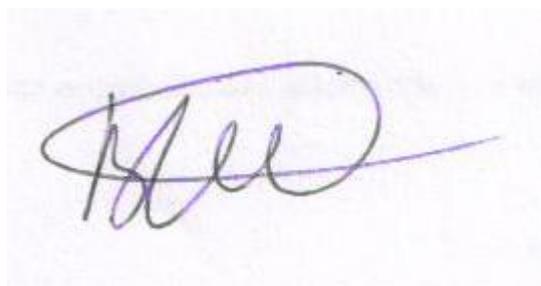


На правах рукописи

A handwritten signature in blue ink, consisting of stylized Cyrillic letters, likely representing the author's name.

Ракитин Вадим Станиславович

МОНООКСИД УГЛЕРОДА В АТМОСФЕРЕ МЕГАПОЛИСОВ
МОСКВЫ И ПЕКИНА

Специальность 25.00.29 - Физика атмосферы и гидросферы

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва, 2012 г.

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном Учреждении науки Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова Российской Академии Наук (ИФА РАН)

Научный руководитель: Гречко Евгений Иванович, кандидат физико-математических наук

Официальные оппоненты:

Арефьев Владимир Николаевич, доктор физико-математических наук, Институт экспериментальной метеорологии НПО «Тайфун», главный научный сотрудник

Виноградова Анна Александровна, кандидат физико-математических наук, доктор географических наук, институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, ведущий научный сотрудник

Ведущая организация:

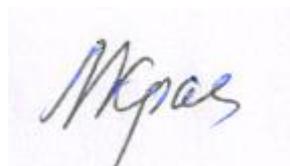
Санкт-Петербургский Государственный университет

Защита состоится 14 июня 2012 г. в 11:00 на заседании диссертационного совета Д 002.096.01 при Федеральном государственном бюджетном Учреждении науки Институт Физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН
Адрес: 119017, Москва, Пыжевский пер.3, ИФА РАН

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН

Автореферат разослан 12 мая 2012 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
кандидат географических наук



Краснокутская Людмила Дмитриевна

Общая характеристика работы

Настоящая работа посвящена исследованию вариаций содержания окиси углерода СО в атмосфере мегаполисов и прилежащих районов в типичных и экстремальных случаях загрязнения, а также изучению временных тенденций изменений содержания этой примеси в глобальном и в региональном масштабе.

Актуальность работы состоит в постоянно повышающемся влиянии антропогенного фактора на состав атмосферы. Это влияние особенно заметно в крупных городах-мегаполисах, а также в прилегающих к ним урбанизированных территориях – городских агломерациях. Окись углерода СО является одной из основных малых газовых составляющих в тропосфере с отчетливо выраженным антропогенным источником. Окись углерода в значительной степени определяет равновесную концентрацию гидроксила ОН. Величины антропогенных и природных источников окиси углерода сопоставимы. Токсичность СО обуславливает необходимость контроля концентрации в населенных пунктах. Дополнительную опасность для здоровья населения представляют собой экстремальные загрязнения атмосферы городов, причиной которых могут стать лесные и торфяные пожары, во время которых содержания СО многократно могут превышать фоновые значения, а концентрации СО на уровне дыхания превышают предельно допустимые в разы. В атмосфере мегаполисов в условиях фотохимического смога повышенное содержание окиси углерода способно приводить к образованию тропосферного озона О₃. Последнее обстоятельство делает особенно актуальным исследование антропогенных источников окиси углерода в связи с угрозой возникновения повышенных концентраций приземного озона, вредных для здоровья населения.

Цели и задачи исследования.

Основная цель работы состоит в получении с помощью спектроскопической методики определения содержания СО в толще

атмосферы и систематизации характеристик загрязнения атмосферы мегаполисов окисью углерода, а также в выявлении временных и пространственных тенденций поведения СО и исследовании метеорологических условий, приводящих к экстремальным загрязнениям воздушных бассейнов крупных городов.

Основные задачи исследования:

- Накопление, обработка, обобщение, анализ и систематизация значительного экспериментального материала о содержании и концентрации СО в атмосфере Москвы (Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, далее ИФА РАН, станция наблюдений состава атмосферы Географического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова и ИФА им. А.М. Обухова РАН, далее МГУ, и Московской области (Звенигородская научная станция Института физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, далее ЗНС).

- Получение долговременного тренда для городской (эмиссионной) части содержания и фоновое содержание СО в Московском мегаполисе для разных периодов и сезонов. Изучение сезонного хода содержания СО на ЗНС с учетом заносов из города и дальнего переноса примеси из промышленных районов и позволяющего использовать данные ЗНС в качестве фоновых.

- Получение сравнительных характеристик загрязнения атмосферы двух мегаполисов, отличающихся географическим положением, метеорологическими и орографическими условиями, а также составом источников эмиссий.

- Валидация спутниковых измерений содержания СО и модельных расчетов при различных эмиссионных сценариях.

- Получение оценок мощности городских эмиссий и эмиссий от природных пожаров

По мере выполнения работы был накоплен, обработан, обобщен, проанализирован и систематизирован значительный экспериментальный материал о содержании и концентрации СО в атмосфере Москвы и Московской области (Звенигородская научная станция Института физики

атмосферы им. А.М. Обухова РАН, далее ЗНС). Произведено сопоставление методик обработки спектроскопических измерений, использовавшихся в разные периоды наблюдений. Получены долговременные тренды эмиссионной части содержания и фонового содержания СО для разных периодов и сезонов. Предложен и применен метод вычисления сезонного хода содержания СО на ЗНС с учетом заносов из города и дальнего переноса примеси из промышленных районов. Применение этого метода позволяет использовать данные ЗНС о содержании СО в качестве фоновых. Получены сравнительные характеристики загрязнения атмосферы двух мегаполисов, отличающихся географическим положением, метеорологическими и орографическими условиями, а также составом источников эмиссий. Проведена валидация спутниковых измерений содержания СО и транспортных модельных расчетов при различных эмиссионных сценариях. Получены оценки мощности городских эмиссий и эмиссий от природных пожаров.

