

УДК 551.510.41

ВРЕМЕННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ОБЩЕГО СОДЕРЖАНИЯ ОКИСИ УГЛЕРОДА В АТМОСФЕРЕ В РАЙОНЕ САНКТ-ПЕТЕРБУРГА

© 2004 г. М. В. Макарова, А. В. Поберовский, Ю. М. Тимофеев

Научно-исследовательский институт физики Санкт-Петербургского государственного университета
198504 Санкт-Петербург, Петродворец, ул. Ульяновская, д. 1

E-mail: tim@troll.phys.spbu.ru

pober@troll.phys.spbu.ru

zaits@troll.phys.spbu.ru

Поступила в редакцию 04.12.2002 г., после доработки 17.06.2003 г.

Анализируются данные семилетних измерений общих содержаний (далее содержаний) окиси углерода (СО) в районе Санкт-Петербурга (59.88°N, 29.83°E, 20 м над уровнем моря). Случайные погрешности разового определения содержания СО и величин среднедневного содержания СО составляют порядка 5% и 1–4% соответственно. Сравнения результатов измерений для Санкт-Петербурга, Ни-Алезунда и Звенигорода показали, что средние значения содержаний СО для первых двух станций согласуются в пределах 1%, для Звенигорода аналогичные значения систематически выше на 15%. Средний годовой ход содержания СО в районе Санкт-Петербурга для периода 1995–2001 гг. имеет амплитуду порядка 24%. Максимальные значения содержания СО наблюдаются в феврале, а минимальные значения – в июле–августе. Анализ ряда измерений содержания СО выявил резкое повышение значений СО для района Санкт-Петербурга в ноябре–декабре 1998 г. Максимальные величины содержания СО значительно (на 25%) превысили среднее значение содержания СО, типичное для февральского максимума. Оценки скоростей роста содержания СО для Санкт-Петербурга показали, что в период 1995–1998 гг. наблюдалось увеличение содержания СО со скоростью ~3.5% в год. В 1998–1999 гг. началось падение содержания СО, и для периода 1999–2001 гг. оно составляло ~3.8% в год.

1. ВВЕДЕНИЕ

Антропогенные влияния на газовый состав атмосферы, особенно усилившиеся за последние полвека, стимулировали проведение многочисленных измерений содержания парниковых и фотохимически активных газов с целью изучения интенсивности их различных источников и стоков, долговременных трендов и, в конечном счете, прогноза их влияния на озоносферу и климат Земли [1–3]. Эти измерения проводятся с помощью различных локальных и дистанционных методов, в том числе с помощью космической техники [4–6]. Если ранее спутниковые измерения позволяли зондировать в основном верхние слои атмосферы, то запуск и функционирование новых приборов (например, MOPITT, SCIAMACHY) открывают возможности исследования содержания газов в тропосфере [7].

Окись углерода (СО) – фотохимически активная компонента, играющая ключевую роль в тропосфере Земли. Окисление СО в зависимости от содержания окислов азота может приводить как к образованию, так и к разрушению O_3 в тропосфере. Тесная взаимосвязь содержаний СО, ОН и O_3 характеризует СО как важнейшую газовую ком-

поненту, регулирующую окислительную способность тропосферных слоев [1–4].

Основными источниками окиси углерода являются: неполное сгорание углеводородсодержащих видов топлив (материалов), горение биомассы и фотохимическое окисление метана и других углеводородов в атмосфере. Большинство источников СО располагается на континентах, среди них следует отметить круглогодичные антропогенные эмиссии, горение биомасс в засушливые сезоны в тропиках и в теплое время в высоких широтах. Фотохимическое окисление метана и углеводородов является существенным источником для тропических широт, а также для высоких широт в летнее время. Основной сток атмосферного СО – реакция с радикалом гидроксила в тропосфере, которая приводит к образованию CO_2 и разрушению O_3 . В условиях загрязненных промышленных территорий роль стока могут выполнять окислы азота, и в этом случае образуются CO_2 и O_3 . В настоящее время вклад антропогенных источников составляет примерно половину всех источников СО в Северном полушарии [1–3].

С 1995 г. в НИИ Физики Санкт-Петербургского государственного университета начаты измерения общих содержаний (далее содержаний) СО с помощью спектроскопической методики [8]. Ре-

Таблица 1. Погрешности определения содержания CO в спектральном интервале 2140–2180 см⁻¹

Источник погрешности	δw_{CO} , %
Случайные погрешности измерений	
1.5%	1.0
3.0%	2.0
4.0%	3.0
Погрешность задания нулевого уровня сигнала U_0	
0.5%	0.5
1.0%	1.0
Погрешность задания полуширины аппаратной функции ($\Delta\nu$) спектрометра	
1.0%	0.5
3.0%	2.5
Отсутствие информации о значении величины $\Delta\nu$ (определение $\Delta\nu$ из спектра)	0.5
Неопределенность спектроскопической информации	3.5
Отличия реального и используемого при интерпретации вертикальных профилей:	
1. Температуры (на величину линейного сдвига $\Delta T = 1$ К;	<0.5
2. Окиси углерода	–
	3.0
Суммарная погрешность единичного измерения	3–5

результаты измерений содержания CO анализировались с целью выявления различных составляющих его временной изменчивости: долговременных, периодических и различного рода нерегулярных возмущений. Долговременные изменения (тренды) содержаний климатообразующих газов имеют особое значение, поскольку сведения о них используются в глобальных моделях атмосферы для прогноза климатических изменений. Годовой ход, отражая характер региональных источников и стоков исследуемого газа, может быть использован для оценки их интенсивностей с помощью региональных атмосферных моделей. Анализ так называемых “аномальных” серий внутри всего ряда измерений совместно с привлечением различной дополнительной информации (метеорологической и т.д.) позволяет выделить основные факторы, являющиеся причинами наблюдаемых изменений содержания газов для Северо-западного региона России.

2. АППАРАТУРА И МЕТОДИКА ИНТЕРПРЕТАЦИИ

С целью изучения временной изменчивости характеристик газового состава атмосферы (метан, водяной пар, окись углерода и т.д.) в районе Санкт-Петербурга (Ст. Петергоф, 59.88°N, 29.83°E, 20 м над уровнем моря) с 1991 г. проводятся измерения спектров прямого ИК солнечного излучения. Эти спектры регистрируются в диапазоне длин волн от 3.15 мкм до 4.55 мкм с разрешением хуже 0.3 см⁻¹ при помощи дифракционного спектрометра с фотоэлектрической системой наведения на Солнце. Определение общих содержаний газов в атмосфере производится с помощью методики интерпретации ИК спектров, основанной на минимизации среднеквадратических рассогласований между измеренными и рассчитанными значениями сигнала. При этом применяется метод статистической регуляризации. Аппаратура и методика интерпретации подробно описана в статье [9], посвященной определению содержания метана.

