

ОПТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И БАЗЫ ДАННЫХ ОПТИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ
ОБ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЕ

УДК 551.510:551.501.86

**Сравнение распределения концентраций газовых примесей
воздуха, измеренных дистанционными и контактными
средствами над Российским сектором Арктики**

О.Ю. Антохина¹, П.Н. Антохин¹, В.Г. Аршинова¹, М.Ю. Аршинов¹,
Б.Д. Белан¹, С.Б. Белан¹, В.В. Белов¹, Ю.В. Гриднев¹, Д.К. Давыдов¹,
Г.А. Ивлев¹, А.В. Козлов¹, К.S. Law², Ph. Nédélec³, J.-D. Paris⁴,
Т.М. Рассказчикова¹, Д.Е. Савкин¹, Д.В. Симоненков¹, Т.К. Складнева¹,
Г.Н. Толмачев¹, А.В. Фофонов^{1*}

¹Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1, Россия

²Лаборатория атмосферы, сред, космических наблюдений
UPMC Univ. Paris 06, Université Versailles St-Quentin, CNRS/INSU,
UMR 8190, LATMOS-IPSL, Paris, France

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

⁴Лаборатория исследования климата и окружающей среды
Unite mixte CEA-CNRS, Bat. 709, CE L'Orme des Merisiers, 91191 Gif sur Yvette, France

Поступила в редакцию 22.09.2017 г.

Сравниваются данные самолетного и спутникового зондирования на границе континент–океан в районе Карского моря, полученные в октябре 2014 г. Использовано 11 синхронно измеренных профилей над континентальной частью и 7 над океаном. Оказалось, что для CH_4 и CO_2 характерно завышение спутником концентраций в слое 0–8 км над континентальной частью Арктического региона и занижение над океаном. Завышение спутником концентрации метана над континентом составляет 28 млрд⁻¹ в пограничном слое и резко возрастает в средней (182 млрд⁻¹) и верхней (113 млрд⁻¹) тропосфере. Занижение над океаном составляет в среднем 37 млрд⁻¹ в пограничном слое, 73 и 71 млрд⁻¹ – в средней и верхней тропосфере. Над континентом различие в концентрациях CO_2 , измеренных разными приборами, составляет в среднем в пограничном слое 18,2 млн⁻¹ и может изменяться от 3,2 до 26,5 млн⁻¹. В средней тропосфере (4 км) средние различия уменьшаются до 10,8 млн⁻¹. При этом диапазон различий даже несколько увеличивается: 0,6–25,5 млн⁻¹. В верхней тропосфере (8 км) средняя разница в показаниях обоих приборов уменьшается до 2,8 млн⁻¹. Над океаном занижение по амплитуде оказывается больше. При этом для CO и O_3 сопоставление дало приемлемые результаты.

Ключевые слова: Арктика, атмосфера, воздух, вертикальное распределение, газы, дистанционное зондирование; Arctic, atmosphere, air, vertical distribution, gases, remote sensing.

Введение

Более быстрый рост температуры воздуха в Арктическом регионе [1, 2], по сравнению с другими районами земного шара, требует повышенного внимания к контролю состояния его окружающей

среды. Повышение температуры на этой территории связывают с изменением состава воздуха [3, 4]. Отсутствие же сети наблюдательных станций на значительной части Арктического региона не позволяет проводить мониторинг состава воздуха в классическом понимании. Частично пробел в данных

* Ольга Юрьевна Антохина (antokhina@iao.ru); Павел Николаевич Антохин (arp@iao.ru); Виктория Геннадьевна Аршинова (arvi@iao.ru); Михаил Юрьевич Аршинов (michael@iao.ru); Борис Денисович Белан (bbd@iao.ru); Сергей Борисович Белан (bsb@iao.ru); Владимир Васильевич Белов (belov@iao.ru); Юрий Владимирович Гриднев (yuri@iao.ru); Денис Константинович Давыдов (denis@iao.ru); Георгий Алексеевич Ивлев (ivlev@iao.ru); Артем Владими-

рович Козлов (artem@iao.ru); Katharine Saran Law (kathy.law@latmos.ipsl.fr); Philippe Nédélec (nedp@aero.obs-mip.fr); Jean-Daniel Paris (jean-daniel.paris@lsce.ipsl.fr); Татьяна Михайловна Рассказчикова (rtm@iao.ru); Денис Валентинович Симоненков (simon@iao.ru); Денис Евгеньевич Савкин (sde@iao.ru); Татьяна Константиновна Складнева (tatyana@iao.ru); Геннадий Николаевич Толмачев (tgn@ipc.tsc.ru); Александр Владиславович Фофонов (alenfo@iao.ru).

покрывается за счет измерений в приземном (приземном) слое воздуха на дрейфующих станциях [5, 6] или с борта научно-исследовательских судов [7–9]. Вертикальное распределение примесей исследуется с помощью самолетов-лабораторий [10–13]. Однако такие измерения, хотя и имеют комплексный характер, являются эпизодическими и не позволяют оценить долговременные изменения состава воздуха.

Решение проблемы мониторинга состава воздуха в Арктическом регионе, как и в других удаленных точках земного шара, связывают с развитием систем спутникового зондирования. Согласно обзору [14] в 2017 г. функционировали 15 типов космических аппаратов, измеряющих аэрозольный и газовый состав воздуха. Однако пока точность спутниковых измерений недостаточна [15], поэтому требуется совершенствование как аппаратной, так и методической составляющих этого способа зондирования [16, 17].

Для поиска ошибок в измерениях той или иной примеси воздуха со спутника используется метод сравнения с данными, полученными другими методами. Например, для водяного пара сопоставление осуществляется с радиозондами, для озона — с озонзондами. Спутниковые профили для других газов и аэрозоля чаще всего сопоставляют с результатами самолетного зондирования [18–22]. Такие сравнительные данные позволяют выявить погрешности измерений и скорректировать методику восстановления профилей газов и аэрозоля или определить требования к улучшению технических характеристик самих приборов.

В настоящей работе проводится сравнение данных самолетного и спутникового зондирования на границе континент–океан в районе Карского моря.

Использованные данные

Данные были получены в октябре 2014 г. на самолете-лаборатории Ту-134 «Оптик» (СМЛ) в районе г. Салехарда и над акваторией Карского моря. Полное описание эксперимента, приборов, синоптической ситуации приведены в [23].