Научная новизна настоящей работы состоит:

- в получении, обработке и анализе уникального по длительности (1970-2011гг.) измерительного ряда содержания СО для Москвы и Звенигорода;

- в применении различных способов обработки результатов спектроскопических измерений в условиях города, в частности с учетом особенностей городского вертикального профиля СО и профиля примеси в условиях экстремальных загрязнений, с помощью усовершенствованной программы обработки спектров нелинейным методом наименьших квадратов, с привлечением экспериментальных данных о приземной концентрации и спутниковых профилей СО. Это позволило повысить точность выделения антропогенной части содержания примеси, а также уточнить величины содержания в условиях экстремальных загрязнений (природные пожары);

- в применении нескольких способов получения метеорологической информации для изучения влияния метеорологических факторов на

загрязнение городского воздушного бассейна. Были использованы: данные акустического зондирования локатора-содара, расположенного в непосредственной близости от основного пункта наблюдений, и с помощью этих данных получены оценки мощности городских источников СО; данные аэрологического зондирования; метод траекторного анализа и данные реанализа (метод обратных траекторий) для оценки влияния мегаполисов на формирование регионального фона;

- в сопоставлении результатов измерений общего содержания в Звенигороде с временными рядами ОС СО других фоновых измерительных пунктов, для проверки соответствия ЗНС ИФА им. А.М. Обухова статусу «фоновой станции»;

- в сочетании различных методик исследования эпизодов загрязнения (экспериментальные данные наземных и спутниковых сенсоров, расчеты с помощью транспортных моделей (моделей переноса примесей в атмосфере), использование космических фотоснимков и GIS, геоинформационных систем, для визуализации и географической привязки источников эмиссий);

- в получении сравнительных характеристик загрязнения атмосферы мегаполисов, находящихся в разных географических, климатических и промышленных зонах, отличающимися орографическими и метеорологическими условиями, а также составом и мощностью источников примеси.

Научная и практическая ценность работы состоит в накоплении и систематизации измерительных данных в течение уникального по длительности периода; в сопоставлении применявшихся в разные периоды методик обработки спектроскопических данных; в применении комплексного подхода к исследованию загрязнения как в типичных условиях (локальные и интегральные характеристики загрязнения, исследование влияния метеорологических условий в атмосферном приземном слое, далее АПС, на городское загрязнение с применением акустических локаторов), так и в

экстремальных случаях на примере пожаров лета 2010 г., (использование спутниковых данных о содержании и модельных расчетов переноса примеси).

Основные положения, выносимые на защиту:

- результаты анализа долговременных рядов содержания СО в Москве (1986-2011 гг.) и на ЗНС (1970 - 2011 гг.) и оценка временных тенденций содержания СО для разных сезонов и периодов наблюдения;

- сопоставление методик обработки спектроскопических измерений, выполненных в разные годы;

- результаты применения метода скользящих средних при определении усредненных («модельных») вариаций содержания СО на ЗНС, полученные с учетом исключения фактора заносов из Москвы; оценка влияния мегаполиса на формирование регионального фона;

- зависимость загрязнения атмосферы Москвы окисью углерода от параметров пограничного слоя (время существования инверсии, скорость и направление ветра);

- оценка мощности городского источника СО для Москвы;

- сравнение характеристик загрязнения СО воздушных бассейнов мегаполисов Москвы и Пекина в период 1992-2010 гг.;

- исследование экстремального загрязнения атмосферы Московского мегаполиса в период природных пожаров летом 2010 г.;

- оценки эмиссий СО от пожаров упомянутого в предыдущем пункте эпизода, полученные с использованием разных методов и карт растительности.

Апробация работы.

Результаты настоящей работы докладывались на научных семинарах Института Физики атмосферы, 15 общероссийских и международных конференциях и симпозиумах и опубликованы в 5 рецензируемых научных журналах.

Публикации.

По теме работы опубликовано 9 работ в рецензируемых академических и зарубежных журналах и 1 в электронной библиотеке SPIE Proceeding, сделано 24 доклада на Всероссийских и международных конференциях и симпозиумах:

- Международный симпозиум стран СНГ "Атмосферная радиация" (МСАР-2006), 27-30 июня 2006 г., г. Санкт-Петербург

- Всероссийская конференция "Развитие системы мониторинга состава атмосферы (РСМСА), 16-18.10.2007

- Atmospheric and Ocean Optics. Atmospheric Physics XIV International Symposium, June 24-30, 2007, Buryatiya

- Международный симпозиум "Физика атмосферы: наука и образование", Санкт-Петербург, 2007

- EGU General Assembly, Vienna, Austria, 13-18 April, 2008

- XV International symposium. Atmospheric and ocean optics. Atmospheric physics. June 22-28, 2008, Krasnoyarsk

- EMS Annual Meeting, Amsterdam, Netherlands, 29 Sept.-03 Oct. 2008

- EGU General Assembly, Vienna, Austria, 20-24 April, 2009

- Международный симпозиум по атмосферной радиации и динамике стран СНГ МСАРД 2009, 22-26 июня 2009г., г. Санкт-Петербург

- 5th International Symposium on Non-CO2 Greenhouse Gases (NCGG-5) Science, Reduction Policy and Implementation. Wageningen, The Netherlands June 30 - July 3, 2009

- EGU General Assembly, Vienna, Austria, 2010

- EGU General Assembly, Vienna, Austria, 3-8 April 2011

- Международный Симпозиум Атмосферная Радиация и Динамика (МСАРД-2011), Санкт-Петербург, 21-24 июня 2011 г

- 11th European Meteorological Society (EMS) Annual Meeting/10th European Conference on Applications of Meteorology (ECAM), Berlin, Germany, 12-16 September 2011

- EGU General Assembly, Vienna, Austria, 22-27 April 2012

Личный вклад автора

Автором проделан большой объем работы по систематизации, обработке и анализу экспериментальных данных, полученных в Лаборатории атмосферной спектроскопии в период 1970 - 2011 гг. Предложен и применен метод «скользящего среднего» для вычисления усредненного «модельного» регионального фона с учетом случаев дальнего переноса и влияния городских эмиссий, что позволило уточнить величину городской части содержания СО. Несколькими способами и для различных сезонов получены оценки трендов содержания СО для Москвы и ЗНС.

Выполнено сопоставление методик обработки спектроскопических измерений полного содержания СО в толще атмосферы, проведенных в разные годы, по 10 годам одновременного использования (2002-2011 гг.).

Проведена систематизация суточных ходов содержания СО в Москве. С использованием данных акустического зондирования исследована зависимость содержания СО в городе от параметров атмосферного пограничного слоя. Для уточнения получения величин городской добавки в общее содержание были проведены модельные расчеты спектров пропускания атмосферы в области $2152-2161 \text{ см}^{-1}$ для различных видов вертикального профиля окиси углерода.