Для определения содержания CO нами используются измерения прямого солнечного излучения в спектральном интервале 2140–2180 см⁻¹. Основные поглощающие газы в указанном интервале – CO, H₂O и N₂O. При интерпретации измеренных спектров одновременно определялись содержания CO и H₂O. Поскольку N₂O относится к долгоживущим и медленно меняющимся атмосферным газам, значение величины содержания N₂O фиксировалось на среднем значении содержания N₂O в атмосфере (0.24 атм см). Как показывают расчеты, если значение содержания N₂O в атмосфере известно с погрешностью не более 10%, то дополнительный вклад в случайную погрешность содержания CO за счет неопределенности в содержании N₂O не превышает 1%.

Анализ погрешностей определения содержания CO проводился на основе численных экспериментов по замкнутой схеме, включающей:

1. расчет спектров солнечного излучения в интервале 2140–2180 см⁻¹ с добавлением погрешностей измерений различной природы;
2. определение содержания CO по рассчитанным спектрам с помощью спектральной методики интерпретации [9].

При этом получены оценки влияния случайных погрешностей измерений, точности задания нулевого уровня сигнала, погрешности задания полуширины аппаратной функции спектрального прибора (или определения ее в процессе решения обратной задачи), различий между используемыми и истинными вертикальными профилями температуры и отношения смеси поглощающих газов на погрешность определения содержания CO в атмосфере. В табл. 1 даны значения погрешностей определения содержания CO в атмосфере при наличии случайных и систематических оши-

бок. В численных экспериментах расчеты производились для типичных условий эксперимента: уровня шума 1–3%, полуширины аппаратной функции $\Delta\nu = 0.5\text{--}0.8\text{ см}^{-1}$ с использованием среднесезонных вертикальных профилей температуры атмосферы и отношения смеси CO , H_2O и N_2O для умеренных широт Северного полушария (модели AFGL и NCAR). При расчетах спектров поглощения рассматриваемых газов использовалась спектроскопическая информация из базы данных HITRAN'96 [10].

Проведенные исследования погрешностей метода показали, что спектральный интервал $2140\text{--}2180\text{ см}^{-1}$, используемый для определения содержания CO , обладает слабой температурной чувствительностью (см. табл. 1), что не накладывает жестких требований к заданию вертикального профиля температуры.

Существенной особенностью спектроскопической методики определения значений общих содержаний атмосферных газов при среднем спектральном разрешении является необходимость использования априорного (модельного) вертикального профиля отношения смеси. Как показали оценки, полученные при численном моделировании методики интерпретации, вид используемого вертикального профиля отношения смеси CO не вносит существенной погрешности в получаемые значения содержания CO [11].

Как следует из табл. 1, основными факторами, определяющими погрешности спектроскопического метода измерений содержания CO (δw_{CO}), являются случайный шум измерений, влияние которого можно минимизировать при многократных измерениях в течение дня, отличия реального и используемого при интерпретации вертикального профиля CO , а также неопределенность спектроскопической информации. Последний фактор вносит систематические погрешности, которые не существенны при анализе вариаций содержания CO .

При типичных условиях состояния атмосферы и функционирования прибора случайные погрешности разового определения содержания CO и величин среднесуточного содержания CO составляют ~5% и 1–4% соответственно. Последняя величина зависит как от числа измерений, осуществленных в течение рассматриваемого дня, так и от естественной изменчивости содержания CO в течение периода измерений. Максимальный разброс полученных в течение дня значений содержания, как правило, не превышал 5–6%, что согласуется с оценками погрешностей единичных измерений.

На рис. 1 для примера показаны экспериментальный, расчетный (U , в относительных единицах) и разностный спектр (δU) измеряемого сигнала после решения обратной задачи – определения содержания CO (23.08.2001 г.). Разностный

спектр δU приведен в единицах среднеквадратического отклонения (СКО) шума измерений и демонстрирует хорошее согласие расчетных и экспериментальных данных: величины рассогласований, как правило, не превышают удвоенных значений СКО случайного шума измерений.

Для независимой косвенной проверки качества работы аппаратуры и методики интерпретации при определении содержания CO определялось общее содержание водяного пара с использованием измерений солнечного излучения тем же прибором в том же спектральном интервале и с помощью той же методики интерпретации. Спектроскопические определения содержания H_2O были сопоставлены с результатами радиозондирования атмосферы в марте и августе 1999 г. Результаты зондирования, проводимого в полдень по Гринвичу, были получены на метеостанции пос. Воейково (~50 км от Петергофа) [12]. Данные спектроскопических измерений содержания H_2O также отбирались для интервала 12 ± 1 ч (по Гринвичу). Результаты сравнения величин содержания H_2O , измеренных радиозондом (содержание H_2O (р)) и определенных по ИК спектрам (содержание H_2O (с)), приведены на рис. 2. Среднеквадратическое отклонение значений сравниваемых величин составило 0.007 г/см^2 или ~2% от минимального значения содержания H_2O (наблюдавшегося в 1999 г.), что меньше оценок погрешности определения содержания H_2O спектроскопическим методом (~6%). Результаты сравнений определения содержания H_2O независимыми методами косвенно подтверждают полученные оценки точности спектроскопических измерений содержания CO .

3. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ ОБЩИХ СОДЕРЖАНИЙ CO В АТМОСФЕРЕ В РАЙОНЕ САНКТ-ПЕТЕРБУРГА

Для определения содержаний CO использовались ИК спектры солнечного излучения, измеренные в период с 1995 по 2001 г. Распределение дней измерений в течение года неравномерное и определяется статистикой солнечных дней в Санкт-Петербурге. Месяцами, наиболее обеспеченными измерениями, являются март, июнь и август. Наименее обеспечен измерениями период с ноября по январь. Ряд содержаний CO включает в себя около 200 среднесуточных значений (рис. 3), каждое из которых вычислялось как средневзвешенное значений единичных измерений содержания CO в течение дня (в качестве весов использовались величины, обратно пропорциональные среднеквадратическим рассогласованиям между измеренным и рассчитанным спектрами).

