

СПЕКТРОСКОПИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

УДК 551.521.3, 535.343.4, 551.581.212

Определение содержания монооксида углерода в атмосфере из атмосферных спектров высокого разрешения

Т.Ю. Чеснокова¹, М.В. Макарова², А.В. Ченцов¹, Ю.В. Воронина¹,
В.И. Захаров^{3,4}, Н.В. Рокотян³, В. Langerock^{5*}

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

²Санкт-Петербургский государственный университет
199034, г. Санкт-Петербург, Университетская набережная, 7–9, Россия

³Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина
620002, г. Екатеринбург, пр. Ленина, 51, Россия

⁴Институт математики и механики УрО РАН
620990, г. Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, 16, Россия

⁵Royal Belgian Institute for Space Aeronomy BIRA-IASB
3-Avenue Circulaire B-1180 Brussels, Belgium

Поступила в редакцию 8.02.2019 г.

Рассмотрены результаты определения общего содержания СО в столбе атмосферы из измерений спектров солнечного излучения на наземных Фурье-спектрометрах, расположенных на станциях в Санкт-Петербурге (59,88° с.ш., 29,83° в.д.) и Коуровке (57,038° с.ш., 59,545° в.д.). Сделаны оценки влияния различия в параметрах линий поглощения СО в современных спектроскопических базах данных на точность восстановления атмосферного содержания СО из спектров высокого разрешения.

Ключевые слова: монооксид углерода, атмосферное пропускание, спектроскопические базы данных; carbon monoxide, atmospheric transmission, spectroscopic databases.

Введение

Монооксид углерода СО является токсичным газом, который попадает в атмосферу в больших количествах при работе двигателей внутреннего сгорания, а также маркером сжигания биомассы и антропогенного загрязнения [1, 2]. СО играет важную роль в атмосферной химии, влияя на концентрацию гидроксила ОН и способствуя образованию атмосферного озона. Во время пожаров концентрация СО в атмосфере может увеличиваться в несколько раз [3]. Для оценки качества воздуха и выявления источников загрязнения проводится регулярный спутниковый и наземный мониторинг содержания СО в атмосфере. Спутниковые спектроскопические измерения позволяют составить карты глобального распределения СО с хорошим пространственным и временным разрешением. Для определения СО

используются атмосферные спектры в тепловом и ближнем ИК-диапазонах. Например, на спутниковых радиометрах MORITT [2] регистрируются две полосы поглощения СО 2,3 и 4,6 мкм. Прибор TROPOMI, расположенный на европейском спутнике Sentinel, измеряет в одной полосе 2,3 мкм, инструмент CrIS на борту Suomi регистрирует в полосе 4,6 мкм [4]. Наземные измерения на спектрометрах с высоким спектральным разрешением в этих же полосах поглощения дополняют спутниковые измерения и используются для валидации спутниковых данных.

В работах [3, 5] было отмечено, что наблюдаются значительные отличия между спутниковыми и наземными измерениями. Так, при пожаре в отдельные дни лета 2010 г. в Москве общее содержание (ОС) СО в столбе атмосферы, измеренное спутниковыми приборами, было в 2–3 раза меньше, чем измеренное наземными солнечными спектрометрами [3]. При этом спутниковые данные также значительно отличались между собой. Для того чтобы полноценно использовать результаты измерения наземных спектрометров для валидации спутниковых данных, необходимо оценить спектроскопические погрешности, возникающие при решении обратной задачи определения содержания СО из солнечных спектров высокого разрешения.

* Татьяна Юрьевна Чеснокова (ches@iao.ru); Мария Владимировна Макарова (zaits@troll.phys.spbu.ru); Алексей Владимирович Ченцов (alex86@pochta.ru); Юлия Викторовна Воронина (yulia@iao.ru); Вячеслав Иосифович Захаров (v.zakharov@remotesensing.ru); Никита Валерьевич Рокотян (nikita@Rokoty.com); Bavo Langerock (bavo.langerock@aeronomie.be).

В [6, 7] было показано, что применение различных спектроскопических баз данных по параметрам линий поглощения атмосферных газов при восстановлении ОС парниковых газов, таких как CH_4 и CO_2 , из спектров солнечного излучения, измеренных на наземном Фурье-спектрометре, может приводить к различиям в ОС до 2%. При этом использование новых версий спектроскопических баз данных не всегда приводит к лучшему согласию измеренных и модельных атмосферных спектров. Интересным представляется проведение подобных исследований влияния спектроскопических погрешностей на определение ОС CO .

Цель работы – на основе результатов определения ОС CO в столбе атмосферы из измерений наземных Фурье-спектрометров, расположенных на станциях в Санкт-Петербурге и Коуровке, оценить влияние различия в линиях поглощения CO в современных спектроскопических базах данных на точность восстановления его атмосферного содержания из спектров высокого разрешения в полосах поглощения CO 2,3 и 4,6 мкм.

Сравнение атмосферного пропускания, вычисленного с использованием различных данных по линиям поглощения CO

В настоящее время в атмосферных приложениях применяются параметры линий поглощения

CO из спектроскопических баз данных (БД) HITRAN2008 [8], HITRAN2012 [9], HITRAN2016 [10], GEISA2011 [11], GEISA2015 [12], а также из банка данных ATM [13], который используется при определении содержания газов в международной сети NDACC [14]. В отличие от GEISA, где не производилось обновление информации по линиям CO с версии 2003 г., в HITRAN данные по линиям CO регулярно обновляются и имеются значимые различия даже между ближайшими версиями. В частности, в последней версии HITRAN2016 информация представлена на основе нового колебательно-вращательного банка линий поглощения 9 изотопологов CO [15], которые дополнены экспериментальными значениями положения центров линий [16–19], и было введено ограничение по интенсивности линий $10^{-31} \text{ см}^{-1}/(\text{мол.} \cdot \text{см}^{-2})$ везде, кроме микроволнового региона.