Выполнено комплексное исследование экстремальных загрязнений воздушного бассейна во время природных пожаров 2010 г., сформулированы исходные данные для последующих модельных расчетов.

Объем и структура работы

Работа состоит из введения, четырех глав, посвященных проблематике и обзору научных исследований, методике измерений и обработки результатов и собственно результатам исследований, заключения и списка литературы, использованной при подготовке работы. Объем диссертационной работы составляет 129 страниц, содержит 49 рисунков и 14 таблиц с результатами.

Содержание.

Во введении кратко обосновывается актуальность выбранной темы, формулируется цель выполненной работы, излагается научная новизна и практическая ценность полученных результатов, приводятся основные научные положения, выносимые на защиту, а также дается структура и краткое описание диссертационной работы.

Первая глава посвящена описанию современных научных тенденций и подходов к измерениям и мониторингу малых газовых примесей на примере СО, а также обзору основных результатов исследований, предпринятых в нашей стране и за рубежом. Отдельное место занимает обзор применения модельных расчетов распространения и переноса антропогенной примеси, т.е. примеси, источники которой связаны с деятельностью человека и расположены, как правило, на земной поверхности.

Вторая глава посвящена методической и аппаратной части выполняемой работы. В частности, приведено описание аппаратных измерительных комплексов и приборов, использовавшихся для измерений содержания и концентрации окиси углерода, а также для определения параметров и характеристик атмосферного пограничного слоя. Описаны методики измерений и обработки:

- спектроскопическая методика измерений полного содержания газовых примесей в толще атмосферы;
- отличия применения методики обработки спектроскопических данных для расчетов высоких значений содержания СО, характерных для воздушных бассейнов крупных городов и мегаполисов;
- методы измерений концентрации СО;
- методика измерений параметров атмосферного пограничного слоя с помощью акустического зондирования;
- спутниковые методы измерения содержания и исследования процессов дальнего переноса;
- спутниковые методы исследования локализации пожаров и источников эмиссий с привлечением геоинформационных систем;

- методы модельных расчетов RAMS/HYPACT и траекторного и дисперсионного анализа HYSPLIT, инвентаризационные и масс-балансовая методики оценки эмиссий.

Спектроскопическая установка, созданная в ИФА РАН, состоит из дифракционного спектрометра с разрешением $0,2 \text{ см}^{-1}$, системы слежения за солнцем, системы управления спектральным сканированием и системы записи спектров на основе персонального компьютера.

Схема спектрометра приведена на рис.1.

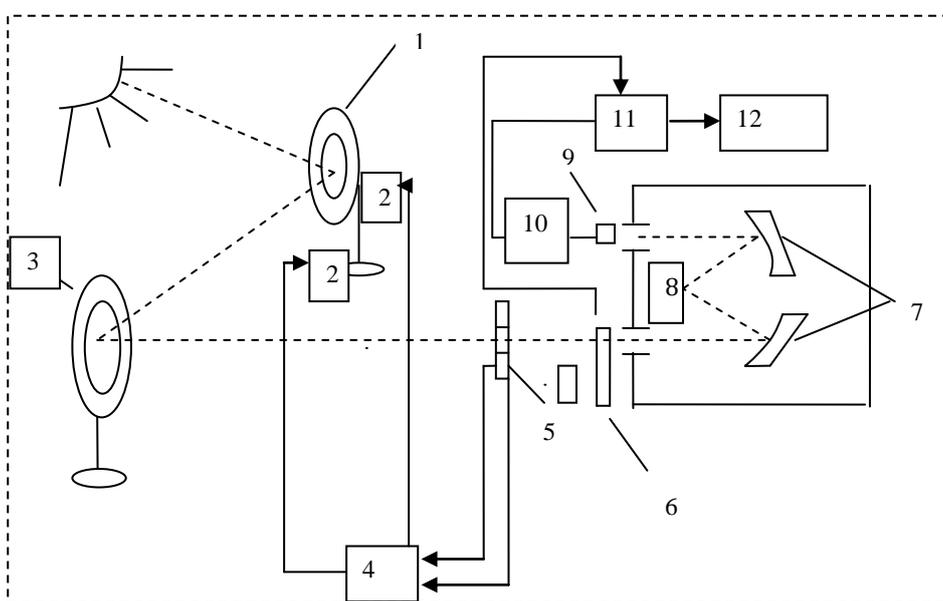


Рис. 1. Принципиальная схема спектроскопической установки

1 – следящая система, 2 – электромоторы азимута и угла места, 3 – осветительное (фокусирующее) зеркало, 4 – блок усилителей следящей системы, 5 – блок датчиков следящей системы, 6 – модулятор и генератор опорного напряжения, 7 – параболические зеркала, 8 – дифракционная решетка, 9 – фильтр, 10 – приемник излучения, 11 – усилитель, 12 – цифровой интерфейс и компьютер.

Спектроскопическая методика определения содержания примеси, применявшаяся для обработки большинства данных, основана на расчете поглощения молекулами примеси солнечного излучения в области $4,67 \text{ мкм}$ (2158 см^{-1}) фундаментальной полосы поглощения CO, линии R(2) и R(3) [1,2]. По поглощению в этом спектральном интервале ($2150\text{-}2164 \text{ см}^{-1}$) определяется полное содержание окиси углерода, приведенное к вертикальному столбу и выраженное в атм.см. (т.е. в см слоя газа,

приведенного к нормальным условиям), или в молек/см², 1 атм.см. = 2.687 10¹⁹ молек/см².