3.1. Изменчивость содержания CO . Содержащаяся в атмосфере окись углерода характеризуется сильной временной изменчивостью. Это объясняется высокой химической активностью

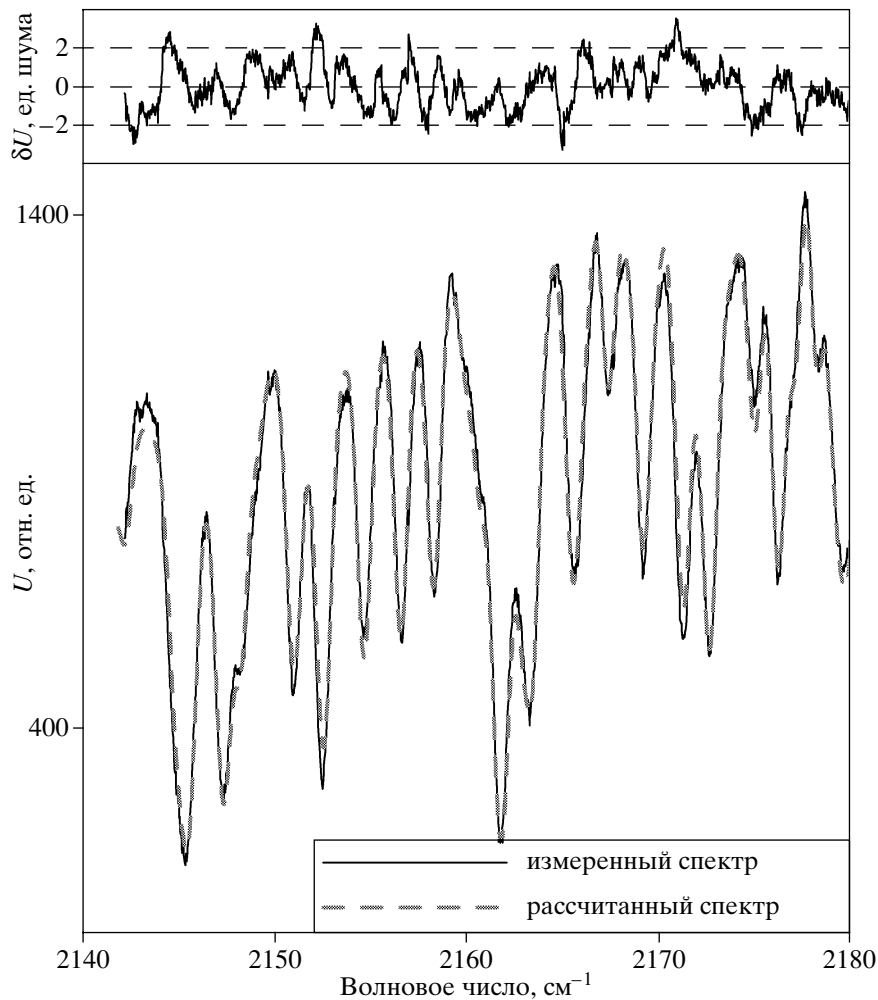


Рис. 1. Экспериментальный, расчетный и разностный спектры.

газа и, как следствие, относительно коротким временем жизни (от нескольких недель до года в зависимости от географического положения и сезона) CO в атмосфере [13]. Экстремальные значения среднедневных величин содержания CO, наблюдавшиеся для района Санкт-Петербурга с 1995 г. по 2001 г. составили: минимальное – 0.134×10^{19} мол/см² (август 1997 г.), максимальное – 0.390×10^{19} мол/см² (декабрь 1998 г.). Среднее зна-

чение содержания CO за весь период наблюдений составило 0.236×10^{19} мол/см².

В октябре 1996 г. в течение морской экспедиции по центральной Атлантике между 60°N и 45°S осуществлялись измерения содержания CO, проводившиеся с помощью Фурье-спектрометра высокого разрешения [14]. В табл. 2 даны для сравнения средние значения содержания CO для пояса широт 55°N–60°N в Атлантике и среднеоктябрьские (1996 г.) значения содержания CO для района Санкт-Петербурга и Звенигорода. Все три района наблюдений относятся к одному широтному поясу, однако, как видно из табл. 2, значения содержаний CO для Атлантики и Санкт-Петербурга очень близки (отличие составляет ~3%), в то время как значения содержания CO для Звенигорода на 40% выше. Таким образом, значения содержания CO, наблюдающиеся в районе Санкт-Петербурга, хорошо согласуются с результатами атлантических измерений. Хорошее согласие (в пределах 1%) также было получено при сравне-

Таблица 2. Результаты спектроскопических измерений содержания CO в октябре 1996 г. для различных географических пунктов

	Центральная Атлантика, 55° N–60° N	Санкт-Петербург	Звенигород
содержание CO (октябрь 1996 г.), 10^{19} мол/см ²	0.189	0.183	0.266

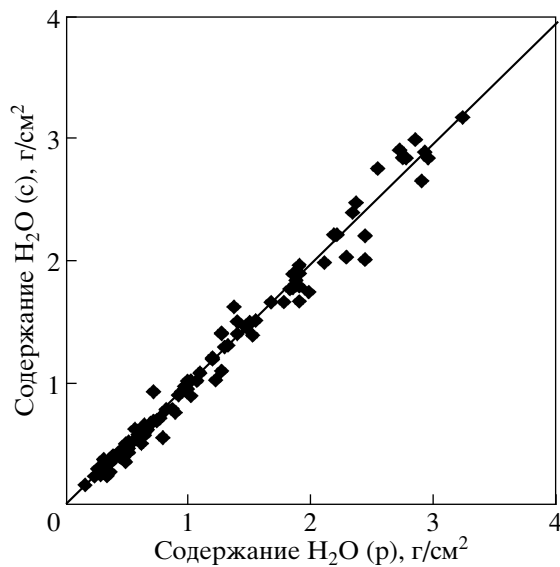


Рис. 2. Сравнение величин содержания H_2O , измеренных радиозондом (содержание H_2O (p)) и определенных по ИК спектрам (содержание H_2O (c)).

нии с данными по содержанию CO для высоких широт Северного полушария (станция Ни-Алезунд), приведенными в работе [15].

Существенные расхождения наблюдаются со звенигородскими значениями содержания CO . Это может быть связано, во-первых, с пространственными вариациями поля содержания CO (влиянием мощных местных и других континентальных источников) и, во-вторых, с отсутствием

взаимокалибровки используемых модификаций спектроскопических методик измерений содержания CO . О важности второго фактора говорит статья [16], посвященная взаимокалибровке спектроскопических измерений содержания CH_4 .

