helmig D., Clerbaux C., Bowman K.W., Deeter M.N., Barratt E.M., Coheur P.-F., Hurtmans D., Jiang Z., George M., Worden J.R.* The influence of boreal biomass burning emissions on the distribution of tropospheric ozone over North America and the North Atlantic during 2010 // *Atmos. Chem. Phys.* 2012. V. 12, N 4. P. 2077–2098.
 24. *Zyryanov D., Foret G., Eremenk M.O., Beekmann M., Cammas J.-P., D’Isidoro M., Elbern H., Flemming J., Friese E., Kioutsioutkis I., Maurizi A., Melas D., Meleux F., Menut L., Moinat P., Peuch V.-H., Poupkou A., Razinger M., Schultz M., Stein O., Suttie A.M., Valdebenito A., Zerefos C., Dufour G., Bergametti G., Flaud J.-M.* 3-D evaluation of tropospheric ozone simulations by an ensemble of regional Chemistry Transport Model // *Atmos. Chem. Phys.* 2012. V. 12, N 7. P. 3219–3240.
 25. *Белан Б.Д., Толмачев Г.Н., Фофанов А.В.* Вертикальное распределение озона в тропосфере над югом Западной Сибири // *Оптика атмосф. и океана.* 2010. Т. 23, № 9. С. 777–783.
 26. *Антохин П.Н., Белан Б.Д.* Регулирование динамики тропосферного озона через стратосферу // *Оптика атмосф. и океана.* 2012. Т. 25, № 10. С. 890–895.
 27. *Белан Б.Д., Креков Г.М.* Влияние антропогенного фактора на содержание парниковых газов в тропосфере. Метан // *Оптика атмосф. и океана.* 2012. Т. 25, № 4. С. 361–373.
 28. *Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Давыдов Д.К., Креков Г.М., Фофанов А.В., Бабченко С.В., Inoue G., Machida T., Maksutov Sh., Sasakawa M., Shimoyama K.* Динамика вертикального распределения парниковых газов в атмосфере // *Оптика атмосф. и океана.* 2012. Т. 25, № 12. С. 1051–1061.

M.Yu. Arshinov, S.V. Afonin, B.D. Belan, V.V. Belov, Yu.V. Gridnev, D.K. Davydov, T. Machida, Ph. Nédélec, J.-D. Paris, A.V. Fofonov. **Comparison of satellite and aircraft measurements of gas composition in troposphere above the South of West Siberia.**

A comparison of the vertical profiles concentrations of O₃, CO, CO₂, and CH₄ measured with the help of flying laboratory Tu-134 “Optic” (SML) and recovered according to the instrument IASI satellite MetOP is performed. The comparison showed that the absolute difference between the concentration of ozone SML – IASI may vary from 3 to 18 ppb, at a height of 0.5 km and from –8 to –38 ppb 7 km. The relative differences are in the range of 8–30% at 0.5 km and 12–88% at 7 km. For profiles of CO an absolute difference between the concentration of CO SML – IASI can vary from 32 to 103 ppb at an altitude of 0.5 km and from –18 to 23 ppb at 3 km. The relative difference are in the range –4–48% at 0.5 km and –8–20% at 7 km. Maximum difference of methane profiles in the boundary layer reaches 150 ppb, and the minimal one –10 ppb. The average relative difference varies from +2.8 to –0.5%. Maximal and minimal profiles for all flights are in range from 7.8 to 1.2%. Minimum, from –0.4 to –3.4%. The average difference between SML – IASI is in the range ±1.5 ppm, while the individual profiles are not comparable. The maximum and minimum differences for all flights are high, namely, in the atmospheric boundary layer 10 and –12 ppm, respectively. The maximum and minimum relative deviations for all flights are +2.3 and –3.3% in the boundary layer, respectively. Above the boundary layer relative deviations are reduced to ±1.0%.