В качестве спутниковых данных использовались результаты измерений прибора IASI (Infrared Atmospheric Sounding Interferometer) спутника MetOp. Восстановление профилей осуществлялось по стандартной методике [24–26].

Для сопоставлений отбирались спутниковые профили, которые совпадали по координатам с данными расположения СМЛ и по времени ± 1 ч от момента набора высоты или снижения самолета (всего 11 над континентом и 7 над океаном).

Результаты сопоставления и их обсуждение

В отличие от ранее выполненных аналогичных сравнений самолетных и спутниковых данных [27, 28] анализ результатов сопоставления для Арктического региона выявил ряд полярных расхождений. Поэтому анализ данных проводится от-

дельно для континента и океана. Все случаи совпадения по времени и пространству самолетных и спутниковых профилей в дальнейшем делились на три группы. К первой относились те, в которых профили совпадали более чем на половине высотного диапазона (рис. 1, а; в таблицах — «совпадение»). Во вторую группу включались случаи, когда концентрация газов, восстановленная по спутниковым данным, была выше, чем измеренная с борта

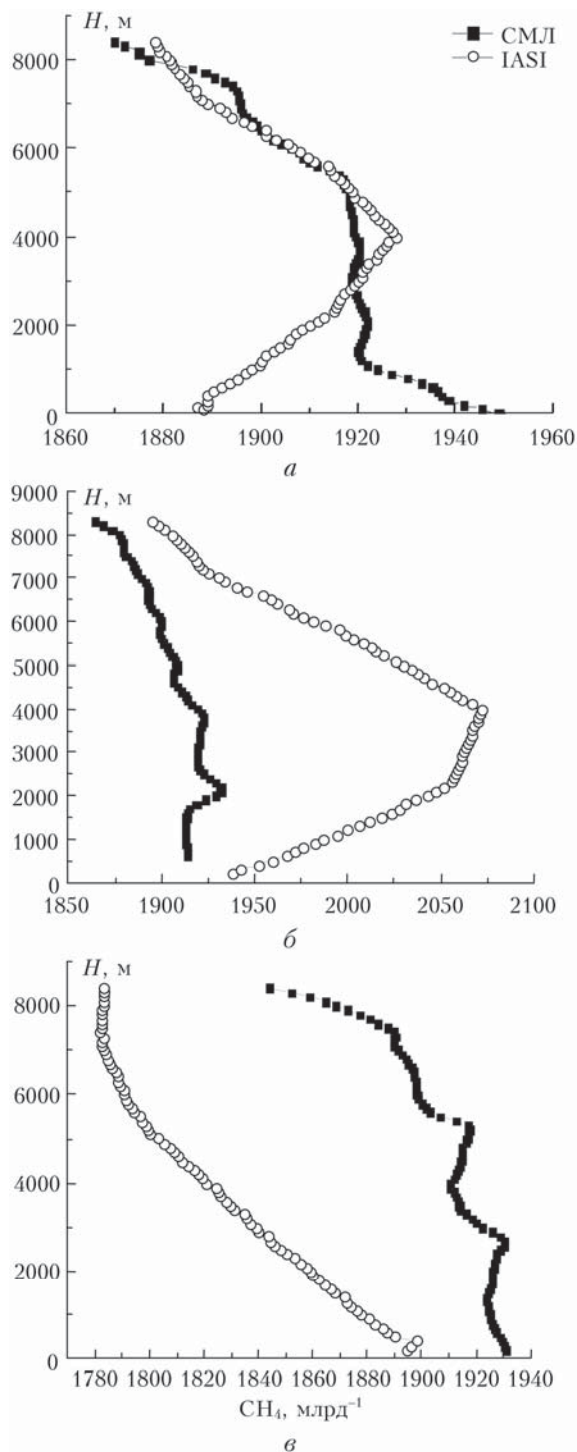


Рис. 1. Вертикальное распределение CH_4 по данным СМЛ и IASI над континентом (а, б) и океаном (в)

самолета, во всем рассматриваемом высотном диапазоне (рис. 1, б; в таблицах – «IASI выше»). В третью группу попали случаи превышения концентрации газов во всем высотном диапазоне по самолетным измерениям (рис. 1, в; в таблицах – «СМЛ выше»).

Распределение по группам вертикальных профилей концентраций CH_4 в зависимости от характера подстилающей поверхности приведено в табл. 1.

Таблица 1

Распределение профилей CH_4 , в которых концентрации были близки или завышены по данным СМЛ или IASI

Поверхность	Совпадение	IASI выше	СМЛ выше	Всего
Континент	4	4	3	11
Океан	0	0	7	7

Из табл. 1 следует, что над континентом почти одинаково вероятны близость спутниковых и самолетных профилей (четыре случая), превышение концентраций, восстановленных из космических данных, над самолетными (четыре), и наоборот – самолетных над спутниковыми (три). Насколько различия между разными способами зондирования могут быть существенны, показано в табл. 2. Из рис. 1 видно, что расхождение между концентрациями, полученными разными методами, заметно изменяется по высоте, поэтому в табл. 2 расчеты и выборки сделаны для трех уровней: 0,2; 4,0 и 8,0 км.

Данные табл. 2 показывают, что над континентом различия в концентрациях могут достигать 113 млрд^{-1} в пограничном слое атмосферы, 204 млрд^{-1} – в средней и 142 млрд^{-1} – в верхней тропосфере. Средние отклонения, оцененные для разных групп, выявляют несимметричность. Завы-

шение спутником составляет 28 млрд^{-1} в пограничном слое и резко возрастает в средней (182 млрд^{-1}) и верхней (113 млрд^{-1}) тропосфере. Занижение оказывается значительно меньше: 26, 58 и 45 млрд^{-1} соответственно. Полученные отклонения между данными IASI и СМЛ больше, чем результаты [29, 30] для внеарктических районов.

Над океаном все семь случаев сопоставления показывают занижение концентрации CH_4 спутниковым датчиком во всем рассматриваемом высотном диапазоне. Занижение составляет в среднем 37 млрд^{-1} в пограничном слое, 73 и 71 млрд^{-1} – в средней и верхней тропосфере. Максимальные отклонения достигают 116 млрд^{-1} . Эти величины превышают оценки, выполненные в [31, 32], согласно которым случайная ошибка одного измерения должна составлять $\pm 20 \text{ млрд}^{-1}$. Указанный в этих работах контраст температуры, необходимый для достаточной чувствительности прибора IASI, $> 10 \text{ }^\circ\text{C}$, в наших экспериментах был выше $25 \text{ }^\circ\text{C}$. Следовательно, прибор работал в условиях, превышающих пороговые.