Мы рассчитали атмосферное пропускание монооксида углерода методом *line-by-line* [20] на основе параметров из спектроскопических баз данных HITRAN, GEISA, ATM со спектральным разрешением $0,01 \text{ см}^{-1}$. Расчет проводился для наклонной трассы через всю атмосферу для зенитного угла 30° (рис. 1). Были рассмотрены спектральные интервалы 2,3 и 4,6 мкм ($2000\text{--}2250$ и $4150\text{--}4350 \text{ см}^{-1}$), которые используются для определения содержания CO в атмосфере. Профили температуры, давления и концентрации CO задавались согласно метеомодели AFGL лета средних широт [21] с фоновым содержанием CO в столбе атмосферы $0,1 \text{ ppm}$. Даже

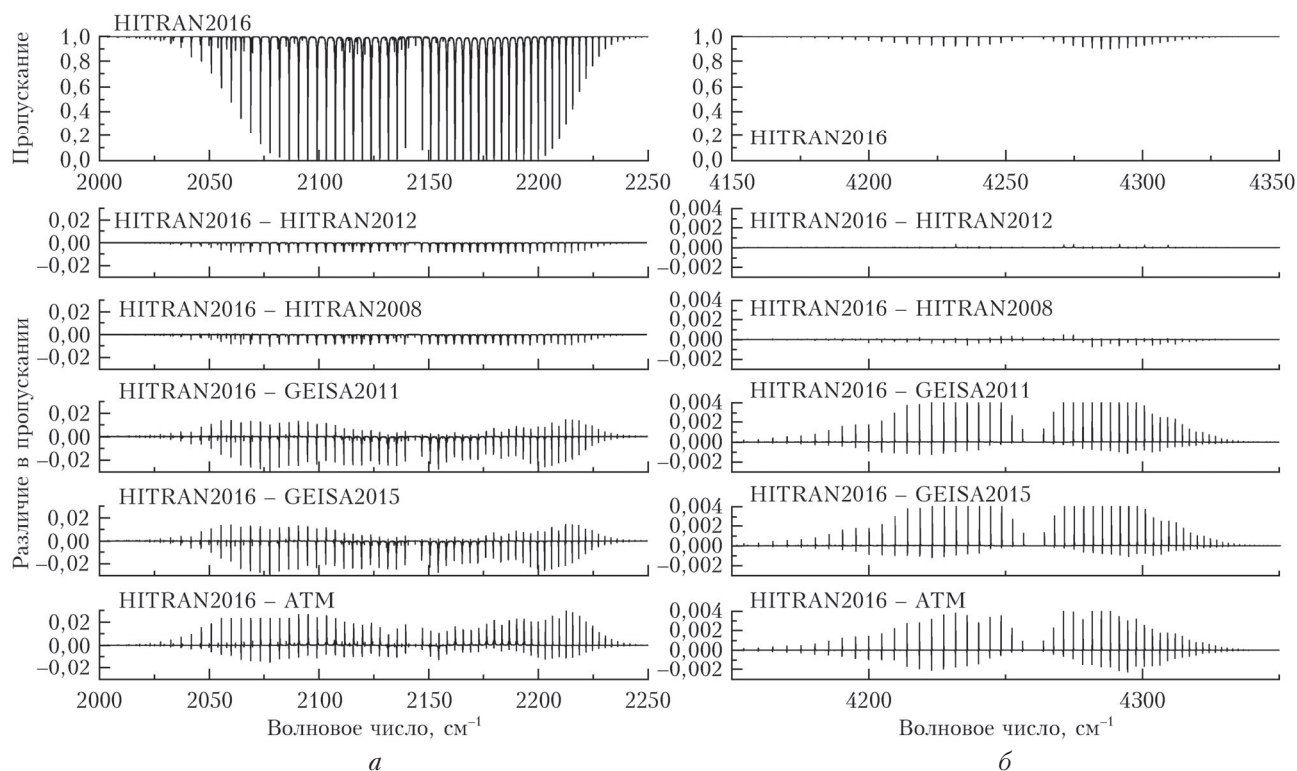


Рис. 1. Атмосферное пропускание CO и различие в атмосферном пропускании, вычисленном с линиями поглощения CO из различных спектроскопических баз данных, в диапазонах $2000\text{--}2250$ (а) и $4150\text{--}4350 \text{ см}^{-1}$ (б). Наклонная трасса с зенитным углом 30° через всю атмосферу

для фоновых концентраций CO наблюдались достаточно заметные различия в пропускании, вычисленном линиями поглощения его из разных баз данных. Так, максимальное различие в пропускании (0,03) наблюдалось между HITRAN2016 и GEISA в диапазоне 2000–2250 см⁻¹. Такое же различие наблюдалось между HITRAN2016 и ATM. В интервале 4150–4350 см⁻¹ различия в пропускании, вычисленном с HITRAN2016 и GEISA, были меньше и не превышали 0,004. В реальной атмосфере во время пожаров концентрация CO может возрасти на порядок, следовательно, при определении содержания CO спектроскопическими методами различия в линиях поглощения будут еще больше влиять на вычисление пропускания в прямой задаче.

Измерения общего содержания CO

Общее содержание CO в столбе атмосферы определялось из измерений спектров солнечного излучения на наземных Фурье-спектрометрах, расположенных на станциях в г. Санкт-Петербурге и пос. Коуровка.

Измерения в Санкт-Петербурге

Станция St. Petersburg расположена в Петергофе – пригороде Санкт-Петербурга (59,88° с.ш., 29,83° в.д., 20 м над ур. м.) [22]. Измерительный спектральный комплекс состоит из Фурье-спектрометра Bruker IFS 125HR, позволяющего регистрировать спектры с разрешением до 0,002 см⁻¹, и системы слежения за Солнцем, разработанной и изготовленной на кафедре физики атмосферы СПбГУ [23]. В 2016 г. ст. St. Petersburg вошла в международную измерительную сеть NDACC (IRWG-NDACC) [14]. В работе используются данные по ОС CO, полученные с использованием унифицированной оптимальной методики, обеспечивающей высококачественные данные по ОС/профилю CO в атмосфере. Данная методика была разработана в рамках международного проекта QA4ECV (Quality Assurance for Essential Climate Variables, руководитель BIRA-IASB) для использования на сети станций IRWG-NDACC [24]. За основу была взята стандартная стратегия восстановления ОС/профиля CO, разработанная IRWG-NDACC, в которой используются три спектральных микроокна: 2057,70–2058,00; 2069,56–2069,76; 2157,50–2159,15 см⁻¹.

