

ОПТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И БАЗЫ ДАННЫХ ОПТИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ  
ОБ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЕ

УДК 551.510.4:551.588.7

## Вариации общего содержания окиси углерода и параметры атмосферного пограничного слоя в центре Москвы

Е.И. Гречко, А.В. Джола, В.С. Ракитин, Е.В. Фокеева, Р.Д. Кузнецов\*

*Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН  
109071, г. Москва, Пыжевский пер., 3*

Поступила в редакцию 30.09.2008 г.

Представлены результаты измерений содержания окиси углерода по спектрам поглощения солнечного излучения в инфракрасной спектральной области ( $2153\text{--}2160\text{ см}^{-1}$ ) в период 1993–2007 гг. для Москвы. Сопоставление измерений содержания СО в двух пунктах наблюдений (один в центре, а другой вне города) позволяет определять характеристики антропогенного загрязнения городского воздуха окисью углерода. Использовались дифракционные спектрометры с разрешением  $0,2\text{ см}^{-1}$  с системой слежения за Солнцем. Начиная с 2005 г. в центре Москвы ведутся непрерывные измерения параметров атмосферного пограничного слоя с помощью акустического локатора ЛАТАН-3. Наибольшее влияние на величину содержания примеси в атмосфере города оказывает скорость ветра в некотором (до 500 м) приземном слое. Получены коэффициенты корреляции городской части содержания СО со скоростью ветра для холодного и теплого сезонов. Результаты измерений показали, что содержание СО в слое воздуха, загрязненного городом, за это время (14 лет) не возросло, несмотря на трехкратное увеличение числа автомобилей в городе.

*Ключевые слова:* окись углерода, спектроскопический метод, акустическое зондирование, пограничный слой.

Исследования содержания малых газовых компонентов в последние десятилетия придает во всем мире большое значение в связи с глобальными процессами в атмосфере, вызванными деятельностью человека. Окись углерода (СО), не являясь парниковым газом, тем не менее представляет собой интерес для изучения, являясь, во-первых, загрязнителем, во-вторых, основным компонентом, определяющим концентрацию гидроксила, важнейшего тропосферного окислителя, а величина и знак тренда окиси углерода являются индикатором глобальных атмосферных изменений [1, 2].

В мегаполисах повышенное содержание окиси углерода способно приводить к образованию тропосферного озона [2, 3]. Величины антропогенных и природных источников окиси углерода сопоставимы [3]. В основном, исследования общего содержания окиси углерода посвящены сбору и анализу данных, получаемых на региональных фоновых станциях и с помощью измерительных спутниковых комплексов, в городах же, как правило, существуют только станции контроля приземной концентрации примеси, зависящие от локальных источников.

В России для фонового мониторинга и валидации спутниковых измерений окиси углерода, а также для изучения загрязненности окисью углерода городов разработан и уже несколько десятилетий

используется спектроскопический метод измерения полного содержания газа по поглощению им солнечного излучения. Главным достоинством метода является то, что получаемые результаты, усредненные по значительному пространству и толще атмосферы, мало зависят от локальных и даже отдельных крупных источников примеси [4, 5]. Кроме того, метод позволяет путем сопоставления измерений содержания СО в двух пунктах наблюдений (один в центре, а другой вне города) определять характеристики антропогенного загрязнения городского воздуха окисью углерода, а именно: выделить городскую часть содержания примеси.

В условиях постоянного существенного роста транспортных потоков и количества автомобилей в мегаполисах актуальным является анализ непрерывного долговременного измерительного ряда содержания СО.

В настоящей статье представлены результаты измерений содержания окиси углерода в Москве по спектрам поглощения солнечного излучения в инфракрасной спектральной области ( $2153\text{--}2160\text{ см}^{-1}$ ), полученные для периода 1993–2007 гг.