Для определения содержания СО с 2001 г. используется методика обработки спектров поглощения нелинейным методом наименьших квадратов [3,4] (далее М-Кер). Программа обработки учитывает вертикальный профиль окиси углерода. В используемом спектральном интервале, кроме сильных линий поглощения СО и Н₂О находятся слабые линии поглощения N₂O, СО₂ и О₃. Экспериментальный спектр сопоставляется с расчетным, полученным методом line-by-line путем варьирования содержания СО и Н₂О во всей толще атмосферы, а содержания N₂O, СО₂ и О₃ считаются неизменными. В используемой в условиях повышенных приземных концентраций программе расчета содержание СО варьируется не во всей толще атмосферы, а только в нижнем ее слое, что отражает особенность городского вертикального профиля примеси. При этом фоновое содержание СО остается неизменным, полученным в результате измерений на ЗНС. Результаты расчета с учетом вертикального профиля «городского СО» показали уменьшение значений общего содержания примеси, а также городской части содержания, в экстремальных случаях в сравнении с предыдущим вариантом методики расчета М-Кер в среднем на 3-5%. В результате многочисленных расчетов установлено, что характер вертикального профиля СО в нижних слоях (до 1000м) атмосферы практически не влияет на величину получаемого общего содержания окиси углерода над городом и величину городской части содержания, что позволяет пренебречь вариациями профиля во время измерений. Приводятся результаты подробных расчетов содержания, полученные для различных вертикальных профилей окиси углерода [5]. В случае экстремальных загрязнений, таких, как природные пожары на обширной территории, для уровней выше 2 км использовались профили, полученные орбитальным сенсором AIRS [3, 4] непосредственно в период спектроскопических измерений. В качестве профиля в нижней части слоя перемешивания (от уровня земной поверхности до высоты 400 м) использовались усредненные в слое 350 м значения

концентрации, полученные по данным измерений на телебашне в Останкино (станция ФГУП «Мосэкомониторинг»).

Для обработки записанных до 2001 г. спектров применялась более простая методика обработки, предложенная В.И. Диановым-Клоковым (далее Д-К) изложенная в [1-3] т.н. «методика треугольников», основанная на вычислении эквивалентной ширины линии. Эта методика позволяет учесть поглощение водяным паром, исходно отсутствующее в методике Гольдберга-Шоу. Значение содержания $U_{(D-K)}$ в этой методике обработки, применяющейся с 1970 г. по настоящий момент для изучения долговременных тенденций, определяется по следующей формуле:

$$U_{(D-K)} = W^2 \frac{(p/p_0)^{-1,5}}{mA}$$

где W - эквивалентная ширина линии (точнее, площадь треугольника, вписанного в спектральную линию), A – коэффициент, полученный с помощью моделирования спектров пропускания, $m = \sec(Z)$ - геометрическая воздушная масса, Z - зенитный угол солнца,

$$A = 0.96 \text{ атм}^{-1} \text{ см}^{-3} \text{ (при } \omega < 1, 2 \text{ г/см}^2 \text{)}$$

$$A = 0.83 + 0.108 \omega \text{ (при } \omega \geq 1, 2 \text{ г/см}^2 \text{)}$$

где ω – содержание паров воды в вертикальном столбе, определяемое по эквивалентной ширине линии воды определяемое одновременно с полным содержанием окиси углерода аналогичным образом, а p_0 и p – нормальное давление и давление на уровне измерений. Систематические отличия между методиками Д-К и М-Кер на уровне среднедневных значений общего содержания: для фоновых содержаний $U\%$ [6, настоящая работа], для городских измерений – 10% при линейной зависимости и $R^2 \geq 0,94$ в сторону уменьшения содержания методикой М-Кер. При определении городской части содержания методика М-Кер уменьшает значения городской части содержания в среднем на 30 % при $R^2=0,9$.

Вводится термин «городская/эмиссионная часть содержания», далее ГЧС. Городская часть содержания, или ΔU определяется как разность

содержаний в Москве и на ЗНС, при одновременности измерений общего содержания окиси углерода в двух пунктах с использованием методики Д-К, один из которых расположен в городе, другой – в относительно незагрязненном районе, на региональной фоновой станции ЗНС, 53 км к западу от Москвы:

$\Delta U = U_s - U_r$, где U_s – содержание примеси, измеренное в ИФА, U_r – содержание, измеренное на ЗНС.

Схема расположения измерительных пунктов представлена на рис. 2.

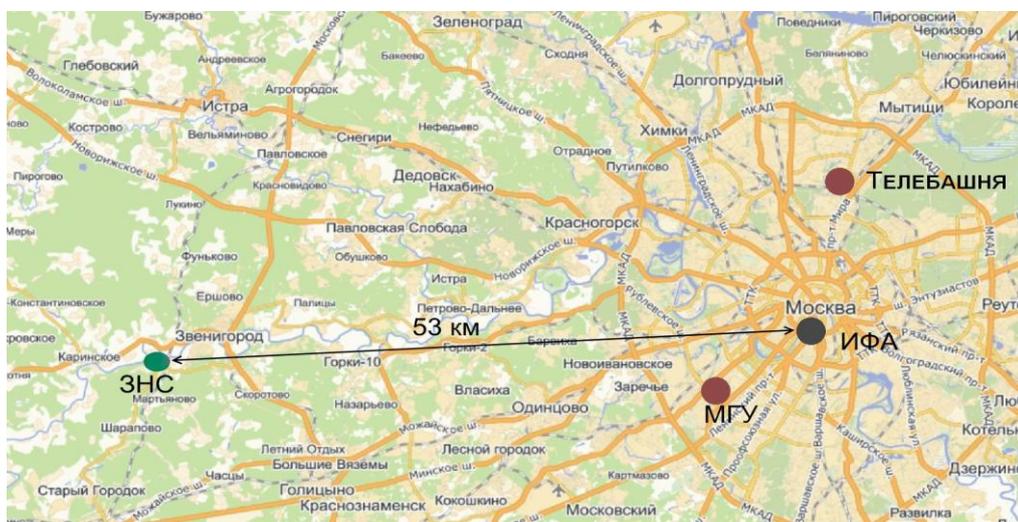


Рис.2. Расположение измерительных пунктов.

В главе третьей излагаются основные результаты исследований. Приводится многолетний ряд измерений содержания окиси углерода в толще атмосферы над Москвой, анализируются сезонные и дневные вариации, а также долговременные тенденции поведения примеси. Представлена систематизация дневных ходов содержания, в зависимости от сезона и метеорологических условий.

Как один из главных результатов работы, отмечается, что наметившаяся в 70-90^е годы тенденция к увеличению эмиссионной части содержания ΔU CO в последующие годы не подтвердилась (рис.3) [1, 4,7-9].