На рис. 2, а показаны измеренные спектры прямого солнечного излучения, прошедшего через атмосферу, и модельные спектры, а также различие между ними для вышеперечисленных спектральных интервалов. Обработка спектров прямого солнечного излучения с разрешением 0,005 см⁻¹, зарегистрированных Фурье-спектрометром Bruker IFS 125HR, осуществляется программой SFIT4 [25], основанной на методе статистической регуляризации. Одновременно с профилем CO в атмосфере определяются профили N₂O и O₃, а также общее содержание CO₂, H₂O и OCS. При этом используются метеорологи-

ческие данные NCEP [26, 27]; априорные профили газов в атмосфере задавались согласно модели WACCM [28]. Основное отличие методики QA4ECV от стандартной методики IRWG-NDACC заключается в ограничении вариаций профиля CO в верхних слоях атмосферы: SD(Sa) = 0,01 для мезосферы и термосферы. Это сделано, чтобы исключить появление отрицательных значений концентраций CO, что иногда имеет место для стандартной методики IRWG-NDACC.

Измерения в Коуровке

Измерения прямых солнечных спектров проводились на Уральской атмосферной станции, расположенной на территории Коуровской астрономической обсерватории Уральского федерального университета, г. Екатеринбург (57,038° с.ш., 59,545° в.д.) [29], на наземном Фурье-спектрометре Bruker IFS 125M, сопряженном с солнечным трекером Bruker A547. На Фурье-спектрометре проводятся регулярные измерения атмосферных спектров в ближнем ИК-диапазоне 4000–11000 см⁻¹ со спектральным разрешением 0,02 см⁻¹ с требованиями по точности согласно стандарту международной сети измерений парниковых газов TCCON [30]. Станция располагается в лесном массиве с фоновой атмосферой. Спектры измеряются в каждый солнечный день года, исключение составляют зимние месяцы (с середины ноября до середины февраля), когда высота Солнца над уровнем леса не позволяет получить его изображение на диафрагме спектрометра.

Моделирование спектров и определение ОС CO в атмосфере осуществлялись при помощи SFIT4 [25]. Для определения содержания CO были выбраны три спектральных интервала (4235,7–4236,2; 4274,5–4275,0 и 4281,3–4281,9 см⁻¹; рис. 2, б), содержащие наиболее сильные линии данного диапазона с наименьшим перекрытием мешающими газами. При моделировании атмосферного радиационного переноса учитывались основные поглощающие атмосферные газы H₂O, CO₂, CH₄, N₂O, CO, O₃, O₂ и спектр излучения Солнца. Высотные профили температуры, давления и концентрации атмосферных газов были взяты из данных реанализа NCEP/NCAR [26, 27], которые были дополнены измеренными локальными значениями температуры, давления и влажности у поверхности в момент регистрации спектров в Коуровке. Сравнение измеренных спектров солнечного излучения с модельными спектрами в спектральных интервалах, по которым определялось ОС CO в Коуровке, представлено на рис. 2, б.

Анализ влияния спектроскопической информации на результаты определения общего содержания CO

Для стратегий восстановления ОС/профиля CO, используемых при обработке спектров на ст. St. Petersburg и Коуровка, была проведена работа

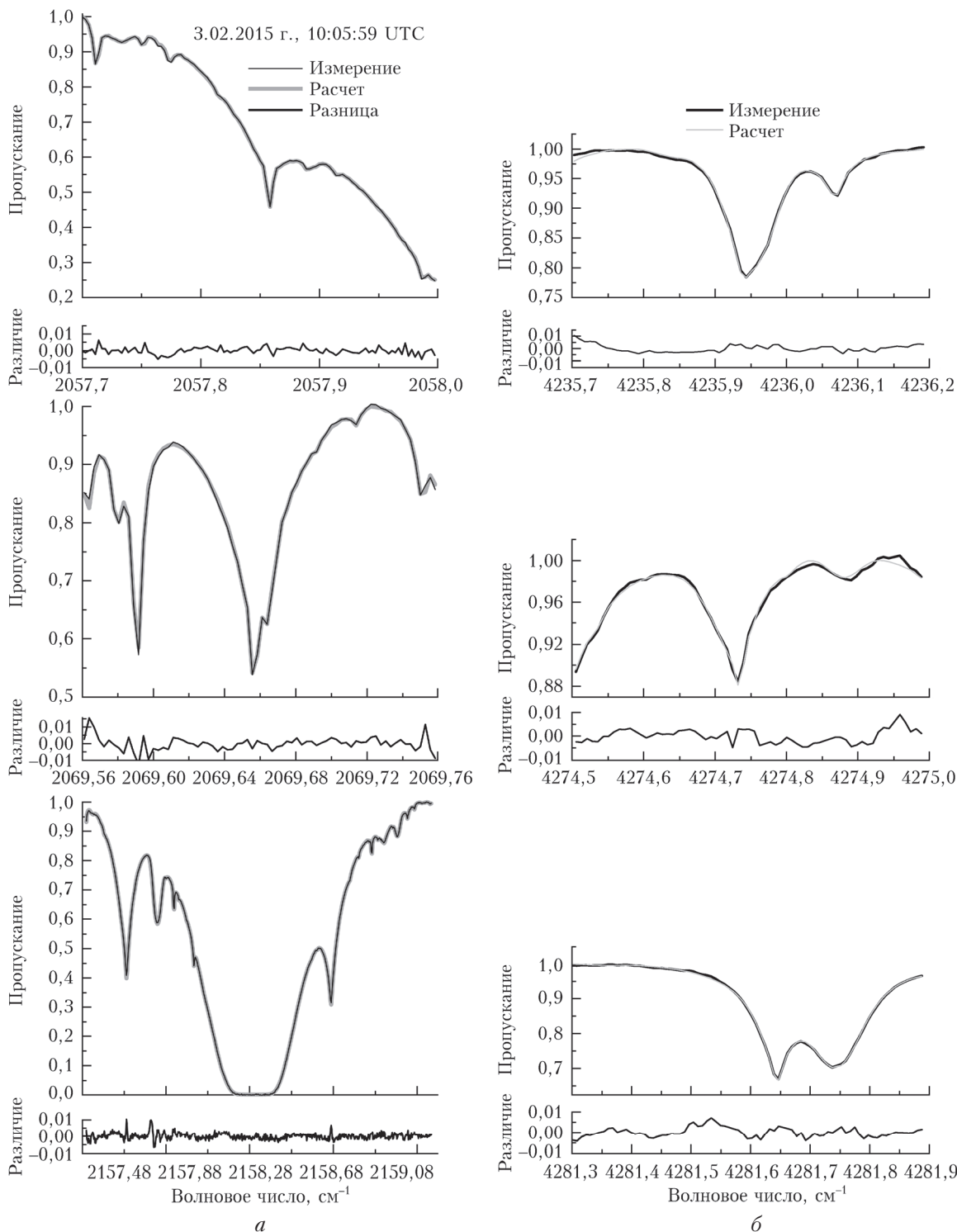


Рис. 2. Спектральные микроокна, используемые для определения ОС СО (измеренные атмосферные солнечные спектры и рассчитанные спектры и различия между ними) в Санкт-Петербурге (а) и Коуровке (б)