3.2. Годовой ход содержания CO . Содержание окиси углерода в атмосфере обладает ярко выраженным годовым ходом, который может иметь амплитуду до $\sim 30\%$ от средней величины. Максимальные значения содержаний CO отмечаются в период с конца осени до начала весны и соответствуют постепенному накоплению CO в атмосфере, когда там наименьшие значения концентрации OH . В апреле–июне CO подвергается быстрому разрушению за счет реакции с OH , что приводит к уменьшению количества CO в атмосфере до его годового минимума.

Средний годовой ход содержания CO (d) для 1995–2001 гг., а также его межгодовая изменчивость (s_d) для района Санкт-Петербурга проиллюстрированы на рис. 4. В течение лета значения величины s_d ниже, чем для остальных сезонов, минимальные значения s_d наблюдаются для района Санкт-Петербурга в июле. Как видно из рис. 4, средний годовой ход содержания CO в 1995–2001 гг. имеет амплитуду порядка 25%, с максимальными значениями содержания CO в феврале и минимальными – в июле–августе. Годовой ход и характер межгодовой изменчивости содержания CO в атмосфере объясняются временным поведением интенсивностей источников и стоков CO . Анализ влияния различных источников и стоков на глобальное распределение CO и его временной ход

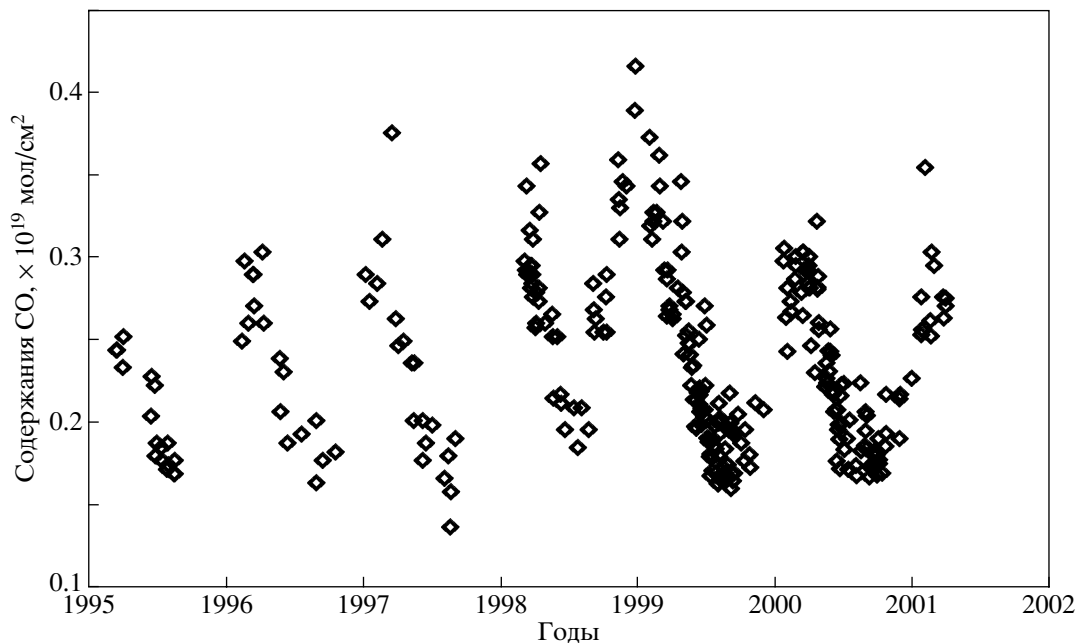


Рис. 3 Среднедневные значения содержания CO в районе Санкт-Петербурга.

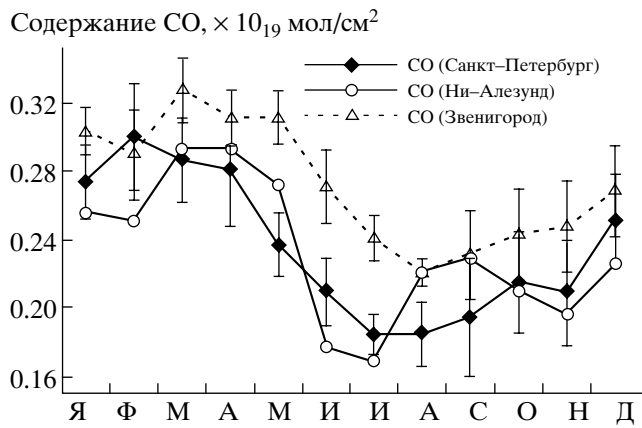


Рис. 4. Средние годовые ходы содержания CO для района Санкт-Петербурга, Ни-Алезунда и Звенигорода.

был проведен с помощью трехмерной модели NOAA GFDL GCTM (Geophysical Fluid Dynamics Laboratory three-dimensional global chemical transport model) в работе [13]. Результаты расчетов глобального распределения отношений смеси CO представлены в сравнении с данными измерений приземных значений отношений смеси CO на конкретных станциях сети NOAA. В частности, для каждой станции приведены вклады различных источников CO в формирование годового хода отношения смеси CO. Анализ результатов моделирования приземных отношений смеси CO для станций NOAA в Европе и Арктике, ближайших к Санкт-Петербургу (например, станция Baltic Sea, 55°30'N, 16°40'E, 7 м над уровнем моря; станция Heimaey, Iceland, 63°15'N, 20°09'W, 100 м над уровнем моря), показывает, что основным источником, определяющим годовой ход отношения смеси CO на указанных станциях, является ископаемое топливо (уголь, нефть, газ). Максимум годового хода CO для этих станций проявляется с января по апрель, минимум – с июня по август. По-видимому, характер наблюдаемого в районе

Таблица 3. Значения амплитуд среднего годового хода ($A_{г.х.}$), средние значения содержания CO (w_m) за соответствующие периоды измерений, разницы $\Delta_m = w_m(\text{Звенигород, Ни-Алезунд}) - w_m(\text{Санкт-Петербург})$ для станций Ни-Алезунд, Звенигород, Санкт-Петербург

	Станция		
	Звенигород	Санкт-Петербург	Ни-Алезунд
Широта, °N	55.4	59.88	78.9
Период	1995–1999	1995–2001	1992–1995
$A_{г.х.}$, %	20	24	26
w_m , 10^{19} мол/см ²	0.272	0.236	0.233
Δ_m , %	+15	–	–1

Санкт-Петербурга годового хода содержания CO, согласуясь с годовым ходом приземных отношений смеси CO (на сети станций NOAA), также объясняется интенсивным использованием ископаемого топлива (особенно в холодные периоды для отопления). Здесь следует заметить, что сравнения содержаний газов и их приземных отношений смеси следует проводить осторожно, поскольку отношение смеси – локальная характеристика, а общее содержание – величина интегральная, несущая информацию обо всех атмосферных слоях. Однако для такого хорошо перемешанного (в тропосфере) газа как CO основное количество которого содержится в тропосфере, именно тропосферные изменения отношений смеси имеют определяющее влияние на общее содержание газов.