Полярные различия в спутниковых измерениях над континентом и океаном зафиксированы и для CO_2 (табл. 3).

Данные табл. 3 показывают, что над континентом в двух случаях вертикальное распределение CO_2 , измеренное на СМЛ и IASI, совпадало. Для 9 профилей концентрация CO_2 по спутниковому прибору была выше, чем по данным СМЛ. Над океаном, наоборот, более высокие концентрации фиксировались СМЛ в пяти случаях. И только в двух случаях содержание CO_2 было выше по данным IASI.

Типичные вертикальные распределения CO_2 , измеренные обоими приборами над континентом и океаном, приведены на рис. 2.

Таблица 2

Различия в концентрациях CH_4 , измеренных на СМЛ и IASI, млрд^{-1}

Поверхность	Высота, км	Совпадение		IASI выше		СМЛ выше		Суммарно	
		Среднее	Диапазон	Среднее	Диапазон	Среднее	Диапазон	Среднее	Диапазон
Континент	0,2	55	0–113	28	24–58	26	24–27	36	0–113
	4,0	24	0–50	182	160–204	58	43–81	88	0–204
	8,0	25	20–31	113	61–142	45	20–74	61	20–142
Океан	0,2					37	25–54	37	25–54
	4,0					73	57–102	73	57–102
	8,0					71	54–116	71	54–116

Таблица 3

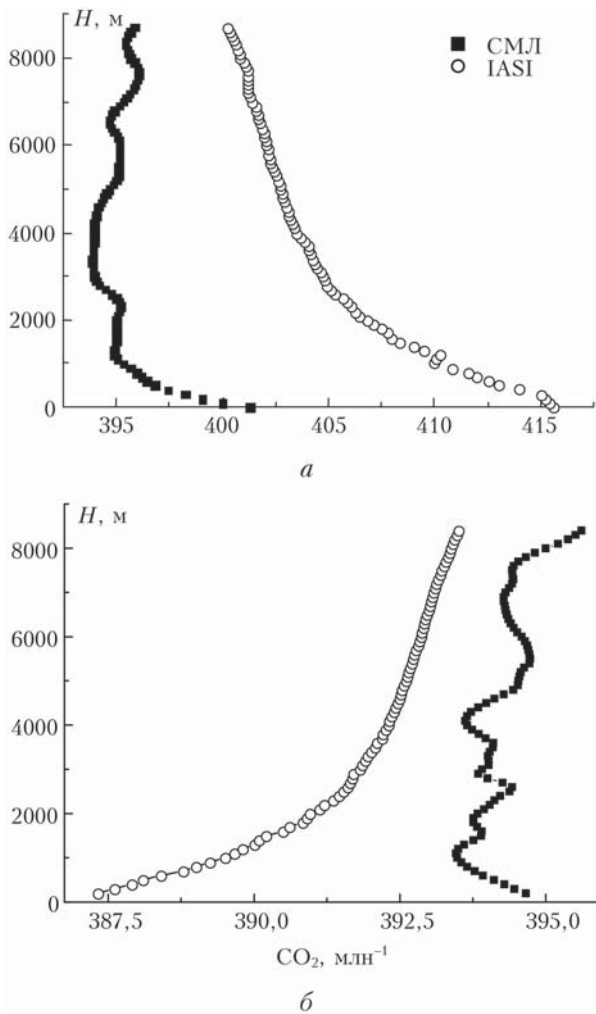
Распределение профилей CO_2 , в которых концентрации были близки или завышены по данным СМЛ или IASI

Поверхность	Совпадение	IASI выше	СМЛ выше	Всего
Континент	2	9	0	11
Океан	0	2	5	7

Рис. 2 показывает, что характер изменения концентрации CO_2 с высотой, измеренной СМЛ и восстановленной по данным прибора IASI, подобен. При этом можно видеть существенные различия в концентрациях, особенно в пограничном слое и средней тропосфере. С увеличением высоты различия уменьшаются. О количественных различиях можно судить по табл. 4.

Различия в концентрациях CO₂, измеренных на СМЛ и IASI, млн⁻¹

Поверхность	Высота, км	Совпадение		IASI выше		СМЛ выше		Суммарно	
		Среднее	Диапазон	Среднее	Диапазон	Среднее	Диапазон	Среднее	Диапазон
Континент	0,2	9,9	3,2–16,7	20,0	4,1–26,5	0	0	18,2	3,2–26,5
	4,0	4,7	0,6–8,8	12,1	6,6–25,5	0	0	10,8	0,6–25,5
	8,0	2,5	0,8–4,2	8,1	2,8–15,4	0	0	2,8	0,8–15,4
Океан	0,2	0	0	14,6	3,9–25,3	21,9	7,5–30,6	19,8	3,9–30,6
	4,0	0	0	9,8	2,1–17,5	13,6	1,7–28,7	12,5	1,7–28,7
	8,0	0	0	5,8	1,4–10,2	10,7	2,2–19,8	9,3	1,4–19,8

Рис. 2. Вертикальное распределение CO₂ по данным СМЛ и IASI над континентом (а) и океаном (б)

Из табл. 4 следует, что над континентом различия в концентрациях CO₂, измеренных разными приборами, составляют в среднем в пограничном слое 18,2 млн⁻¹ и могут изменяться от 3,2 до 26,5 млн⁻¹. В средней тропосфере (4 км) средние различия уменьшаются до 10,8 млн⁻¹. При этом диапазон различий даже несколько увеличивается: 0,6–25,5 млн⁻¹. В верхней тропосфере (8 км) средняя разница между спутниковыми и самолетными

данными уменьшается до 2,8 млн⁻¹. Также уменьшается и диапазон отклонений: 0,8–15,4 млн⁻¹. Над океаном характер отклонений по высоте сохраняет ту же тенденцию, хотя средние значения и диапазоны несколько больше. Над океаном наблюдается, также как и у CH₄, асимметрия в отклонениях между спутниковыми и самолетными данными.

Высотная зависимость различий в показаниях СМЛ и IASI, скорее всего, обусловлена тем, что максимумы весовых функций для IASI, определяющих чувствительность прибора, находятся в слое 200–350 гПа [33–35]. Полученные в табл. 4 различия между спутниковыми и самолетными данными для Арктического региона оказались много больше, чем для других регионов [25, 27, 28]. При этом отклонения значительно выше, чем требуемая для моделирования точность в 1% [36].