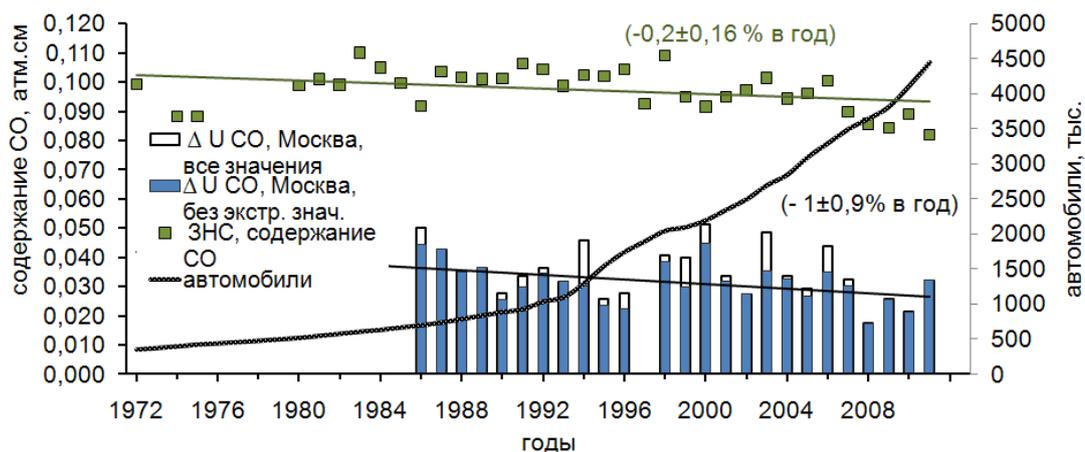


Рис. 3. Долговременные тенденции содержания окиси углерода. Городская часть содержания (ГЧС) в Москве, общее содержание на ЗНС \квадратные маркеры, и количество автомобилей в Москве (сплошная кривая).

Несмотря на рост количества автомобилей, общее содержание СО не увеличивалось, а даже уменьшалось. Тренд в целом составил для ГЧС ΔU в Москве $(-1\% \pm 0,9\% / \text{год})$, для содержания на ЗНС — $(-0,2\% \pm 0,16\% / \text{год})$, т.е. наблюдалось снижение содержания. Мы это объясняем значительным сокращением промышленных эмиссий в Московском мегаполисе, начиная с начала 90-х годов, а также улучшением качества автомобильных двигателей. Приводятся характерные для различных метеорологических условий дневные ходы содержания и концентрации примеси, анализируются условия возникновения экстремальных ситуаций в воздушном городском бассейне, частота повторяемости различных величин содержания. Отмечено, что для Москвы наиболее часто повторяются невысокие величины ГЧС, а также дневные ходы с низкой амплитудой. Отмечаются главные метеорологические факторы, влияющие на величину городской части содержания примеси, а именно скорость ветра в некотором (до 500 м) приземном слое при значимой корреляции между ГЧС ΔU и обратной скоростью ветра $1/V$ ($R^2 \sim 0,7-0,8$), а также наличие, высота и время существования температурных инверсий [7, 9]. Выявлена положительная связь между временем существования приземной инверсии и величиной ΔU ($R^2 \sim 0,4-0,5$). Получена оценка удельной мощности источника СО для Москвы $Q = 125 \pm 42 \text{ г/км}^2\text{с}$, что практически

повторяет прежние оценки для 1999 г. и отчасти объясняет отсутствие положительного тренда содержания СО.

Приводится систематизация дневных ходов содержания СО в зависимости от метеорологических условий.

Для оценки влияния мегаполиса на формирование регионального фона на примере Москвы и ЗНС был проведен траекторный анализ воздушных масс для всех измерительных дней 2005-2001 гг., и было установлено, что влияние заноса примеси из Москвы на региональный фон невелико. Так, количество дней с заносами, приводящих к превышению усредненного фонового содержания для соответствующего периода на 10% и более составляет 4,7 % от всех случаев 2005-2011 гг.

Влияние промышленных регионов на величину содержания на ЗНС оценивалось с помощью выделения аномальных превышений фонового содержания над усредненным сезонным ходом с последующим анализом методом обратных траекторий, а также с привлечением спутниковых измерений содержания СО. Из всех дней измерений за 2005-2011 гг. заметное влияние заноса примеси из промышленных районов на содержание СО в Московском мегаполисе было зафиксировано лишь несколько раз. Для Пекина число дней с выраженным влиянием близко расположенных промышленных регионов существенно больше [9].

Далее приводятся результаты измерений содержания окиси углерода в толще атмосферы над Пекином, и производится их анализ. Отмечаются особенности, как среднедневных значений содержания, так и характера дневных ходов содержания примеси, связанные, прежде всего с орографическими условиями при сравнимой мощности городских источников. Эта специфика орографии приводит к ухудшению условий проветривания и более высоким уровням загрязненности. Пункт наблюдений располагается на северной окраине города перед возвышенностью, переходящей в горные малонаселенные районы. С южной стороны в долине расположены жилые и промышленные районы мегаполиса. Это расположение обуславливает бимодальный характер распределения величин

содержания, максимумы которого соответствуют направлению переноса из фоновых и промышленных районов. Сравнение по частотам повторяемости среднесуточных величин городской части содержания для двух мегаполисов показало преобладание достаточно высоких значений, более 0,070 атм.см для Пекина. Для Москвы число дней с экстремальными (превышающими 0,110 атм.см) значениями содержания СО (т.е. когда вынос примеси существенно ослаблен), составляет менее 5%, для Пекина - более 20% [9], рис. 4.

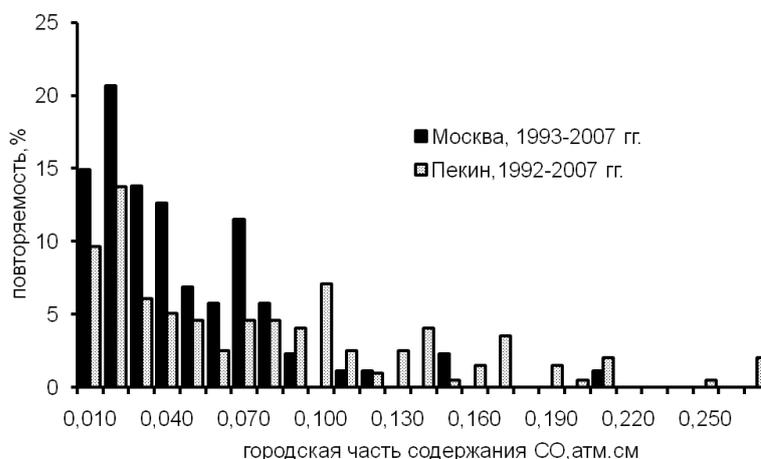


Рис.4. Повторяемость среднесуточных величин городской части содержания СО для Москвы и Пекина в осенние месяцы.