Количество станций по измерению содержания CO мало по сравнению с сетью наблюдений за приземными значениями отношений смеси, которые и обеспечивают основной массив данных по CO. Самый длинный ряд измерений содержания CO имеется в ИФА РАН [17]. Он включает в себя наблюдения на Звенигородской научной станции (ЗНС, 55.4°N, 36.5°E) в период с 1970 г. и по настоящее время. Среднемесячные значения содержаний CO из данного ряда наблюдений с 1995 г. по 1999 г. были любезно предоставлены для сопоставлений Е.И. Гречко и А.В. Джолой (ИФА РАН) [17]. Другой наиболее близкой географической точкой, где проводятся регулярные измерения содержания CO, является приполярная станция Ни-Алезунд, Шпицберген (Network for Detection of Stratospheric Change station in Ny Alesund, 78.9°N, 11.9°E) [14]. В табл. 3 для всех трех рассматриваемых станций сведены:

1. используемые (доступные нам) для анализа периоды измерений;
2. значения амплитуд среднего годового хода ($A_{г.х.}$);
3. средние значения содержания CO (w_m) за соответствующие периоды измерений;
4. разницы $\Delta_m = w_m(\text{Звенигород или Ни-Алезунд}) - w_m(\text{Санкт-Петербург})$.

Из табл. 3 видно, что амплитуды годового хода растут с широтой и для трех станций, расположенных в порядке возрастания широты, имеют следующие значения: 20%, 24% и 26%.

Значения Δ_m , приведенные в последней строке табл. 3, характеризуют систематическое различие значений содержания CO, измеряемых в Санкт-Петербурге, Звенигорода и Ни-Алезунда. Видно, что средние значения содержания CO для Санкт-Петербурга и Ни-Алезунда согласуются в пределах 1%, в то время как для Звенигорода аналогичные значения систематически выше на ~15%.

Для всех трех станций на рис. 4 приведены кривые среднего годового хода. Из рисунка видно, что годовые ходы для Санкт-Петербурга и Звени-

города сдвинуты друг относительно друга на месяц: если максимум в Санкт-Петербурге приходится на февраль, то для Звенигорода это март, и, соответственно, минимум в первом случае наблюдается в июле, а во втором – в августе. Годовой ход содержания CO для Ни-Алезунда более сложный, чем для Санкт-Петербурга или Звенигорода. Он имеет два максимума (в марте–апреле и в сентябре) и два минимума (в ноябре и сильный летний в июле, как и для Санкт-Петербурга).

3.3. Нерегулярные возмущения содержания CO. Ряд содержаний CO можно представить как суперпозицию долговременных изменений, годового хода и нерегулярных возмущений. Последние могут быть значительны и вызываться естественными вариациями в интенсивностях источников CO. В качестве примера рассмотрим период с сентября 1998 г. по январь 1999 г., в течение которого наблюдалось резкое увеличение содержания CO для района Санкт-Петербурга и Звенигорода, а также приземных отношений CO для всего Северного полушария, в особенности, для станций расположенных в высоких широтах (Point Barrow, Alaska, 71.32°N, 156.61°W).

Зарегистрированный в Санкт-Петербурге и Звенигороде пик содержания CO пришелся на ноябрь–декабрь 1998 г (см. рис. 5). В Санкт-Петербурге пик был выражен сильнее, чем в Звенигороде. Максимальные значения содержания CO, наблюдавшиеся в Санкт-Петербурге, составляли $\sim(0.37\text{--}0.38) \times 10^{19}$ мол/см², что значительно (на $\sim 25\%$) превышало средние значения содержания CO, типичные для февральского максимума. В Звенигороде пиковые значения в ноябре–декабре 1998 г. были на уровне мартовского максимума.

Аномально высокие значения приземных отношений смеси CO, отмеченные в рассматриваемый период, проиллюстрированы на рис. 6б, 6в). На рис. 6б приведены ряды остатков приземных отношений смеси CO, измеренных на приполярной станции Point Barrow, Alaska (71.32°N, 156.61°W) [4]. На рис. 6в – ряды остатков глобально осредненных приземных отношений смеси CO и для каждого полушария в отдельности [4]. Под рядами остатков (приземных отношений смеси или содержания) здесь подразумевается массив исходных значений, из которых был исключен средний годовой ход.

Результаты анализа рядов остатков содержания и приземных отношений смеси CO, приведенных на рис. 6, показали:

1. Аномалии в содержании CO наблюдаются во всех анализируемых данных. Начало и конец периода, характеризующегося аномально высокими значениями содержания CO и приземными отношениями смеси CO, совпадают.

2. Максимальные значения в ряду остатков содержания CO (пик) для Санкт-Петербурга (и для

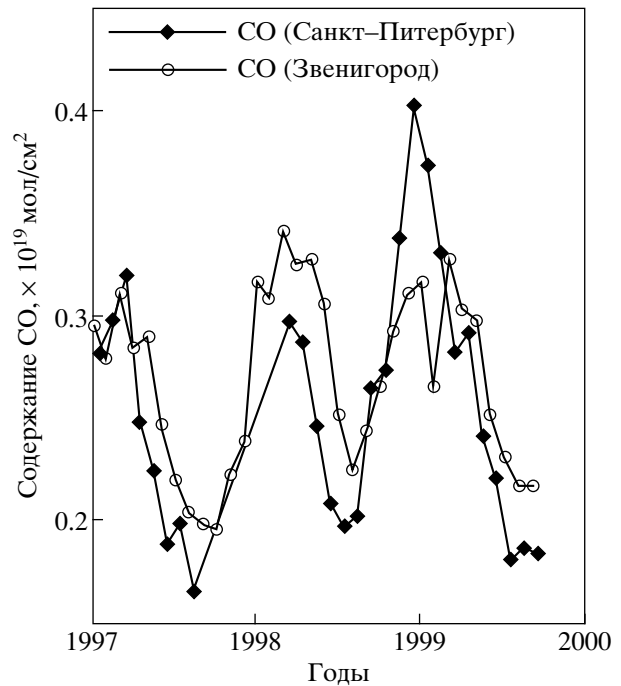


Рис. 5. Среднемесячные значения содержания CO для района Санкт-Петербурга и Звенигорода в период с 1997 г. по 2000 г.