Несмотря на то что в ряде работ [37–39] указывается на низкую чувствительность датчика IASI к CO в тропосфере, данные рис. 3 и табл. 5 показывают, что в ряде случаев в Арктическом регионе она достаточна для правдоподобного восстановления вертикального распределения концентрации CO.

Из табл. 5 видно, что над континентом спутниковые и самолетные данные близки во всем рассматриваемом слое в семи случаях из 11. Пример такого сопоставления показан на рис. 3, а. В двух случаях IASI явно завышал содержание CO (рис. 3, б), в двух — занижал.

Таблица 5

Распределение профилей CO, в которых концентрации были близки или завышены по данным СМЛ или IASI

Поверхность	Совпадение	IASI выше	СМЛ выше	Всего
Континент	7	2	2	11
Океан	3	0	4	7

Над океаном совпадение показаний наблюдается в трех случаях. В четырех случаях, по-видимому, у прибора IASI недостаточно чувствительность в нижней тропосфере [37–39]. Пример таких профилей приведен на рис. 3, в. Видно, что до высоты 3,7 км данные IASI равняются нулю. Выше 4,5 км значения концентраций почти сравниваются. Количественные характеристики сравнения приведены в табл. 6.

Различия в концентрациях CO, измеренных на СМЛ и IASI, млрд⁻¹

Поверхность	Высота, км	Совпадение		IASI выше		СМЛ выше		Суммарно	
		Среднее	Диапазон	Среднее	Диапазон	Среднее	Диапазон	Среднее	Диапазон
Континент	0,2	18,0	3–44	21,5	13–30	25,0	18–32	19,9	3–44
	4,0	8,4	2–21	23,0	22–24	21,0	18–24	13,4	2–24
	8,0	13,6	0–31	20,0	18–22	9,0	6–12	13,9	0–31
Океан	0,2	28,0	22–32	0	0	98,9	90–92	68,5	22–92
	4,0	3,7	0–6	0	0	50,5	15–68	30,4	0–68
	8,0	7,0	2–13	0	0	6,8	0–16	6,9	0–16

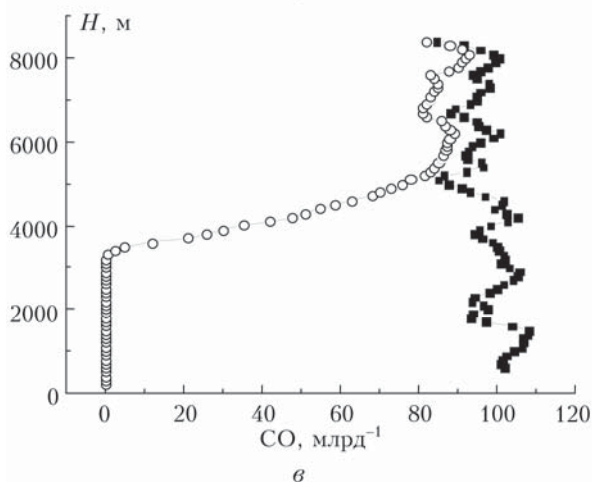
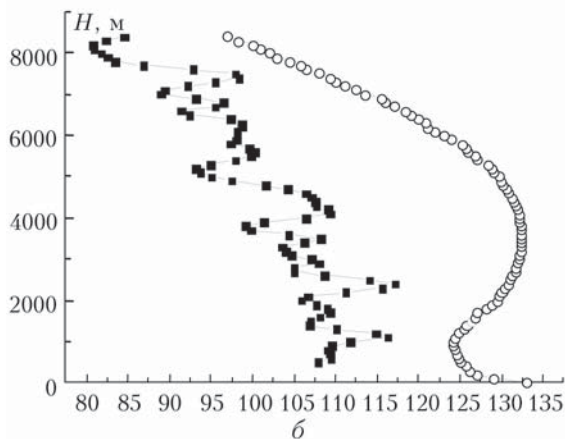
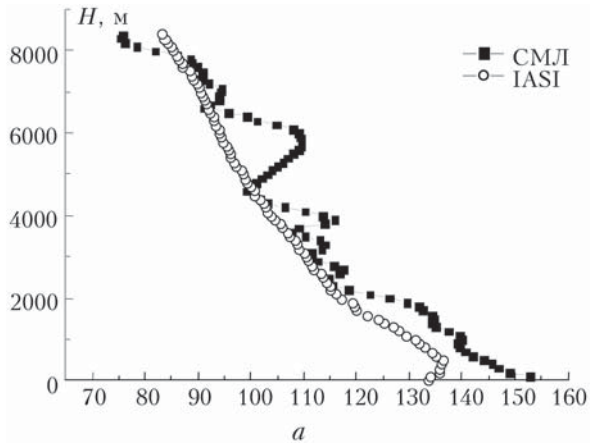


Рис. 3. Вертикальное распределение CO над континентом (а, б) и океаном (в)

Данные табл. 6 показывают, что над континентом различия в концентрациях CO составляют в среднем 19,9 млрд⁻¹ в пограничном слое атмосферы, 13,4 млрд⁻¹ — в средней и 13,9 млрд⁻¹ — в верхней тропосфере. Максимальные отклонения достигают 44, 24 и 31 млрд⁻¹ соответственно. Над океаном из-за недостаточной чувствительности в нижней тропосфере различия значительно больше. В среднем в пограничных слоях они составляют 68,5 млрд⁻¹, в средней тропосфере — 30,4 млрд⁻¹ и 6,9 млрд⁻¹ — в верхней. В литературе пока не удалось обнаружить подобных сопоставлений. Тем не менее представляется возможным использовать прибор IASI для контроля вертикального распределения CO в Арктическом регионе, по крайней мере над континентальными участками.

В отличие от рассмотренных выше газов для O₃ имеется больше работ, посвященных сопоставлению его измерений прибором IASI с озонозондами и другими способами [40–45]. В них показано, что точность восстановления профилей O₃ соизмерима с данными иных методов.

Подобные выводы можно сделать и при сопоставлении данных IASI и СМЛ в Арктическом регионе (рис. 4, табл. 7).