по исследованию влияния различных версий спектроскопических БД HITRAN, ATM и GEISA на получаемые результаты по ОС СО. При этом все прочие входные параметры сохранялись без изменений, менялась только спектроскопическая информация о линиях СО (для других газов, восстанавливаемых

одновременно с СО, она оставалась одной и той же). Основные результаты наших тестов, полученные для массива FTIR-спектров, представлены в табл. 1 и 2 для измерений на ст. St. Petersburg и Коуровка соответственно, где, в частности, приведена следующая информация:

Таблица 1

Значения погрешностей определения ОС СО (RMS, DOFS, χ^2), а также среднедневная изменчивость ОС СО, полученные по результатам обработки FTIR-спектров прямого солнечного излучения для 2015 г. ст. St. Petersburg

Спектроскопическая БД	Количество спектров	Среднее значение погрешности, %			RMS	DOFS	χ^2	Среднее значение дневной вариации ОС СО 10^{16} см ⁻²
		Сглаживания	Случайная	Систематическая				
HITRAN2008	428	0,089	2,15	2,93	0,348	2,61	0,93	$1,8 \pm 1,7$
HITRAN2012	428	0,089	2,15	2,93	0,332	2,61	0,84	$1,8 \pm 1,7$
ATM12	428	0,089	2,16	2,92	0,358	2,65	0,90	$1,8 \pm 1,7$
HITRAN2016	428	0,088	2,15	2,93	0,331	2,63	0,83	$1,7 \pm 1,6$
ATM16	428	0,089	2,15	2,93	0,332	2,61	0,84	$1,8 \pm 1,7$

1. RMS – среднеквадратичное отклонение рассчитанного спектра от измеренного («наилучшая» БД будет обеспечивать минимум этой величины).

2. DOFS – количество степеней свободы для исследуемого газа. DOFS $\geq 1,0$ означает, что возможно определить ОС СО; DOFS $\geq 2,0$ означает, что возможно также определить элементы вертикального распределения СО в атмосфере. DOFS пропорционально количеству восстанавливаемых независимых слоев газа («наилучшая» БД будет обеспечивать максимум этой величины).

3. Критерий однородности χ^2 («наилучшая» БД будет обеспечивать минимум этой величины).

4. Случайная и систематическая погрешности, погрешность сглаживания (предполагается, что «наилучшая» спектроскопическая БД будет обеспечивать минимум этих величин; при этом первоочередное внимание уделяется случайной погрешности).

5. Среднее значение вариации ОС газа в течение дня («наилучшая» БД будет обеспечивать минимум этой величины).

Таблица 2

Значения погрешностей определения ОС СО (RMS, χ^2), DOFS, полученные по результатам обработки FTIR-спектров прямого солнечного излучения с марта по август 2015 г. на ст. Коуровка (спектральные интервалы 4235,7–4236,2; 4274,5–4275,0 и 4281,3–4281,9 см⁻¹)

Спектроскопическая БД	Число спектров	RMS, %	χ^2
ATM	540	0,32001	0,74953
GEISA2015	540	0,32002	0,74954
HITRAN2008	540	0,30794	0,69391
HITRAN2016	540	0,30516	0,6815

Данные критерии в целом характеризуют качество решения обратной задачи атмосферной оптики. Это позволяет на основе информации, приведенной в табл. 1 и 2, сделать выбор между протестированными спектроскопическими БД.

Из табл. 1 и 2 видно, что для всех пяти спектроскопических БД, использованных нами для определения ОС/профиля СО в атмосфере, значения RMS, DOFS, погрешностей определения ОС СО, а также среднедневной вариации ОС СО очень близки. Однако использование при решении обратной задачи спектроскопической информации из HITRAN2016 позволяет незначительно, но все же

улучшить значения анализируемых параметров (см. табл. 1, 2), например, уменьшить RMS, χ^2 и среднедневную вариацию. Также для HITRAN2016 минимальны значения случайной погрешности и погрешности сглаживания.

Дополнительно для иллюстрации влияния используемой спектроскопической информации приведем результаты определения ОС СО для наиболее длинной серии измерений в 2015 г., зарегистрированной 21 июля на ст. St. Petersburg – всего 14 единичных спектров (табл. 3 и рис. 3).

Таблица 3

Среднедневное значение ОС СО и его вариация для 21.07.2015 г., полученные по результатам обработки спектров с использованием различных спектроскопических баз данных

Спектроскопическая БД	Среднедневное значение, 10^{18} см ⁻²	Дневная вариация (стандартное отклонение), 10^{16} см ⁻² (%)
HITRAN2008	2,037	3,5 (1,70)
HITRAN2012	2,037	3,5 (1,70)
ATM12	1,984	3,5 (1,76)
HITRAN2016	1,995	3,4 (1,70)
ATM16	2,037	3,5 (1,70)

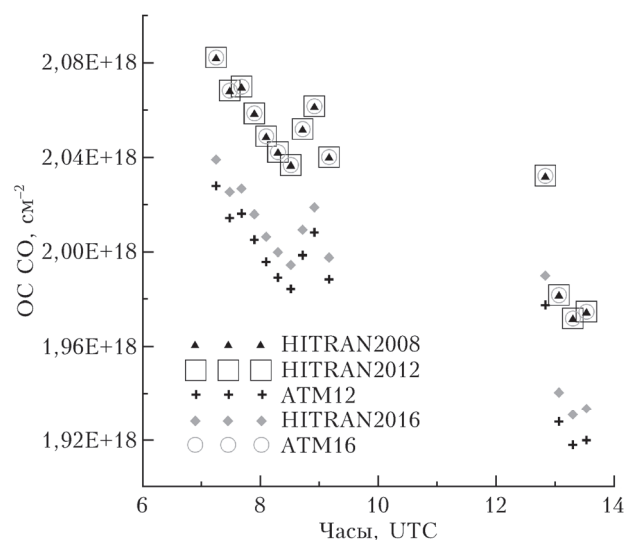


Рис. 3. Результаты единичных измерений ОС СО 21.07.2015 г. (ст. St. Petersburg), полученные при использовании различной спектроскопической информации

Этот пример является наглядной иллюстрацией систематических отличий в ОС СО, возникающих при использовании различных спектроскопических баз данных. Единичные значения ОС СО, а следовательно и среднедневные, и значения дневной вариации для 21.07.2015 г. совпадают для HITRAN2012 и ATM16; очень близки к этим значениям ОС СО для базы данных HITRAN2008 – для серии спектров 21.07.2015 г. относительная разница между единичными значениями ОС СО для HITRAN2008 и HITRAN2012 варьирует от 0 до 0,006%. На 2,1 и 2,7% ниже этого уровня лежат значения ОС СО, полученные с использованием HITRAN16 и ATM12 соответственно. Отметим, что наибольшая дневная вариация для 21.07.2015 г. получена при обработке FTIR-спектров с использованием ATM12.