Корреляционные связи содержания СО и др. примесей выявили выраженную положительную корреляцию концентраций СО, субмикронного и сажевого аэрозоля, как в Москве, так и в Пекине, причем коэффициенты корреляции между концентрациями этих примесей в Пекине выше, табл. 1.

Таблица 1. Корреляция содержания $U(CO)$ и концентрации СО $Q(CO)$, субмикронного М (сбм) и сажевого Q (сажа) аэрозолей в Москве и Пекине, сентябрь 2007 г.

Пункт, параметры	R^2	Способ усреднения	Зависимость
Пекин, $U(CO)$ и М (сбм)	0,74	по времени спектр. измер.	логарифм.
Пекин, $Q(CO)$ и Q (сажа)	0,58	двухчасовые	логарифм.
Пекин, $Q(CO)$ и М (сбм)	0,66	двухчасовые	логарифм.
Москва, $U(CO)$ и $Q(CO)$	0,58	по времени спектр. измер.	линейная
Москва, $U(CO)$ и Q(сбм)	0,42	по времени спектр. измер.	линейная
Москва, $Q(CO)$ и Q(сажа)	0,58	двухчасовые	логарифм.

Корреляция между общим содержанием в толще и концентрацией окиси углерода у поверхности выражена слабее, что объясняется значительными изменениями вертикального распределения примеси в течение дня. Так, при разрушении температурной инверсии спады общего содержания и концентрации антропогенных примесей обычно отличаются по амплитуде и разнесены во времени, иногда на несколько часов, что свидетельствует о трансформации вертикального профиля концентрации в сторону увеличения с высотой, а также о вертикальном переносе примесей.

Исследованы временные тенденции поведения содержания CO над Звенигородом, с исключением случаев дальнего переноса и заносов из Москвы.

Глава четвертая посвящена исследованию загрязнения атмосферы Центра Европейской территории России во время пожаров лета 2010 г. Проанализированы результаты наземных (станции ИФА, МГУ и ЗНС) и спутниковых (MOPITT, AIRS спутников Terra и Aqua) измерений общего содержания и концентрации окиси углерода CO, а также данные MODIS спутников Terra и Aqua о пространственно-временном распределении лесных и торфяных пожаров. Сравнение похожих ситуаций 2010 и 2002 г. позволило выявить причину более высоких уровней загрязнения в 2010 г. Эта причина заключается в большей интенсивности процессов горения (количество пожаров в день), и в стабильном направлении переноса воздушных масс от источников к мегаполису при примерно одинаковом количестве очагов пожаров в целом [3, 4, 10]. Установлены аномальные величины концентрации и содержания CO в период влияния пожаров 2010 г. [11].

Произведена валидация спутниковых измерений содержания (сенсоры MOPITT, AIRS, IASI) с данными о содержании, полученными с помощью наземных спектрометров (пункты ИФА и ЗНС). Если в типичных условиях (при отсутствии интенсивных поверхностных эмиссий) наблюдается, как правило, небольшие (в пределах ошибки измерений), отличия в спутниковых и наземных данных, то в условиях природных пожаров установлено значительное (до 2-3 раз) занижение содержаний, полученных со спутников

по сравнению с наземными данными [3, 4], см. рис. 5. Следует отметить, что впервые в мировой научной практике наземные спектрометры оказались в непосредственной близости к очагам интенсивных пожаров, и, соответственно, впервые была оценена реальная точность спутниковых измерений содержания при интенсивных поверхностных эмиссиях.

Таким образом, было использовано преимущество наземных спектрометров перед спутниковыми сенсорами, состоящее в существенно большей (примерно десятикратной) чувствительности по отношению к приземному слою [4].

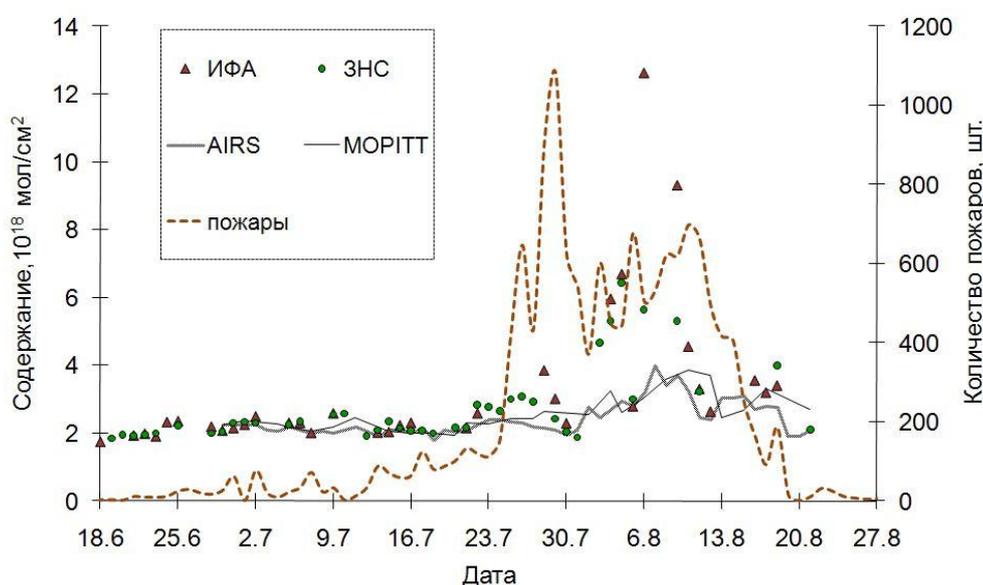


Рис.5. Общее содержание окиси углерода в воздушном бассейне Московского региона по данным наземных (ИФА, ЗНС) и спутниковых (МОПИТТ, AIRS) измерений в период 20.07-20.08.2010. Для сравнения отдельно нанесено количество пожаров в исследуемом домене по данным MODIS.

В отличие от обычных ситуаций, в период пожаров установлена высокая корреляция содержания и концентрации CO в разных измерительных пунктах ($R^2 \sim 0.8-0.9$) при примерно одинаковом для этих пунктов (в том числе и для фонового пункта в Звенигороде) высоком уровне загрязнения CO. Эта однородность поля загрязнения свидетельствует о преобладании эмиссий от горения биомассы над обычными городскими эмиссиями в период пожаров.