Таблица 7

Распределение профилей O₃, в которых концентрации были близки или превышены по данным СМЛ или IASI

Поверхность	Совпадение	IASI выше	СМЛ выше	Всего
Континент	9	2	0	11
Океан	7	0	0	7

На рис. 4 видно, что вертикальные профили O₃, измеренные разными способами, совпадают в большинстве случаев как над континентом (рис. 4, б), так и над океаном (рис. 4, в). Из 18 рассматриваемых профилей совпадение зафиксировано для 16 (табл. 7). В двух случаях имеются расхождения (рис. 4, а), которые наблюдаются в основном в средней и верхней тропосфере.

Подобные результаты для полярных районов получены и в ряде зарубежных работ [46–48]. Такое совпадение происходит по двум причинам. Во-первых, как показали наши предыдущие исследования [23, 49–51], в Российском секторе Арктики, особенно в осенний период, не происходит фотохи-

мической генерации O_3 . Во-вторых, в период эксперимента в регионе поверхность континента была покрыта снегом, что отсекает источник озонаобразующих веществ [52]. Водная поверхность, как известно, не является источником их образования. Различия в профилях обусловлены отклонением вертикального распределения за счет понижения тропопаузы, на что указывалось ранее в [23].

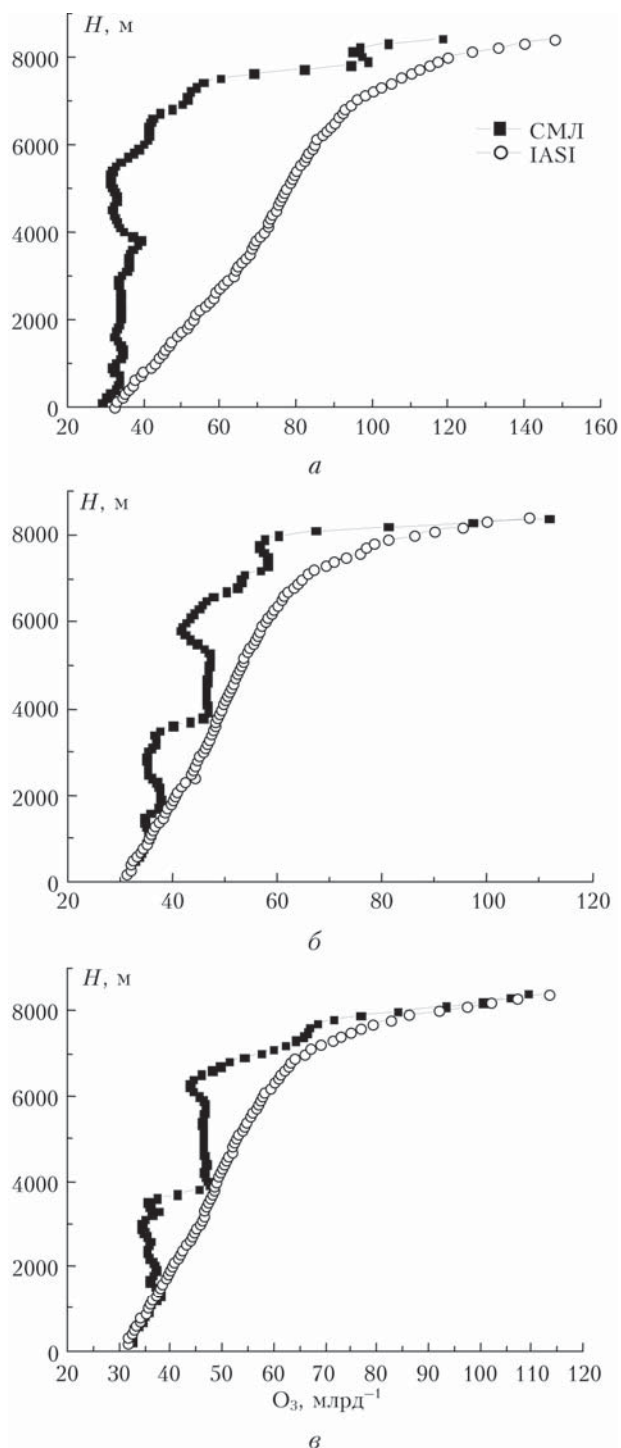


Рис. 4. Вертикальное распределение O_3 над континентом (а, б) и океаном (в)

Следует обратить внимание еще на один аспект. При восстановлении вертикального распределения концентрации O_3 из данных спутниковых измерений важен тип модели, который закладывается в схему обращения. Для умеренных широт, как показано в [27, 28], заложенная модель оказалась далекой от фактического распределения O_3 . Для арктических районов, при отсутствии фотохимической генерации O_3 , модель более адекватно описывает среднее вертикальное распределение O_3 .

Заключение

Проведенное сопоставление вертикальных профилей концентраций CO_2 и CH_4 , измеренных спутниковым прибором IASI и самолетом-лабораторией Ту-134 «Оптик», выявило ряд особенностей. Оказалось, что для обоих газов характерны завышение спутником концентрации в слое 0–8 км над континентальной частью Арктического региона и занижение над океаном. При этом завышение может достигать $26,5 \text{ млн}^{-1}$ для CO_2 и 204 млрд^{-1} для CH_4 .

Несмотря на то что в ряде работ указывается на низкую чувствительность датчика IASI к CO в тропосфере, данные измерений показывают, что над континентом различия в показаниях двух приборов значительно меньше. Над океаном из-за недостаточной чувствительности в нижней тропосфере различия значительно больше. Тем не менее представляется возможным использовать прибор IASI для контроля вертикального распределения CO в Арктическом регионе, по крайней мере, над континентальными участками.

В отличие от рассмотренных выше газов для O_3 из 18 рассматриваемых профилей совпадение зафиксировано для 16. В двух случаях имеются расхождения. Такое совпадение обусловлено более адекватным, применительно к региону, использованием модели и отсутствием фотохимической генерации O_3 в данном районе.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 17-17-01095).