Эти результаты позволяют оценить тенденции состояния городского воздуха по одному из основных загрязнителей, а также выделить метеорологические условия, способствующие возникновению экстремальных ситуаций в воздушном городском бассейне.

Для определения фонового содержания одновременно проводились измерения на Звенигородской научной станции (ЗНС) ( $56^\circ\text{ с.ш.}, 38^\circ\text{ в.д.}; 60\text{ км}$  к западу от Москвы). В обоих случаях использовались дифракционные спектрометры с разрешением  $0,2\text{ см}^{-1}$  с системой слежения за Солнцем [4].

\* Евгений Иванович Гречко (eigrechko@gmail.com); Анатолий Васильевич Джола (dzhola@ifaran.ru); Вадим Станиславович Ракитин (vadim@ifaran.ru); Екатерина Всеволодовна Фокеева (efokeeva@ifaran.ru); Ростислав Дмитриевич Кузнецов (roux@ifaran.ru).

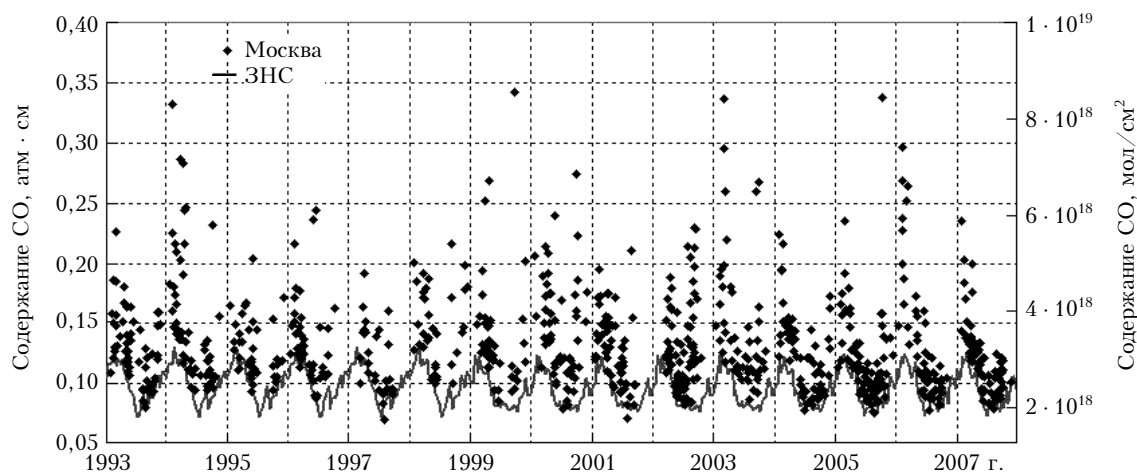


Рис. 1. Содержание СО в Москве и Звенигороде, 1993–2007 гг.

Для анализа влияния метеоусловий, а именно для определения профиля скорости и направления ветра и данных о температурных инверсиях, были использованы результаты измерений параметров атмосферного пограничного слоя, полученные акустическим локатором (содаром) ЛАТАН-3. Содарные данные позволяют интерпретировать большую часть полученных нами результатов. Непрерывные наблюдения с помощью содара ведутся в центре Москвы, начиная с 2005 г. Повышенная устойчивость прибора к акустическим шумам позволяет использовать его в городских условиях [6].

Полное содержание СО в городе испытывает существенные вариации ото дня ко дню, от значений, близких фоновому, до значений, в 2,5–3 раза его превышающих. На рис. 1 представлены среднедневные значения содержания окиси углерода в Москве, а также усредненный сезонный ход фоновое содержания, полученный по результатам многолетних измерений в Звенигороде (ЗНС).

Наиболее высокие (экстремальные) значения содержания СО (см. рис. 1) наблюдаются, как правило, в холодное время года (с октября по апрель) при продолжительных антициклональных ситуациях. Вариации содержания СО в Москве зависят в основном от скорости ветра. Статистический анализ полученных результатов показал, что наиболее часто повторяются условия, при которых среднедневные величины содержания не превышают 20% от фоновое содержания. Экстремальные значения зафиксированы лишь в 3% случаев от общего числа измерений, что свидетельствует о благоприятных в целом условиях рассеяния примеси [7].