Применение траекторного анализа, детализированных космических снимков и модельных расчетов позволило выявить расположение и вклад

торфяных пожаров в загрязнение воздуха над Московским мегаполисом. С привлечением различных карт растительности (AVHRR/UDM (1993), GLC-2000, GlobCover-2009), баз данных об эмиссиях и пожарах и различных методик (Active fires/MCD14ML и Burned Area/MCD45 и баз данных об эмиссиях GFEDv3.1, а также FRP/GFASv1) в сотрудничестве с А.Н. Сафроновым получены оценки эмиссий от пожаров (см. таблицу 2), а также оценены неопределенности, связанные с использованием различных методик оценки и баз данных [3,10,12]. В порядке значимости, неопределенности зависят от:

- выбранной методики (отличия могут составлять порядок величины);
- использования различных баз данных о типах растительности (1,5-2 раза);
- собственно данных спутниковых сенсоров о содержании примеси и характеристиках пожаров (1,2-1,5 раза).

Табл.2. Эмиссия CO (в Tg) от лесных пожаров по данным различных методик MCD14ML и MCD45, усредненная по картам растительности AVHRR/UDM (1993), GLC-2000, GlobCover-2009 и MCD12Q1-2009/IGBP. Для сравнения в 3-й, 4-й и 5-й строках приводятся эмиссии, полученные независимым балансовым способом с использованием данных о содержании CO орбитальных спектрометров MOPITT, AIRS и IASI, исправленных с помощью данных наземных спектрометров ИФА и ЗНС

№	Методика	Продукт MODIS	Среднее значение	Стандартное отклонение
1	Active Fires	MCD14ML	24.5	8.2
2	Burned Areas	MCD45	4.0	1.4
3	MOPITT		39.6	11.9
4	AIRS		33.7	10.1
5	IASI		35.6	10.7

В Заключении перечислены основные результаты работы.

1. С помощью анализа многолетнего измерительного ряда получены тренды содержания окиси углерода, свидетельствующие о росте в 70-80-е годы прошлого века, о стабилизации ситуации в следующее десятилетие и о небольшом снижении, начиная примерно с 2003 г. Скорость изменения городской части содержания для Москвы составила $(- 1\% \pm 0,9\%)$ /год, для периода 1986-2011 гг., содержания СО на ЗНС – $(- 0,2\% \pm 0,16\%$ для периода 1972-2011 гг. При оценке трендов фонового содержания по минимальным значениям, получено отсутствие значимого тренда в период 1970-2011 гг., и снижение содержания со скоростью 2% в год для периода 2003-2011 гг.

2. Значения содержания СО в Москве изменяются в пределах от фонового содержания до величин, в 2-3 раза его превышающих. Установлена положительная корреляция между эмиссионной (городской) частью содержания СО и скоростью ветра в некотором приземном слое атмосферы (до 500 м). Установлено, что наличие или отсутствие температурных инверсий для загрязненности Москвы играет меньшую роль, чем скорость ветра.

3. Применение траекторного анализа и исключение случаев заноса из Москвы и дальнего переноса для вычисления усредненного сезонного хода содержания СО, а также приведенное сравнение с другими фоновыми пунктами позволяет утверждать о возможности использования ЗНС в качестве фоновой станции для измерений общего содержания пассивных малых атмосферных примесей.

4. Проведен сравнительный анализ по измерительным данным о концентрации и содержании СО и вариаций этих параметров для Московского и Пекинского мегаполисов. В частности:

- Для московского мегаполиса характерны невысокие значения городской части содержания СО, не превышающие 0,05 атм.см, что соответствует примерно половине величины фонового содержания. Экстремальные значения городской части содержания, т.е. превышающие 0,110 атм.см, достаточно редки и повторяются менее чем в 5% случаев. В

последние годы наблюдается тенденция к уменьшению повторяемости высоких значений ОС СО.

- Для Пекина измерительный ряд существенно меньшей длительности свидетельствует о снижении роста содержания, что во многом определяется изменением состава используемых видов топлив в масштабе, как города, так и всей страны. Величина положительного тренда для Пекина в период 1992-2010 гг. составила в целом около 1%. Для Пекина характерна более частая повторяемость экстремальных значений содержания (около 20%). Уровень загрязненности Пекина во многом определяется не мощностью городских источников, а орографией и заносами из промышленных регионов.

5. Проведен сравнительный анализ взаимовлияния переноса примесей между мегаполисом и другими областями для Москвы и Пекина. В частности:

- Изучение влияние мегаполиса Москвы на формирование регионального фона выявило, что заносы примеси на ЗНС относительно редки и составляют менее 5% от всех случаев измерений. Зафиксированы случаи дальнего переноса примеси из промышленных регионов северной и центральной Европы и Украины в московский регион. Для загрязненности Пекина влияние фактора заноса примеси из промышленных регионов существенно выше, чем для Москвы, причем в основном за счет местных, относительно близко расположенных источников.

- Установлена положительная корреляция между содержанием и концентрацией СО и содержанием субмикронного и сажевого аэрозоля в воздушных бассейнах Москвы и Пекина.

6. Исследование аномального загрязнения воздушного бассейна Московского мегаполиса позволило получить оценки мощности эмиссий от пожаров на основе комбинации данных наземных и спутниковых спектрометров, а также провести сопоставление различных методик и баз данных при оценке пожарных эмиссий. Установлено, что неопределенности при оценке пожарных эмиссий различными вариантами метода инвентаризации могут быть достаточно велики (до 1-го порядка величины) и зависят в порядке убывания значимости от: выбранной методики;

использования различных баз данных о типах растительности; собственно данных спутниковых сенсоров о содержании примеси и пожарах.

Благодарности.

В заключение хочу поблагодарить моего научного руководителя Е.И. Гречко, моих постоянных соавторов и коллег Е.В. Фокееву, Л.Н. Юрганова, А.В. Джола, А.Н. Сафронова, Р.Д. Кузнецова, а также М.А. Каллистратову, Г.И. Горчакова, Н.Ф. Еланского и П.Ф. Демченко за постоянное внимание к моей работе и плодотворное и полезное обсуждение, и М.В. Макарову за ценные и полезные замечания.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. *Фокеева Е.В., Гречко Е.И., Джола А.В., Ракитин В.С.* Определение загрязнения атмосферы города Москвы окисью углерода спектроскопическим методом// Изв. РАН, ФАО, 2007, т. 43, №5, 664-670

2. *Гречко Е.И., Джола А.В., Ракитин В.С., Фокеева Е.В., Пекур И.С., Тиме Н.С.*// Изучение влияния параметров атмосферного пограничного слоя на изменчивость содержания окиси углерода в центре Москвы. Изв. РАН ФАО 1993 т.29 №1 с.11-17