1. Shepherd T.G. Effects of a warming Arctic // Science. 2016. V. 353, N 6303. P. 989–990.
2. Johannessen O.M., Kuzmina S.I., Bobylev L.P., Miles M.W. Surface air temperature variability and trends in the Arctic: New amplification assessment and regionalisation // Tellus A. 2016. V. 68. P. 28234. URL: <http://dx.doi.org/10.3402/tellusa.v68.28234>.
3. Arnold S.R., Law K.S., Brock C.A., Thomas J.L., Starkweather S.M., Salzen K., Stohl A., Sharma S., Lund M.T., Flanner M.G., Petaja T., Tanimoto H., Gamble J., Dibb J.E., Melamed M., Johnson N., Fieder M., Tynkkynen V.-P., Baklanov A., Eckhardt S., Monks S.A., Browse J., Bozem H. Arctic air pollution: Challenges and opportunities for the next decade // Elementa: Sci. Atmos. 2016. N 4. 16 p.
4. Evangeliou N., Balkanski Y., Hao W.M., Petkov A., Silverstein R.P., Corley R., Nordgren B.L., Urbanski S.P., Eckhardt S., Stohl A., Tunved P., Crepinsek S., Jefferson A., Sharma S., Njgaard J.K., Skov H. Wildfires in northern Eurasia affect the budget of black carbon in the Arctic – a 12-year retrospective synopsis

- (2002–2013) // *Atmos. Chem. Phys.* 2016. V. 16, N 12. P. 7587–7604.
5. *Нагурный А.П.* Анализ данных измерений концентрации диоксида углерода в приледном слое атмосферы на ледовой дрейфующей станции «Северный Полюс-35» (2007–2008 гг.) // *Метеорол. и гидрол.* 2010, № 9. С. 55–61.
 6. *Нагурный А.П., Макитас А.П.* Концентрация метана в пограничном слое атмосферы по данным измерений на дрейфующих ледовых станциях «Северный полюс-36» и «Северный полюс-39» // *Метеорол. и гидрол.* 2016. № 3. С. 63–71.
 7. *Пунко И.И., Пугач С.П., Семилетов И.П.* Динамика CO₂ на шельфе Восточно-Сибирского моря // *Метеорол. и гидрол.* 2010. № 9. С. 62–73.
 8. *Semiletov I.P., Shakhova N.E., Pipko I.I., Pugach S.P., Charkin A.N., Dudarev O.V., Kosmach D.A., Nishino S.* Space-time dynamics of carbon and environmental parameters related to carbon dioxide emissions in the Buor-Khaya Bay and adjacent part of Laptev Sea // *Biogeosci.* 2013. V. 10, N 9. P. 5977–5996.
 9. *Yu J., Xie Z., Sun L., Kang H., He P., Xing G.* δ¹³C–CH₄ reveals CH₄ variations over oceans from mid-latitudes to the Arctic // *Sci. Rep.* 2015. V. 5, N 13760. 9 p.
 10. *Giamarelou M., Eleftheriadis K., Nyeki S., Torseth K., Biskos G.* Indirect evidence of the composition of nucleation mode atmospheric particles in the high Arctic // *J. Geophys. Res.: Atmos.* 2016. V. 121, N 2. P. 965–975.
 11. *Myhre C.L., Ferre B., Platt M., Silyakova A., Hermansen O., Allen G., Pisso I., Schmidbauer N., Stohl A., Pitt J., Jansson P., Greiner J., Percival C., Fjærraa A.M., O’Shea, Gallagher M., Breton M.L., Bower K.N., Bauguitte S.J.B., Dalsoren S., Vadakkupuliyambatta S., Fisher R.E., Nisbet E.G., Lowry D., Myhre G., Pyle J.A., Cain M., Mienert J.* Extensive release of methane from Arctic seabed west of Svalbard during summer 2014 // *Geophys. Res. Lett.* 2016. V. 43, N 9. P. 4624–4631.
 12. *Quennehen B., Schwarzenboeck A., Schmale J., Schneider J., Sodemann H., Stohl A., Ancellet G., Crumeyrolle S., Law K.S.* Physical properties of pollution aerosol particles transported from North America to Greenland as measured during the POLARCAT summer campaign // *Atmos. Chem. Phys.* 2011. V. 11, N 21. P. 10947–10963.
 13. *Groot Zwaafink C.D., Grythe H., Skov H., Stohl A.* Substantial contribution of northern high-latitude sources to mineral dust in the Arctic // *J. Geophys. Res.: Atmos.* 2016. V. 121, N 23. P. 13678–13697.
 14. *Burrows J.P., Martin R.* Satellite observations of tropospheric trace gases and aerosols. Introduction // *IGAC Newslett.* 2007. N 35. P. 2–7.
 15. *Tollefson J.* Carbon-sensing satellite system faces high hurdles // *Nature (Gr. Brit.).* 2016. V. 533, N 7604. P. 446–447.
 16. *Popkin G.* Commercial space sensors go high-tech // *Nature (Gr. Brit.).* 2017. V. 545, N 7655. P. 397–398.
 17. *Costantino L., Cuesta J., Emili E., Coman A., Foret G., Dufour G., Eremenko M., Chailleux Y., Beekmann M., Flaud J.-M.* Potential of multispectral synergism for observing ozone pollution by combining IASI-NG and UVNS measurements from the EPS-SG satellite // *Atmos. Meas. Tech.* 2017. V. 10, N 4. P. 1281–1298.
 18. *Dupont R., Pierce B., Worden J., Hair J., Fenn M., Hamer P., Natarajan M., Schaack T., Lenzen A., Apel E., Dibb J., Diskin G., Huey G., Weinheimer A., Kondo Y., Knapp D.* Attribution and evolution of ozone from Asian wild fires using satellite and aircraft measurements during the ARCTAS campaign // *Atmos. Chem. Phys.* 2012. V. 12, N 1. P. 169–188.
 19. *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 // *Atmos. Meas. Tech.* 2012. V. 5, N 8. P. 2003–2012.
 20. *Inoue M., Morino I., Uchino O., Miyamoto Y., Saeki T., Yoshida Y., Yokota T., Sweeney C., Tans P.P., Biraud S.C., Machida T., Pittman J.V., Kort E.A., Tanaka T., Kawakami S., Sawa Y., Tsuboi K., Matsueda H.* Validation of XCH₄ derived from SWIR spectra of GOSAT // *Atmos. Meas. Tech.* 2014. V. 7, N 9. P. 2987–3005.
 21. *De Laat A.T.J., Aben I., Deeter M., Nedelec P., Eskes H., Attie J.-L., Ricaud P., Abida R., Amraoui L.E., Landgraf J.* Validation of nine years of MOPITT V5 NIR using MOZIC/IAGOS measurements: Biases and long-term stability // *Atmos. Meas. Tech.* 2014. V. 7, N 11. P. 3783–3799.
 22. *Marey H.S., Hashisho Z., Fu L., Gille J.* Spatial and temporal variation in CO over Alberta using measurements from satellites, aircraft, and ground stations // *Atmos. Chem. Phys.* 2015. V. 15, N 7. P. 3893–3908.
 23. *Антохина О.Ю., Антохин П.Н., Аршинова В.Г., Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Белан С.Б., Давыдов Д.К., Ивлев Г.А., Козлов А.В., Неделек Ф., Париж Ж.-Д., Рассказчикова Т.М., Савкин Д.Е., Симоненков Д.В., Скляднева Т.К., Толмачев Г.Н., Фофанов А.В.* Вертикальное распределение газовых и аэрозольных примесей воздуха над Российским сектором Арктики // *Оптика атмосф. и океана.* 2017. Т. 30, № 12. С. 1043–1052; *Antokhina O.Yu., Antokhin P.N., Arshinova V.G., Arshinov M.Yu., Belan B.D., Belan S.B., Davydov D.K., Ivlev G.A., Kozlov A.V., Nedelec Ph., Rasskazchikova T.M., Savkin D.E., Simonenkov D.V., Sklyadnaya T.K., Tolmachev G.N., Fofonov A.V.* Vertical distributions of gaseous and aerosol admixtures in air over the Russian Arctic // *Atmos. Ocean. Opt.* 2018. V. 31, N 3. P. 300–310.
 24. *August T., Klaer D., Schlüssel P., Hultberg T., Crapeau M., Arriga A., Carroll A.O., Coppens D., Munro R., Calbet X.* IASI on Metop-A: Operational Level 2 retrievals // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer.* 2012. V. 113, N 4. P. 1340–1371.
 25. *Crevoisier C., Chedin 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.
 26. *Crevoisier C., Clerbaux C., Guidard V., Phulpin T., Armante R., Barret B., Camy-Peyret C., Chaboureaud J.-P., Coheur P.-F., Crapeau L., Dufour G., Labonne L., Lavanant L., Hadji-Lazarou J., Herbin H.* Towards IASI-New Generation (IASI-NG): Impact of improved spectral resolution and radiometric noise on the retrieval of thermodynamic, chemistry and climate variables // *Atmos. Meas. Tech.* 2014. V. 7, N 12. P. 4367–4385.
 27. *Аршинов М.Ю., Афонин С.В., Белан Б.Д., Белов В.В., Гриднев Ю.В., Давыдов Д.К., Маида Т., Нэдлек Ф., Париж Ж.-Д., Фофанов А.В.* Сравнение спутниковых и самолетных измерений газового состава в тропосфере над югом Западной Сибири // *Оптика атмосф. и океана.* 2013. Т. 26, № 9. С. 773–782.
 28. *Аршинов М.Ю., Афонин С.В., Белан Б.Д., Белов В.В., Гриднев Ю.В., Давыдов Д.К., Нэдлек Ф., Па-*