Синхронность измерений в Москве и Звенигороде позволяет исключить влияние сезонного хода и выделить городскую часть содержания СО. С целью выявления временных тенденций загрязнения воздуха окисью углерода были определены среднегодовые значения городской части содержания СО для Москвы в период 1993–2007 гг. (рис. 2).

Отсутствие результатов измерений 2002 г. на рис. 2 объясняется аномальностью этого года для Московского региона, а именно продолжительными



Рис. 2. Среднегодовые значения городской части содержания СО и число автомобилей в Москве в период 1993–2007 гг.

лесными и торфяными пожарами в летне-осенний период. В разные годы количество дней с экстремальными значениями содержания различно, поэтому отдельно приведены значения городской части содержания, полученные усреднением без экстремальных значений (правые столбцы). Экстремальными считались случаи, когда значение городской части содержания превышало  $0,110 \text{ атм} \cdot \text{см}$  [7]. Из рис. 2 видно, что при различных способах усреднения содержание СО в слое воздуха, загрязненного городом, за описываемый период наблюдений (15 лет) не возросло, несмотря на трехкратное увеличение числа автомобилей в городе.

В течение дня содержание СО в Москве может испытывать существенные изменения. Наиболее характерные для различных метеоусловий дневные ходы содержания и концентрации окиси углерода представлены на рис. 3 и 4. Можно отметить тот факт, что на форму дневного хода, точнее на положение максимума содержания примеси, наибольшее влияние оказывает время разрушения приподнятой инверсии, а на величину содержания — скорость ветра в слое перемешивания.

На рис. 3 приведены примеры дневных ходов общего содержания и приземной концентрации СО в Москве в 1999 г. при слабом (26.04) и сильном

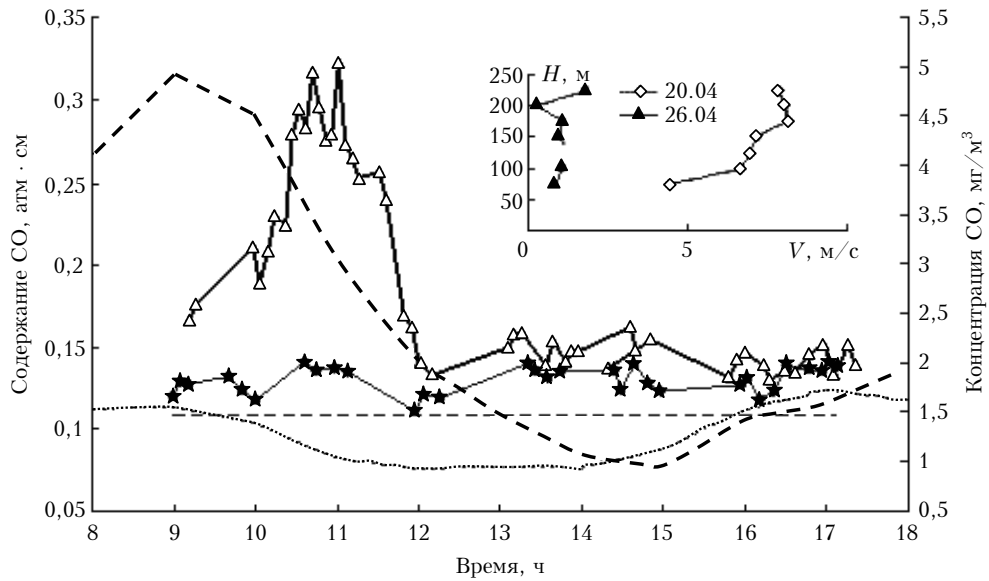


Рис. 3. Дневные ходы содержания  $U$  и приземной концентрации  $CO$ , профили скорости ветра, 1999 г.:  $\star$   $U_{гор}$ , 20.04;  $\triangle$   $U_{гор}$ , 26.04;  $---$   $U_{фон}$ ;  $\cdots$  концентрация  $CO$ , 20.04;  $---$  концентрация  $CO$ , 26.04