Звенигорода) наблюдались примерно на месяц позже по сравнению с приземными отношениями смеси CO на станциях Северного полушария (и, в частности, станции Point Barrow). Причина такого смещения пиков не ясна, можно предположить, что это связано со временем переноса воздушных масс, богатых CO или с “инертностью” содержания CO по сравнению с приземными отношениями смеси.

3. Значения приземных отношений смеси в максимуме для высоких широт Северного полушария существенно (в два раза) превысили среднее по полушарию (см. рис. 6).

Как для содержаний, так и для приземных отношений смеси CO, севернее расположенные станции зарегистрировали более интенсивные максимумы. Это связано с тем, что, вероятно, основной причиной увеличения содержания CO в атмосфере в сентябре 1998 г. – январе 1999 г. могли послужить пожары в лесах высоких широт Северного полушария.

3.4. Долговременные тренды содержания CO. В последние десятилетия большое внимание уделяется оценкам долговременных трендов содержания CO. Эти оценки осуществляются по результатам измерений как содержаний, так и приземных отношений смеси CO (см. табл.4). Газохроматографический анализ пузырьков воздуха, содержащихся во льдах Гренландии, показал, что содержание CO в атмосфере в период 1850–1950 гг. возрастало со скоростью $\sim 0.3\%$ в год [18]. Результаты спе-

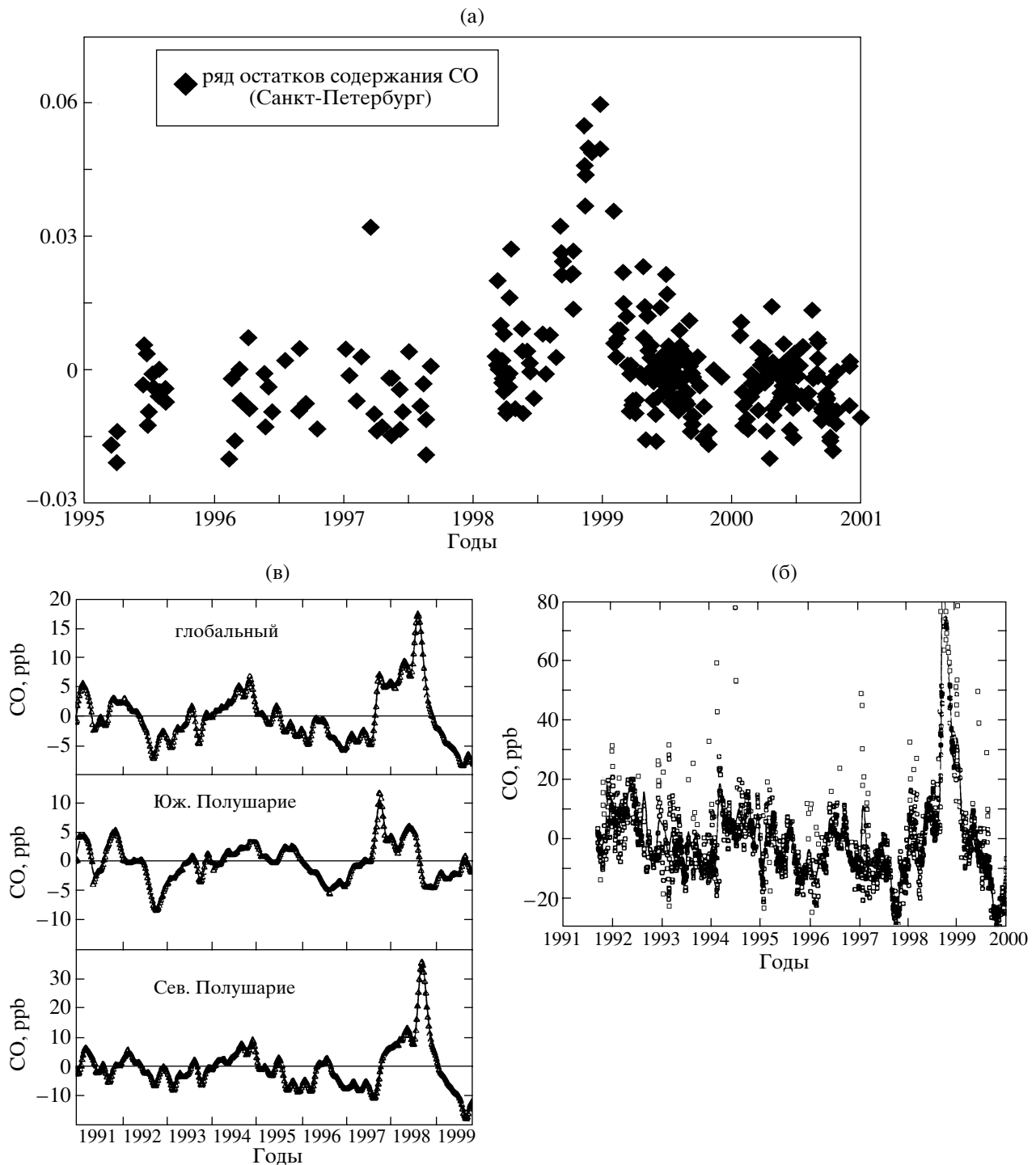


Рис. 6. Ряды остатков: а – содержания CO для района Санкт-Петербурга; б – приземных отношений смеси CO для станции Point Barrow, Alaska (71.32°N, 156.61°W) [4]; в – глобально осредненных отношений смеси CO (сеть станций NOAA) [4].