Систематические отличия, вызванные различиями в спектроскопической информации и продемонстрированные на примере одного дня измерений (21.07.2015 г., ст. St. Petersburg), в целом сохраняются на протяжении всего года измерений. Это демонстрирует рис. 4, где представлен годовой ход ОС СО с вариациями для каждого месяца, и табл. 4, где даны амплитуда, среднемесячные значения ОС СО в минимуме и максимуме годового хода. Видно, что годовой ход ОС СО для HITRAN2008, HITRAN2012 и ATM16 одинаков. Использование HITRAN2016 при обработке данных 2015 г. дает, по сравнению с тремя упомянутыми выше спектроскопическими базами данных, более низкие значения в экстремумах годового хода (на 2,1 и 2,7% в максимуме и минимуме соответственно). Самые низкие значения имеет годовой ход, полученный для ATM12: в июле среднемесячные значения ниже соответствующих, полученных для HITRAN2012, на 2,7%; в марте – на 3,4%.

На рис. 5 представлены среднемесячные значения атмосферного ОС СО и его вариации в Коуровке, полученные с использованием различных баз данных по параметрам линий поглощения СО. Годовой ход и среднемесячные значения ОС СО в 2015 г. в Коуровке подобны значениям СО, полученным из измерений в Санкт-Петербурге с максимумом в марте и минимумами в летние месяцы. В Коуровке наблюдались меньшие вариации в течение одного месяца, чем в Санкт-Петербурге. Это может быть объяснено тем, что обсерватория в поселке расположена в лесном массиве с меньшими источниками СО, чем в Санкт-Петербурге, а также тем, что из-за

облачности в отдельные месяцы измерения проводились в меньшем количестве дней.

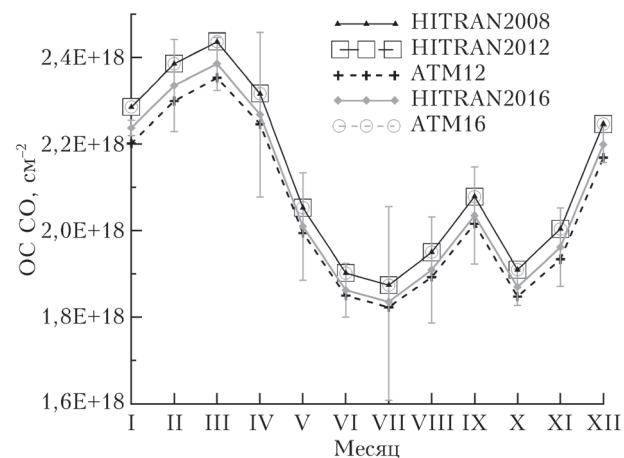


Рис. 4. Годовой ход ОС СО для 2015 г. (ст. St. Petersburg) с вариациями для каждого месяца, полученный с использованием различной спектроскопической информации

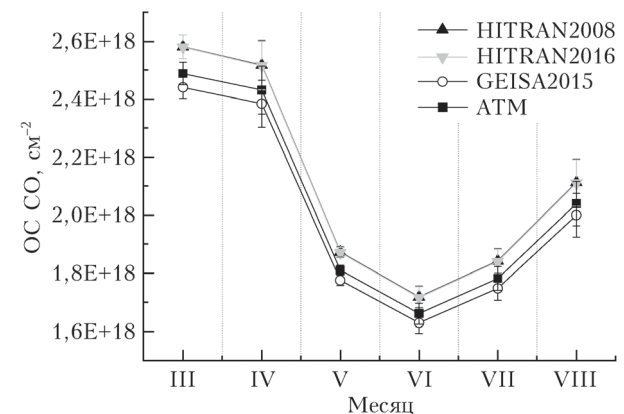


Рис. 5. Среднемесячные значения атмосферного ОС СО и его вариации, полученные с использованием различных баз данных по параметрам линий поглощения СО. Коуровка, 2015 г.

На рис. 6 показано относительное различие в среднемесячных значениях атмосферного ОС СО в Коуровке 2015 г., полученных с использованием разных баз данных по параметрам линий поглощения СО. Имеются достаточно большие различия между ОС СО, определенным с использованием линий СО из БД GEISA, и другими расчетами: 2% при

Таблица 4

Характеристики годового хода ОС СО для 2015 г., ст. St. Petersburg (для различных баз данных спектроскопической информации)

Спектроскопическая БД	Амплитуда годового хода ОС СО, 10^{18} см^{-2} (%)	Минимальное и максимальное среднемесячные значения ОС СО (\pm вариация), 10^{18} см^{-2}
HITRAN2008	0,281 (13,4)	март $2,436 \pm 0,063$; июль $1,874 \pm 0,23$
HITRAN2012	0,282 (13,5)	март $2,436 \pm 0,062$; июль $1,874 \pm 0,23$
ATM12	0,265 (13,1)	март $2,353 \pm 0,061$; июль $1,823 \pm 0,22$
HITRAN2016	0,275 (13,4)	март $2,385 \pm 0,061$; июль $1,834 \pm 0,22$
ATM16	0,282 (13,5)	март $2,436 \pm 0,062$; июль $1,874 \pm 0,23$

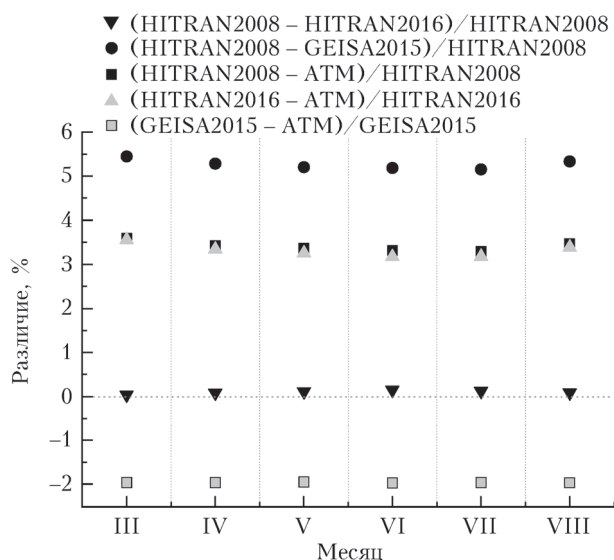


Рис. 6. Относительное различие в среднемесячных значениях атмосферного ОС СО, полученных с использованием различных баз данных по параметрам линий поглощения СО. Коуровка, 2015 г.