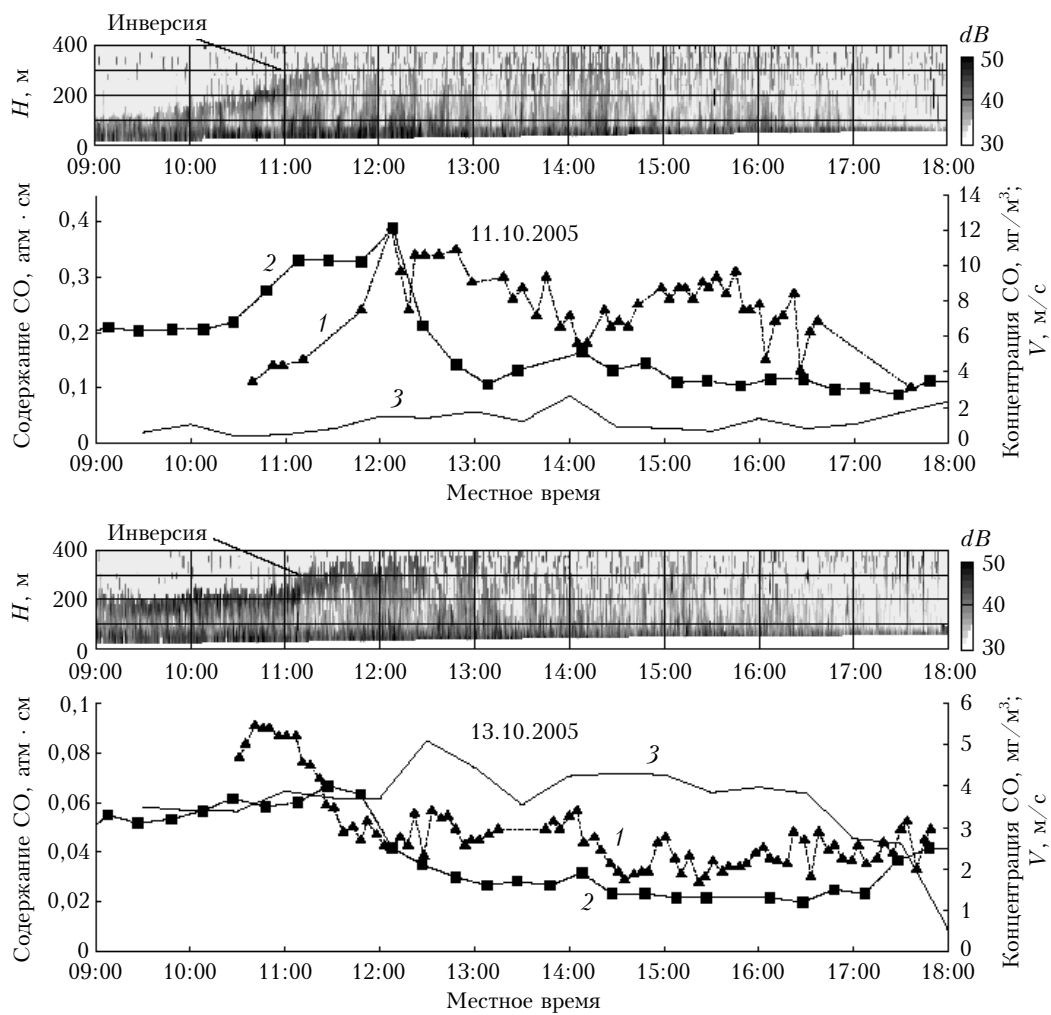


Рис. 4. Факсимильные записи экосигнала, городская часть содержания (1), концентрация окиси (2) углерода и скорость ветра (3), усредненная в слое 300 м. Дневной ход, 11.10.2005 и 13.10.2005