ктроскопических и газохроматографических измерений показывают положительный тренд CO в атмосфере в период с 50-х годов до середины 80-х. Содержания CO, измеренные в Звенигороде, характеризовались возрастанием $\sim 1.3\%$ в год для

1970–1982 гг. Нерегулярно измерявшиеся в 1950–1951 гг. Мжеоттом спектры в области полос поглощения CO на станции Юнгфрау, были обработаны заново Зандером и сравнивались с аналогичными измерениями 1985–1987 гг. В результате

Таблица 4. Оценки долговременных трендов СО в атмосфере

Станция	Вид измерений	Высота над уровнем моря, км	Период измерений	Тренд, % в год	СКО тренда, % в год	Атмосферный слой, км
Звенигородская Научная Станция ИФА РАН	Спектроскопические	0.2	70–82	1.3	0.8	0.2–10
			80–95	0.2	0.2	
			84–95	0.4	0.2	
			84–97	0.02	0.18	
Научная Станция Юнгфрау	Спектроскопические	3.58	50–87	0.85	0.08	>3.5
			84–95	-0.18	0.16	
			84–97	-0.53	0.18	
Обсерватория Китт Пик	Спектроскопические	2.09	78–97	-0.27	0.17	2.1–14
Северное полушарие, 20 станций NOAA/CMDL	Газохроматографические	0–0.2	90–95	-2.0	0.2	Океанский пограничный слой
Южное полушарие, 2 станции NOAA/CMDL	Газохроматографические	0–0.2	81–86	0.8	0.7	Океанский пограничный слой
			87–92	-1.4	0.9	

было получено значение тренда, составляющее ~0.85% в год [18]. Однако, как видно из табл. 4, оценки трендов СО с середины 80-х гг. значительно изменились как для содержаний СО, так и для приземных отношений смеси. Оценки тренда содержания СО для пограничного слоя Южного полушария в 1987–1992 гг. показали его падение со скоростью ~1.4 % в год. Еще более быстрое уменьшение СО ~2.0% в год было отмечено (тоже в пограничном слое) в Северном полушарии для периода 1990–1995 гг. В качестве основной причины, приведшей к падению содержания СО в атмосфере, предполагается извержение вулкана Пинатубо (1991 г.), приведшее к следующей цепочке процессов в атмосфере: уменьшение количества О₃ в стратосфере ⇒ более глубокое проникновение УФ радиации в тропосферу ⇒ рост количества ОН (который является основным стоком СО). Низкий уровень эмиссии СО в атмосферу за счет горения биомассы частично тоже мог повлиять на наблюдавшееся резкое уменьшение количества СО [18].

Имеющийся ряд измерений вблизи Санкт-Петербурга в силу относительно короткого периода наблюдений (семь лет), а также из-за сильной изменчивости содержания СО в атмосфере позволяет только приблизительно оценивать долговременные изменения содержания СО. На рис. 7 даны оценки скорости роста и погрешности ее определения для двух периодов: с 1995 по первую половину 1998 гг. и со второй половины 1999 по 2001 гг. Эти оценки получены на основе анализа соответствующих рядов остатков среднемесячных величин содержания СО (δCO) (из ряда среднемесячных значений содержания СО был вычтен средний годовой ход содержания СО). Пери-

од второй половины 1998 г.–начала 1999 г. здесь исключен из рассмотрения, поскольку для него наблюдалось сильное увеличение (отнесенное нами к нерегулярным возмущениям) содержания СО, о котором уже говорилось в предыдущем разделе. Скорости роста содержания СО составили $(3.5 \pm 2.3)\%$ в год в 1995–начале 1998 гг. и $(-3.8 \pm 1.5)\%$ в год во второй половине 1999–2001 гг. Видно, что рост сменился падением в конце 1998–начале 1999 гг. Полученные нами оценки качественно совпадают с результатами анализа гло-

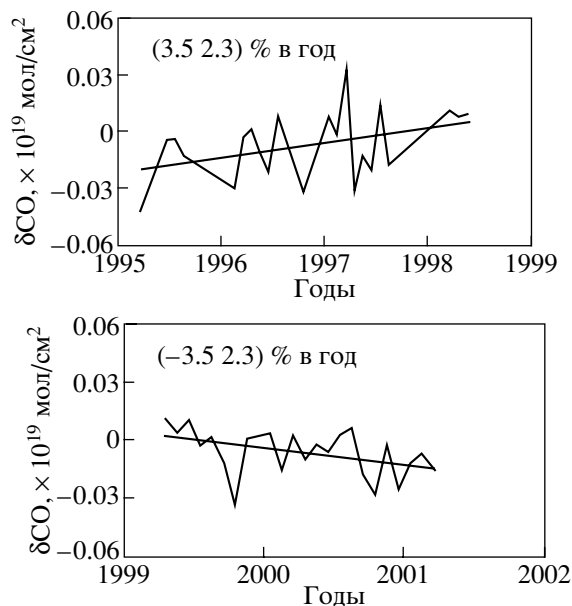


Рис. 7. Оценки скорости роста содержания СО для района Санкт-Петербурга для периодов 1995–первая половина 1998 гг. и вторая половина 1999–2001 гг.

бальных скоростей роста отношения смеси CO, полученными на сети станций NOAA CMDL для периода 1995–2001 гг. [19]. Для периода 1995–1998 гг. в среднем наблюдался рост отношений смеси CO, а в 1998–1999 гг. он сменился падением. Количественные оценки скоростей роста сравнить достаточно сложно, поскольку для рассматриваемого временного интервала колебания глобальной скорости роста отношений смеси CO относительно ее нулевого уровня значительны и составляют (± 15 – 20 % в год) [19].

4. ВЫВОДЫ

1. Приведены результаты спектроскопических измерений содержания CO вблизи Санкт-Петербурга за 1995–2001 гг. Точность этих измерений изучена с помощью численного моделирования процесса измерений и косвенно – на основе сравнений спектроскопических измерений общего содержания водяного пара с радиозондовыми измерениями. Погрешности определения среднедневных значений содержания CO составляют 1–4% в зависимости от числа измерений в течение дня.

2. Средние значения содержания CO для Санкт-Петербурга и Ни-Алезунда согласуются в пределах 1 %, в то время как для Звенигорода аналогичные значения систематически выше на ~15%. Результаты измерений содержания CO, проводившихся в Центральной Атлантике в октябре 1996 г., показывают согласие значений содержания CO с зарегистрированными в районе Санкт-Петербурга в пределах 3%. Существенные заметные расхождения со звенигородскими значениями содержания CO могут быть связаны, во-первых, с пространственными региональными вариациями поля содержания CO (влиянием мощных местных и других континентальных источников) и, во-вторых, с наличием систематических погрешностей в используемых модификациях спектроскопических методик измерений содержания CO.