сравнении с данными ATM и до 5,5% при сравнении с HITRAN2016. Следует отметить, что спектроскопическая информация по линиям поглощения СО в БД GEISA не обновлялась более 15 лет. Возможно, это является причиной таких больших различий.

Заключение

На примере БД HITRAN2008, HITRAN2012, ATM12, HITRAN2016, ATM16 и GEISA2015 показано влияние спектроскопической информации по линиям поглощения СО на результаты определения общего содержания/профиля СО из FTIR-измерений спектров солнечного излучения в различных спектральных интервалах.

Тестовые расчеты, выполненные с использованием атмосферных FTIR-спектров с высоким разрешением, зарегистрированных на ст. St. Petersburg в 2015 г. в спектральных интервалах, используемых IRWG-NDACC, показали следующее.

1. Значения общего содержания СО, полученные при обработке спектров с использованием баз данных ATM16 и HITRAN2012, совпадают; баз данных HITRAN2008 и HITRAN2012 практически совпадают; баз данных HITRAN2016 и ATM12 лежат на 2–3% ниже аналогичных величин для HITRAN2012.

2. По ряду критериев (значение случайной погрешности определения ОС СО, качество подгонки расчетного спектра к измеренному, значения среднедневной изменчивости ОС СО) HITRAN2016 обеспечивает наилучшие результаты решения обратной задачи атмосферной оптики по определению ОС СО по сравнению с БД HITRAN2008, HITRAN2012, ATM12 и ATM16.

Расчеты, выполненные с использованием солнечных FTIR-спектров, зарегистрированных на ст. Ко-

уровка в 2015 г. в спектральном диапазоне 4235–4281 см⁻¹, показали следующее:

– как для результатов на ст. St. Petersburg, так и на ст. Коуровке HITRAN2016 по критериям RMS и χ^2 обеспечивает наилучшие показатели решения задачи определения ОС СО;

– данные ОС СО, полученные с помощью версий HITRAN2008–2016, отличаются незначительно;

– наблюдаются большие относительные различия в среднемесячных значениях ОС СО в Коуровке, определенные с помощью GEISA и других баз данных по параметрам линий поглощения СО, которые могут достигать 5,5% (HITRAN2016 и GEISA2015).

Исследования выполнены при финансовой поддержке в рамках проекта Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук (АААА-А17-117021310147-0), при поддержке гранта РФФИ № 18-05-00011 «Изучение химически активных газов в атмосфере методами Фурье-спектрометрии», а также при поддержке проекта № 3.6064.2017/8.9 в рамках базовой части государственного задания и при финансовой поддержке Постановления № 211 Правительства Российской Федерации, контракт № 02.А03.21.0006. Обсуждение полученных результатов и подготовка публикации осуществлялись в рамках гранта РФФИ ГФЕН-а 18-55-53062 «Мониторинг и изучение газового и аэрозольного загрязнения атмосферы и парниковых газов в Москве и Пекине на основе спутниковых и наземных спектроскопических технологий высокого разрешения».

1. Van Leeuwen T.T., van der Werf G.R. Spatial and temporal variability in the ratio of trace gases emitted from biomass burning // *Atmos. Chem. Phys.* 2011. V. 11, N 8. P. 3611–3629. DOI: 10.5194/acp-11-3611-2011.
2. Jiang Z., Worden J.R., Worden H., Deeter M., Jones D.B.A., Arellano A.F., Henze D.K. A 15-year record of CO emissions constrained by MOPITT CO observations // *Atmos. Chem. Phys.* 2017. V. 7, N 17. P. 4565–4583. DOI: 10.5194/acp-17-4565-2017.
3. Yurganov L.N., Rakitin V., Dzhola A., August T., Fokeeva E., George M., Gorchakov G., Grechko E., Hannon S., Karpov A., Ott L., Semutnikova E., Shumsky R., Strow L. Satellite- and ground-based CO total column observations over 2010 Russian fires: Accuracy of top-down estimates based on thermal IR satellite data // *Atmos. Chem. Phys.* 2011. V. 15, N 11. P. 7925–7942. DOI: 10.5194/acp-11-7925-2011.
4. Fu D., Bowman K.W., Worden H.M., Natraj V., Worden J.R., Yu S., Veefkind P., Aben I., Landgraf J., Strow L., Han Y. High-resolution tropospheric carbon monoxide profiles retrieved from CrIS and TROPOMI // *Atmos. Meas. Tech.* 2016. V. 9, N 6. P. 2567–2579. DOI: 10.5194/acp-11-7925-2011.
5. Buchholz R.R., Deeter M.N., Worden H.M., Gille J., Edwards D.P., Hannigan J.W., Jones N.B., Paton-Walsh C., Griffith D.W.T., Smale D., Robinson J., Strong K., Conway S., Sussmann R., Hase F., Blumenstock T., Mahieu E., Langerock B. Validation of MOPITT carbon monoxide using ground-based Fourier transform infrared spectrometer data from NDACC // *Atmos. Meas. Tech.* 2017. V. 10, N 5. P. 1927–1956. DOI: 10.5194/amt-9-2567-2016.