- риж Ж.-Д., Фофонов А.В. Сравнение спутниковых и самолетных измерений газового состава в тропосфере над Сибирским регионом в период лесных пожаров 2012 года // Исслед. Земли из космоса. 2014. № 1. С. 72–84.
29. Crevoisier C., Nobileau D., Armante R., Crepeau L., Machida T., Sawa Y., Matsueda H., Schuck T., Thonat T., Pernin J., Scott N.A., Chedin A. The 2007–2011 evolution of tropical methane in the mid-troposphere as seen from space by MetOp-A/IASI // Atmos. Chem. Phys. 2013. V. 13, N 8. P. 4279–4289.
 30. Xiong X., Barnet C., Maddy E.S., Cambacorta A., King T.S., Wofsy S.C. Mid-upper tropospheric methane retrieval from IASI and its validation // Atmos. Meas. Tech. 2013. V. 6, N 9. P. 2255–2265.
 31. Юрганов Л.Н., Лейфер А. Оценки эмиссии метана от некоторых арктических и приарктических районов по данным орбитального интерферометра IASI // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13, № 3. С. 173–183.
 32. Юрганов Л.Н., Лейфер А., Лунд Майр К. Сезонная и межгодовая изменчивость атмосферного метана над морями Северного Ледовитого океана по спутниковым данным // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13, № 2. С. 107–119.
 33. Кухарский А.В., Успенский Ф.Б. Мониторинг содержания диоксида углерода в тропосфере над boreальными экосистемами Сибири // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2010. Т. 7, № 4. С. 204–210.
 34. Кухарский А.В., Успенский Ф.Б. Определение средней концентрации диоксида углерода в тропосфере по данным спутникового ИК-зондировщика высокого спектрального разрешения // Метеорол. и гидрол. 2009. № 4. С. 15–28.
 35. 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 и космоса. 2011. № 1. С. 14–21.
 36. Michalak A.M., Bruhwiler L.M.P., Tans P.P. A geostatistical approach to surface flux estimation of atmospheric trace gases // J. Geophys. Res. 2004. V. 109, iss. D14. P. D14109. DOI:10.1029/2003JD004422.
 37. De Wachter E.D., Barret B., Flochmoen E.L., Pavelin E., Matricardi M., Clerbaux C., Hadji-Lazaro J., George M., Hurtmans D., Coheur P.F., Nedelec P., Cammas J.P. Retrieval of MetOp-A/IASI CO profiles and validation with MOZART // Atmos. Meas. Tech. 2012. V. 5, N 11. P. 2843–2857.
 38. Boynard A., Clerbaux C., Clarisse L., Safieddine S., Pommier M., Damme M.V., Bauduin S., Oudot C., Lazaro J.H. First simultaneous space measurements of atmospheric pollutants in the boundary // Geophys. Res. Lett. 2014. V. 41, N 2. P. 645–651.
 39. Garcia O.E., Sepulveda E., Schneider M., Hase F., August T., Blumenstock T., Munro R., Comez-Pelaez A.J., Hultberg T., Redondas A., Barthlott S., Wiegeler A., Gonzalez Y., Sanroma E. Consistency and quality assessment of the Metop-A/IASI and Metop-B/IASI operational trace gas products (O₃, CO, N₂O, CY₄, and CO₂) in the subtropical North Atlantic // Atmos. Meas. Tech. 2016. V. 9, N 5. P. 2315–2333.
 40. Cuesta J., Eremenko M., Liu X., Dufour G., Cai Z., Horfner M., Clarmann T., Sellito P., Foret G., Gaubert B., Beekmann M., Orphal J., Chance K., Spurr R., Flaud J.-M. Satellite observation of lowermost tropospheric ozone by multispectral synergism of IASI thermal infrared and GOME-2 ultraviolet measurements over Europe // Atmos. Chem. Phys. 2013. V. 13, N 13. P. 9675–9693.
 41. Safieddine S., Clerbaux C., George M., Hadji-Lazaro J., Hurtmans D., Coheur P.-F., Wespes C., Loyola D., Valks P., Hao N. Tropospheric ozone and nitrogen dioxide measurements in urban and rural regions as seen by IASI and GOME-2 // J. Geophys. Res.: Atmos. 2013. V. 118, N 18. P. 10555–10566.
 42. Oetjen H., Payne V.H., Kulawik S.S., Eldering A., Worden J., Edwards D.P., Francis G.L., Worden H.M., Clerbaux C., Lazaro J.H., Hurtmans D. Extending the satellite data record of tropospheric ozone profiles from Aura-TES to MetOp-IASI: Characterisation of optimal estimation retrievals // Atmos. Meas. Tech. 2014. V. 7, N 12. P. 4223–4236.
 43. Smith N., Smith Sr. W.L., Weisz E., Revercomb H.E. AIRS, IASI, and CrIS retrieval records at climate scales: An investigation into the propagation of systematic uncertainty // J. Appl. Meteorol. Climatol. 2015. V. 54, N 7. P. 1465–1481.
 44. Boynard A., Hurtmans D., Koukoli M.E., Goutail F., Bureau J., Safieddine S., Lerot C., Hadji-Lazaro J., Wespes C., Pommereau J.P., Pazmino A., Zyrichidou I., Balis D., Barbe A., Mikhailenko S.N., Loyola D., Valks P., Roozendaal M.V., Coheur P.F., Clerbaux C. Seven years of IASI ozone retrievals from FORLI: Validation with independent total column and vertical profile measurements // Atmos. Meas. Tech. 2016. V. 9, N 9. P. 4327–4353.
 45. Wespes C., Hurtmans D., Clerbaux C., Coheur P.-F. O₃ variability in the troposphere as observed by IASI over 2008–2016: Contribution of atmospheric chemistry and dynamics // J. Geophys. Res.: Atmos. 2017. V. 122, N 4. P. 2429–2451.
 46. Wespes C., Emmons L., Edwards D.P., Hannigan J., Hurtmans D., Saunio M., Coheur P.-F., Clerbaux C., Coffey M.T., Batchelor R.L., Lindenmaier R., Strong K., Weinheimer A.J., Nowak J.B., Ryerson T.B., Crouse J.D., Wennberg P.O. Analysis of ozone and nitric in spring and summer Arctic pollution using aircraft, ground-based, satellite observations and MOZART-4 model: Source attribution and partitioning // Atmos. Chem. Phys. 2012. V. 12, N 1. P. 237–259.
 47. Pommier M., Clerbaux C., Law K.S., Ancellet G., Bernath P., Coheur P.-F., Hadji-Lazaro J., Hurtmans D., Nedelec P., Ravett 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.
 48. Gazeaux J., Clerbaux C., George M., Hadji-Lazaro J., Kuttippurath J., Coheur P.-F., Hurtmans D., Desler T., Kovilakam M., Campbell P., Guidard V., Rabier F., Thepaut J.-N. Intercomparison of polar ozone profiles by IASI/MetOp sounder with 2010 Concordiasi ozonesonde observations // Atmos. Meas. Tech. 2013. V. 6, N 3. P. 613–620.
 49. Аршинова В.Г., Белан Б.Д., Ивлев Г.А., Рассказчикова Т.М., Симоненков Д.В., Толмачев Г.Н., Фофонов А.В. Комплексная оценка состояния воздушного бассейна Норильского промышленного района. Ч. 4. Вертикальная стратификация примесей // Оптика атмосфер. и океана. 2006. Т. 19, № 10. С. 905–908.
 50. Белан Б.Д., Толмачев Г.Н., Фофонов А.В. Вертикальное распределение озона в тропосфере над югом Западной Сибири // Оптика атмосфер. и океана. 2010. Т. 23, № 9. С. 777–783; Belan B.D., Tolmachev G.N., Fofonov A.V. Ozone vertical distribution in the tropo-