3. Средний годовой ход содержания CO в районе Санкт-Петербурга для периода 1995–2001 гг. имеет амплитуду порядка 24 % от среднего уровня. Максимальные значения содержания CO наблюдаются в феврале, а минимальные значения – в июле–августе. Характер наблюдаемого в районе Санкт-Петербурга годового хода содержания CO, согласуясь с годовым ходом приземных отношений смеси CO (на сети станций NOAA), объясняется интенсивным использованием ископаемого топлива, сильно возрастающим в холодные сезоны года.

4. Сравнения временного поведения содержания CO для трех станций (Санкт-Петербург, Звенигород, Ни-Алезунд), где проводятся спектроскопические измерения содержания CO, показали:

– наличие сдвига годового хода для Санкт-Петербурга и Звенигорода на один месяц,

– более сложный годовой ход содержания CO, наблюдаемый на станции Ни-Алезунд, чем в Санкт-Петербурге или Звенигороде;

– рост амплитуды годового хода с широтой для Звенигорода (20%), Санкт-Петербурга (24%) и Ни-Алезунда (26%).

5. Проведенный анализ ряда остатков содержания CO (δ CO) после исключения среднего годового хода показал резкое повышение значений δ CO для района Санкт-Петербурга, пик которого пришелся на ноябрь–декабрь 1998 г. Максимальные значения содержания CO заметно (на ~25%) превысили среднюю величину содержания CO, типичную для февральского максимума. Результаты измерений содержания CO в Звенигороде имеют совпадающий по времени пик с меньшей амплитудой. В качестве основной причины наблюдавшихся аномалий содержания и приземных отношений смеси выдвигаются сильные лесные пожары в высоких широтах Северного полушария.

6. Оценки скоростей роста содержания CO для Санкт-Петербурга показали, что в период 1995–1998 гг. наблюдалось увеличение содержания CO со скоростью ~3.5% в год. В 1998–1999 гг. началось падение содержания CO, и для периода 1999–2001 гг. оно составляло ~3.8% в год. Полученные результаты качественно согласуются с результатами измерений приземных отношений смеси CO в атмосфере [19].

Авторы выражают глубокую признательность сотрудникам ИФА РАН Е.И. Гречко и А.В. Джолу за возможность использования результатов их измерений. Исследования представленные в данной работе были поддержаны грантами РФФИ: №№ 00–05–65224, 03–05–06136–мас, 02–05–64711; ИНТАС–IESA–99–1511; грантом для молодых кандидатов наук Санкт-Петербурга PD03–1.5–104.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), Climate Change 2001: The Scientific Basis, <http://www.ipcc.ch/pub/tar/wg1/index.htm>
2. Scientific Assessment of Ozone Depletion: 1998// WMO. Global Ozone Research and Monitoring Project - Report № 44. Geneva, 1999. P. 563.
3. Scientific Assessment of Ozone Depletion: 1994// WMO. Global Ozone Research and Monitoring Project - Report No. 37. Geneva, 1995. P. 575.
4. Climate Monitoring and Diagnostics Laboratory Summary Report No. 25 1998–1999. NOAA, Boulder, Colorado, January 2001. P. 154.
5. Clerbaux C., et al. Retrieval of CO Columns from IMG/ADEOS Spectra // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1999. V. 37. № 3. P. 1657–1661.
6. Dianov-Klokov V.I., Yurganov L.N. A spectroscopic study of the global space-time distribution of CO // Tellus. 1981. V. 33. P. 262–273.

7. *Edwards D.P., Halvorson C.M., Gille J.C.* Radiative transfer modeling for the EOS Terra satellite Measurement of Pollution in the Troposphere (MOPITT) instrument. // *J. Geoph. Res.* 1999. V. 104. № D14. P. 16755–16775.
8. *Поберовский А.В., Мироненков А.В., Макарова М.В.* Наземные спектроскопические измерения содержания метана, окиси углерода и закиси азота в атмосфере. // *Оптический журнал.* 1998. Т. 65. № 5.
9. *Мироненков А.В., Поберовский А.В., Тимофеев Ю.М.,* Методика интерпретации инфракрасных спектров прямой солнечной радиации для определения общего содержания атмосферных газов // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана.* 1996. Т. 32. № 2. С. 207–215.
10. *Rothman L.S.* HITRAN'96. Hitran newsletter. September, 1996, № 5.1.
11. *Мироненков А.В., Макарова М.В., Поберовский А.В.* Результаты спектроскопических измерений общего содержания атмосферного СО в Петергофе // *Вестник СПбГУ,* 1997. Сер. 4. Вып. 3. № 18.
12. <http://weather.uwyo.edu/> (University of Wyoming's Department of Atmospheric Science web site).
13. *Holloway T., Levy H., Kasibhatla P.* Global distribution of carbon monoxide // *J. Geophys. Res.* 2000. V. 105. № D10. P. 12, 123–12, 134.
14. *Notholt J. et al.* Latitudinal variations of trace gas concentrations in the free troposphere measured by solar absorption spectroscopy during a ship cruise. // *J. Geophys. Res.* 2000. V. 105. № D1. P. 1337–1349.
15. *Notholt J., Toon G., Stordal F., Solberg S., Schmidbauer N., Becker E., Meier A., Sen B.* Seasonal variations of atmospheric trace gases in the high arctic at 79°N. // *J. Geophys. Res.* 1997. V. 102. № D11. P. 12855–12861.
16. *Ф.В. Кашин, Н.Е. Каменоградский, Е.И. Гречко, А.В. Джола, А.В. Поберовский, М.В. Макарова.* Сравнение различных методик наземных спектроскопических измерений общего содержания метана в атмосфере // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана.* 2001. Т. 37. № 3. С. 339–345.
17. *Grechko E.I., Dzhola A.V., Yurganov L.N.* Variations of carbon monoxide, methane, water vapor in the total atmospheric column over Russia (Zvenigorod station) between 1970 and 1999. *Proceedings of IRS 2000: Current Problems in Atmospheric Radiation / Ed W.L. Smith, Yu.M. Timofeyev. A. Hampton: Deepak Publishing,* 2001. P. 867–868.
18. *Yurganov L.* Carbon monoxide interannual variations and trends in the Northern Hemisphere: role of OH. <http://www.mit.edu/afs/athena.mit.edu/org/i/igas/www/newsletter/igs21/trends.html>.
19. <http://www.cmdl.noaa.gov/ccgg/index.html>.