3. *Фокеева Е.В., Сафронов А.Н., Ракитин В.С., Юрганов Л.Н., Гречко Е.И., Шумский Р.А.* Исследование влияния пожаров в июле-августе 2010 года на загрязнение окисью углерода атмосферы Москвы и окрестностей, оценка эмиссий// Изв. РАН, ФАО. 2011. Т. 47, №6, с. 1–18

4. *L. N. Yurganov, V. Rakitin, A. Dzhola, T. August, E. Fokeeva, M. George, G. Gorchakov, E. Grechko, S. Hannon, A. Karpov, L. Ott, E. Semutnikova, R. Shumsky, and L. Strow.* 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., 11, 7925-7942, 2011, doi:10.5194/acp-11-7925-2011

5. *А.В. Джола, В.С. Ракитин, Е.В. Фокеева.* Особенности спектроскопических измерений общего содержания окиси углерода в условиях мегаполиса// Сборник тезисов симпозиума стран СНГ МСАРД 2009, 22-26 июня 2009г., г. Санкт-Петербург, 2.6с

6. *V. Rakitin, A. Dzhola, E. Fokeeva, E. Grechko, E. Starikova.* Long-term variations of CO total column over Moscow and its outskirts// Geophysical Research Abstracts, Vol. 14, EGU2012-525, 2012 EGU General Assembly, Vienna, April 22-27 2012

7. *Е.И. Гречко, А.В. Джола, В.С. Ракитин, Е.В. Фокеева, Р.Д. Кузнецов.* Вариации общего содержания окиси углерода и параметры атмосферного пограничного слоя в центре Москвы// Оптика атмосферы и океана, 2009, т.22, 3, 284-288

8. *E.I. Grechko, Dzhola A.V., Rakitin V.S., Fokeeva E.V.* Total column of carbon monoxide in the atmosphere over the rural and urban zones// Atmospheric and Ocean Optics. Atmospheric Physics XIV International Symposium, June 24-30, 2007, Buryatiya, C-69, SPIE. The International Society for Optical Engineering. Russian Chapter of SPIE, 2007

9. *В.С. Ракитин, Е.В. Фокеева, Е.И. Гречко, А.В. Джола, Р.Д. Кузнецов.* Вариации содержания окиси углерода в атмосфере Московского мегаполиса// Изв. РАН, ФАО, 2011, Т.47, №1, С. 64-72

10. *А.Н. Сафронов, Е.В. Фокеева, В.С. Ракитин, Л.Н. Юрганов, Е.И. Гречко.* Эмиссии окиси углерода летом 2010 г. в центральной части среднерусской равнины и оценка их неопределенности при использовании различных карт растительности// ИЗиК, 2012, в печати

11. *Академик Г.С. Голицын, Г.И. Горчаков, Е.И. Гречко, Е.Г. Семутникова, В.С. Ракитин, Е.В. Фокеева, А.В. Карпов, Г.А. Курбатов, Е.С. Байкова, Т.П. Сафрыгина.* Экстремальное загрязнение

угарным газом пограничного слоя атмосферы в Московском регионе летом 2010 г.// Доклады Академии Наук, 2011, том 441, № 4, с. 1–7

12. *V. Rakitin, A. Safronov, L. Yurganov, E. Fokeeva, E. Grechko and A. Dzhola.* CO atmospheric pollution of Moscow area during wild fires in summer 2010, estimates of emissions and their uncertainties// Geophysical Research Abstracts, Vol. 14, EGU2012-525, 2012 EGU General Assembly, Vienna, April 22-27 2012

13. *Е.И. Гречко, А.В. Джола, В.С.Ракитин, Е.В. Фокеева.* Содержание окиси углерода в толще атмосферы, региональный фон и город// Международный симпозиум “Физика атмосферы: наука и образование”. Сборник тезисов. Санкт-Петербург, 2007, 131-134

14. *V. Rakitin, E. Fokeeva, R. Kuznetsov, E. Grechko, A. Dzhola.* Variations of the carbon monoxide total column and atmospheric boundary layer parameters in the center of Moscow// Institute of atmospheric optics SB RAS. XV International symposium. Atmospheric and ocean optics. Atmospheric physics. June 22-28, 2008, Krasnoyarsk, p. 136

15. *Rakitin V.S., Fokeeva E.V., Kuznetsov R.D.* Total column of the carbon monoxide and boundary layer parameters in the center of Moscow// EMS Annual Meeting Abstracts, Amsterdam, Netherlands, 29 Sept.-03 Oct. 2008

16. *В.С. Ракитин, Е.В. Фокеева, А.В. Джола, Е.И. Гречко, Р.Д. Кузнецов.* Вариации содержания окиси углерода в мегаполисе Москвы и особенности загрязнения атмосферы с учетом параметров атмосферного пограничного слоя// Сборник тезисов симпозиума стран СНГ МСАРД 2009, 22-26 июня 2009г., г. Санкт-Петербург, 2.5

17. *V. Rakitin, E. Fokeeva, R. Kouznetsov, A. Emilenko, V. Kopeikin.* Carbon monoxide and aerosols contents, boundary layer parameters and estimation of the CO sources intensity in Moscow city// Fifth International Symposium on Non-CO2 Greenhouse Gases (NCGG-5) Science, Reduction

Policy and Implementation. Wageningen, The Netherlands June 30 - July 3, 2009, Extended NCGG-5

18. *V. Rakitin, L. Yurganov, A. Dzhola, E. Grechko, E. Fokeeva, A. Saphronov, R. Shumsky.* Typical and anomalous CO pollution over Moscow, long-term tendency and estimates of fires emissions in summer 2010// EMS Annual Meeting Abstracts Vol. 8, EMS2011-686, 2011, 11th EMS / 10th ECAM

19. *A. Dzhola, E. Fokeeva, E. Grechko, V. Rakitin, and L. Yurganov.* Diurnal, seasonal and long-term variations of CO total content over Moscow area// EMS Annual Meeting Abstracts Vol. 8, EMS2011-717, 2011, 11th EMS / 10th ECAM

20. *V. Rakitin, A. Dzhola, E. Fokeeva, E. Grechko, E. Starikova.* Long-term variations of CO total column over Moscow and its outskirts// Geophysical Research Abstracts, Vol. 14, EGU2012-521, 2012 EGU General Assembly, Vienna, April 22-27 2012