6. Chesnokova T.Y., Chentsov A.V., Rokotyay N.V., Zakharov V.I. Impact of difference in absorption line parameters in spectroscopic databases on CO₂ and CH₄ atmospheric content retrievals // *J. Mol. Spectrosc.* 2016. V. 327. P. 171–179. DOI: 10.1016/j.jms.2016.07.001.
7. Чеснокова Т.Ю., Ченцов А.В., Рокотьян Н.В., Захаров В.И. Определение содержания парниковых газов из атмосферных спектров солнечного излучения с использованием различных спектроскопических данных по линиям поглощения // *Оптика атмосф. и океана.* 2015. Т. 28, № 5. С. 489–495; Chesnokova T.Yu., Chentsov A.V., Rokotyay N.V., Zakharov V.I. Retrieval of content of greenhouse gases from atmospheric spectra of solar radiation with the use of different spectroscopic data on absorption lines // *Atmos. Ocean. Opt.* 2015. V. 28, N 5. P. 469–475.
8. Rothman L.S., Gordon I.E., Barbe A., Benner D.C., Bernath P.F., Birk M., Boudon V., Brown L.R., Campargue A., Champion J.-P., Chance K., Coudert L.H., Dana V., Devi V.M., Fally S., Flaud J.-M., Gamache R.R., Goldman A., Jacquemart D., Kleiner I., Lacombe N., Lafferty W.J., Mandin J.-Y., Massie S.T., Mikhailenko S.N., Miller C.E., Moazzen-Ahmadi N., Naumenko O.V., Nikitin A.V., Orphal J., Perevalov V.I., Perrin A., Predoi-Cross A., Rinsland C.P., Rotger M., Šimečková M., Smith M.A.H., Sung K., Tashkun S.A., Tennyson J., Toth R.A., Vandaele A.C., Auwera J. Vander. The HITRAN2008 molecular spectroscopic database // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer.* 2009. V. 110, N 9–10. P. 533–572. DOI: 10.1016/j.jqsrt.2009.02.013.
9. Rothman L.S., Gordon I.E., Babikov Y., Barbe A., Chris Benner D., Bernath P.F., Birk M., Bizzocchi L., Boudon V., Brown L.R., Campargue A., Chance K., Cohen E.A., Coudert L.H., Devi V.M., Drouin B.J., Fayt A., Flaud J.-M., Gamache R.R., Harrison J.J., Hartmann J.-M., Hill C., Hodges J.T., Jacquemart D., Jolly A., Lamoureaux J., Roy R.J. Le, Li G., Long D.A., Lyulin O.M., Mackie C.J., Massie S.T., Mikhailenko S., Müller H.S.P., Naumenko O.V., Nikitin A.V., Orphal J., Perevalov V., Perrin A., Polovtseva E.R., Richard C., Smith M.A.H., Starikova E., Sung K., Tashkun S., Tennyson J., Toon G.C., Tyuterev V.G., Wagner G. The HITRAN2012 molecular spectroscopic database // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer.* 2013. V. 130. P. 4–50. DOI: 10.1016/j.jqsrt.2013.07.002.
10. Gordon I.E., Rothman L.S., Hill C., Kochanov R.V., Tan Y., Bernath P.F., Birk M., Boudon V., Campargue A., Chance K.V., Drouin B.J., Flaud J.-M., Gamache R.R., Hodges J.T., Jacquemart D., Perevalov V.I., Perrin A., Shine K.P., Smith M.-A.H., Tennyson J., Toon G.C., Tran H., Tyuterev V.G., Barbe A., Császár A.G., Devi V.M., Furtenbacher T., Harrison J.J., Hartmann J.-M., Jolly A., Johnson T.J., Karman T., Kleiner I., Kyuberis A.A., Loos J., Lyulin O.M., Massie S.T., Mikhailenko S.N., Moazzen-Ahmadi N., Müller H.S.P., Naumenko O.V., Nikitin A.V., Polyansky O.L., Rey M., Rotger M., Sharpe S.W., Sung K., Starikova E., Tashkun S.A., Auwera J. Vander, Wagner G., Wilzewski J., Wcislo P., Yu S., Zak E.J. The HITRAN2016 molecular spectroscopic database // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer.* 2017. V. 203. P. 3–69. DOI: 10.1016/j.jqsrt.2017.06.038.
11. Jacquinet-Husson N., Crépeau L., Armante R., Boutammine C., Chédin A., Scott N.A., Crevoisier C., Capelle V., Boone C., Poulet-Crovisier N., Campargue A., Chris Benner D., Benilan Y., Bézard B., Boudon V., Brown L.R., Coudert L.H., Coustenis A., Dana V., Devi V.M., Fally S., Fayt A., Flaud J.M., Goldman A., Herman M., Harris G.J., Jacquemart D., Jolly A., Kleiner I., Kleinböhl A., Kwabia-Tchana F., Lavrentieva N., Lacombe N., Xu L.H., Lyulin O.M., Mandin J.-Y., Maki A., Mikhailenko S., Miller C.E., Mishina T., Moazzen-Ahmadi N., Møller H.S.P., Nikitin A., Orphal J., Perevalov V., Perrin A., Petkie D.T., Predoi-Cross A., Rinsland C.P., Remedios J.J., Rotger M., Smith M.A.H., Sung K., Tashkun S., Tennyson J., Toth R.A., Vandaele A.C., Auwera J. Vander. The 2009 edition of the GEISA spectroscopic database // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer.* 2011. V. 112, N 15. P. 2395–2445. DOI: 10.1016/j.jqsrt.2011.06.004.
12. Jacquinet-Husson N., Armante R., Scott N.A., Chédin A., Crépeau L., Boutammine C., Bouhdaoui A., Crevoisier C., Capelle V., Boone C., Poulet-Crovisier N., Barbe A., Chris Benner D., Boudon V., Brown L.R., Buldyreva J., Campargue A., Coudert L.H., Devi V.M., Dönn M.J., Drouin B.J., Fayt A., Fittschen C., Flaud J.-M., Gamache R.R., Harrison J.J., Hill C., Hodnebrog III., Hu S.-M., Jacquemart D., Jolly A., Jiménez E., Lavrentieva N.N., Liu A.-W., Lodi L., Lyulin O.M., Massie S.T., Mikhailenko S., Müller H.S.P., Naumenko O.V., Nikitin A., Nielsen C.J., Orphal J., Perevalov V.I., Perrin A., Polovtseva E., Predoi-Cross A., Rotger M., Ruth A.A., Yu S.S., Sung K., Tashkun S.A., Tennyson J., Tyuterev V.G., Auwera J. Vander, Voronin B.A., Makie A. The 2015 edition of the GEISA spectroscopic database // *J. Mol. Spectrosc.* 2016. V. 327. P. 31–72. DOI: 10.1016/j.jms.2016.06.007.
13. *Atm12* and *atm16* – the compilations from Geoffrey Toon (JPL) [Electronic resource]. URL: <http://mark4sun.jpl.nasa.gov/toon/linelist/linelist.html> (last access: 5.09.2018).
14. Network for the Detection of Atmospheric Composition Change (NDACC) [Electronic resource]. URL: <http://www.ndsc.ncep.noaa.gov> (last access: 19.05.2016).
15. Li G., Gordon I.E., Rothman L.S., Tan Y., Hu S.-M., Kassi S., Campargue A., Medvedev E.S. Rovibrational line lists for nine isotopologues of the co molecule in the X¹Σ⁺ ground electronic state // *Astrophys. J. Suppl. Ser.* 2015. V. 216, N 1. P. 15. DOI: 10.1088/0067-0049/216/1/15.
16. Pollock C.R., Petersen F.R., Jennings D.A., Wells J.S., Maki A.G. Absolute frequency measurements of the 2–0 band of CO at 2.3 μm; Calibration standard frequencies from high resolution color center laser spectroscopy // *J. Mol. Spectrosc.* 1983. N 99. P. 357–368. DOI: 10.1016/0022-2852(83)90320-X.
17. Mondelain D., Sala T., Kassi S., Romanini D., Marangoni M., Campargue A. Broadband and highly sensitive comb-assisted cavity ring down spectroscopy of CO near 1.57 μm with sub-MHz frequency accuracy // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer.* 2015. V. 154. P. 35–43. DOI: 10.1016/j.jqsrt.2014.11.021.
18. Cygan A., Wytewicz S., Kowzan G., Zaborowski M., Wcislo P., Nawrocki J., Krehlik P., Śliwczyński, Lipiński M., Mastowski P., Ciuryło R., Lisak D. Absolute molecular transition frequencies measured by three cavity-enhanced spectroscopy techniques // *J. Chem. Phys.* 2016. V. 144. P. 214202-1–11. DOI: 10.1063/1.4952651.
19. Tan Y., Wang J., Zhao X.Q., Liu A.W., Hu S.M. Cavity ring-down spectroscopy of the fifth overtone of CO // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer.* 2017. V. 187. P. 274–279. DOI: 10.1016/j.jqsrt.2016.10.003.
20. Mitsel A.A., Ptashnik I.V., Firsov K.M., Fomin A.B. Efficient technique for line-by-line calculating the transmittance of the absorbing atmosphere // *Atmos. Ocean. Opt.* 1995. V. 8, N 10. P. 847–850.