sphere over south regions of Western Siberia // Atmos. Ocean. Opt. 2011. V. 24, N 2. P. 181–187.

51. Антохин П.Н., Аршинова В.Г., Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Белан С.Б., Давыдов Д.К., Ивлев Г.А., Козлов А.В., Недэлэж Ф., Paris J.-D., Рассказчикова Т.М., Савкин Д.Е., Симоненков Д.В., Складнева

Т.К., Толмачев Г.Н., Фофонов А.В. Крупномасштабные исследования газового и аэрозольного состава воздуха над Сибирским регионом // Оптика атмосф. и океана. 2014. Т. 27, № 3. С. 232–239.

52. Белан Б.Д. Озон в тропосфере. Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2010. 488 с.

O.Yu. Antokhina, P.N. Antokhin, V.G. Arshinova, M.Yu. Arshinov, B.D. Belan, S.B. Belan, V.V. Belov, Yu.V. Gridnev, D.K. Davydov, G.A. Ivlev, A.V. Kozlov, K.S. Law, Ph. Nédélec, J.-D. Paris, T.M. Rasskazchikova, D.E. Savkin, D.V. Simonenkov, T.K. Sklyadneva, G.N. Tolmachev, A.V. Fofonov.
Comparison between the distributions of atmospheric gases measured with remote and contact tools over the Russian Arctic.

The data of airborne and satellite sounding at the ocean–land boundary near the Kara Sea in October, 2014, are compared. In total, 11 profiles synchronously measured over a continental part and 7 profiles over the ocean are used. It turned out that CH₄ and CO₂ concentrations are typically overestimated in a layer of 0–8 km over a continental part of the Arctic region and underestimated over the ocean. The overestimation by the satellite of the methane concentrations over the continent makes 28 ppb in the boundary layer and sharply increases in the middle (182 ppb) and upper (113 ppb) troposphere. The underestimation over the ocean averages 37 ppb in the boundary layer, 73 and 71 ppb in the middle and upper troposphere. The difference in CO₂ concentrations measured with different devices over the continent averages 18.2 ppm in the boundary layer and can change from 3.2 to 26.5 ppm. In the middle troposphere (4 km), the average differences decrease down to 10.8 ppm; the range of differences even slightly increases (0.6–25.5 ppm). In the upper troposphere (8 km), the average difference in measurements with both instruments decreases down to 2.8 ppm. The underestimation of the amplitude is higher over the ocean. The comparison for CO and O₃ comparison yielded acceptable results.