21. Anderson G., Clough S., Kneizys F., Chetwynd J., Shettle E. AFGL Atmospheric Constituent Profiles (0–120 km), Air Force Geophysics Laboratory. AFGL-TR-86-0110 // Environ. Res. Paper. 1986. N 954. 25 p.
22. Timofeyev Y., Virolainen Y., Makarova M., Poberovskiy A., Polyakov A., Ionov D., Osipov S., Imhasin H. Ground-based spectroscopic measurements of atmospheric gas composition near Saint Petersburg Russia // J. Mol. Spectrosc. 2016. V. 323. P. 2–14. DOI: 10.1016/j.jms.2015.12.007.
23. Поберовский А.В. Наземные измерения ИК-спектров солнечного излучения с высоким спектральным разрешением // Оптика атмосф. и океана. 2010. Т. 23, № 1. С. 56–58; Poberovskii A.V. High-resolution ground measurements of the IR spectra of solar radiation // Atmos. Ocean. Opt. 2010. V. 23, N 2. P. 161–164.
24. EU FP7 QA4ECV, grant agreement 607405, Task 3.5 Establish independent Atmosphere reference data sets. URL: <http://www.qa4ecv.eu/> (last access: 5.09.2018).
25. Hase F., Hammigan J.W., Coffey M.T., Goldman A., Hopfner M., Jones N.B., Rinsland C.P., Wood S.W. Intercomparison of retrieval codes used for the analysis of high-resolution groundbased FTIR measurements // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer. 2004. V. 87. P. 25–52.
26. NOAA/ESRL Physical Sciences Division, “The NCEP/NCAR Reanalysis Project”. URL: www.esrl.noaa.gov/psd/data/reanalysis (last access: 5.09.2018).
27. Kalnay E., Kanamitsu M., Kistler R., Collins W., Deaven D., Gandin L., Iredell M., Saha S., White G., Woolen J., Zhu Y., Leetmaa A., Reynolds B., Chelliah M., Ebisuzaki W., Higgins W., Janowiak J., Mo K.C., Ropelewski C., Wang J., Jenne R., Joseph D. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project // Bull. Amer. Meteorol. Soc. 1996. V. 77. P. 437–471.
28. URL: <https://www2.acom.ucar.edu> (last access: 5.09.2018).
29. Gribanov K., Jouzel J., Bastrikov V., Bonne J.-L., Breon F.-M., Butzin M., Cattani O., Masson-Delmotte V., Rokotyan N., Werner M., Zakharov V. Developing a western Siberia reference site for tropospheric water vapour isotopologue observations obtained by different techniques (*in situ* and remote sensing) // Atmos. Chem. Phys. 2014. V. 14. P. 5943–5957. URL: <https://doi.org/10.5194/acp-14-5943-2014>.
30. Wunch D., Toon G.C., Blavier J.F.L., Washenfelder R.A., Notholt J., Connor B.J., Griffith D.W.T., Sherlock V., Wennberg P.O. The total carbon column observing network // Philos. Trans. R. Soc. A Math. Phys. Eng. Sci. 2011. V. 369, N 1943. P. 2087–2112. DOI: 10.1098/rsta.2010.0240.

T.Yu. Chesnokova, M.V. Makarova, A.V. Chentsov, Yu.V. Voronina, V.I. Zakharov, N.V. Rokotyan, B. Langerock. Retrieval of carbon monoxide content in the atmosphere from high resolution atmospheric spectra.

Carbon monoxide CO is a marker of the atmosphere pollution caused by fires and combustion engines emission. The regular monitoring of the CO content in the atmosphere is needed to control the air quality. In the work, the results of CO atmospheric total content retrievals from the solar spectra recorded by Fourier spectrometers placed in Saint Petersburg (59.88N, 29.83E) and Kourovka (57.038N, 59.545E) stations, are presented. The impact of the difference in CO absorption line parameters in modern spectroscopic data bases on accuracy of the CO atmospheric content retrieval from the high resolution spectra is estimated.