(20.04) ветре. Концентрация измерялась электрохимическим анализатором, расположенным в непосредственной близости от спектрометра. В правой части рис. 3 помещены профили скорости ветра в 10 ч. Высокое значение содержания 26.04.99 объясняется слабой скоростью ветра (1–1,5 м/с) в слое 250 м и приподнятой инверсией, которая разрушилась примерно в 11 ч (скорость ветра и изменение стратификации определялись с помощью содара). Уменьшение содержания после 12 ч дня объясняется ростом скорости ветра и усилением конвективного перемешивания примеси. Максимум дневного хода приземной концентрации CO 26.04.99 в 9 ч соответствует времени разрушения приземной инверсии. После этого приземная концентрация быстро уменьшается, а содержание CO в толще остается повышенным, что, на наш взгляд, в рассматриваемом случае свидетельствует об увеличении концентрации примеси с высотой. Таким образом, проведение синхронных измерений концентрации и содержания окиси углерода в одном пункте наблюдений способно выявить случаи возрастания концентрации примеси с высотой.

Примеры дневных ходов городской части содержания и приземной концентрации окиси углерода (экстремальный и типичный) и изменения метеоусловий приведены на рис. 4. Вверху над кривыми приведены записи эхосигнала, показывающие положение, развитие и время разрушения приподнятой инверсии, а также профили горизонтальной компоненты скорости ветра. Эхосигнал за 11.10.2005 приведен как пример скапливания примеси над городом. Следует отметить, что столь высокие значения среднедневного содержания примеси наблюдались лишь еще в трех случаях за все годы наблюдений и являются наибольшими для 2005 г. Виден непрерывный рост величин городской части содержания и концентрации CO в утренние часы до значений 0,39 атм·см и 12,1 мг/м<sup>3</sup> соответственно (примерно в 12 ч), после чего концентрация резко снижается вследствие разрушения инверсии в 11 ч 30 мин (см. эхограмму в верхней части рис. 4). Содержание примеси в это же время незначительно снижается и остается повышенным в течение всего дня. Характер дневного хода содержания CO в штилевой день 11.10.2005, по-видимому, соответствует дневному ходу мощности источника примеси, и начало спада содержания не связано по времени с разрушением приподнятой инверсии. В этот день скорость ветра в слое до 300 м была близка к нулю в течение всего времени наблюдений. Близкие к нулю значения скорости ветра (по данным аэрологического зондирования) наблюдались в этот день до высоты 1,7–2 км.

Дневной ход содержания и концентрации CO 13.10.2005 (см. рис. 4, внизу) приведен как пример, которому соответствуют типичные для осеннего периода изменения метеорологических условий в течение дня (время разрушения инверсии после 11–12 ч при скорости ветра 2–7 м/с в течение дня). Наблюдаются утренний максимум содержания и концентрации CO и дальнейший их спад, вызванный разрушением инверсии при одновременном увеличении скорости ветра.

Сравнение обоих случаев (наличие приземной и приподнятой инверсий, примерно одинаковое время их разрушения, но различные ветровые условия) свидетельствует о преобладающем влиянии скорости ветра в приземном слое на величину содержания окиси углерода.

Анализ и систематизация дневных ходов содержания окиси углерода показали, что дневные ходы с выраженными максимумами (значения общего содержания CO меняются в пределах более 80% от минимального для этого дня значения), подобные ходам 26.04.99, наблюдаются примерно в 20% случаев. В 30% случаев максимум содержания выражен незначительно (изменения общего содержания в пределах 30–80%), а дневные ходы, подобные ходам 20.04.99, со слабовыраженными (менее 30%) вариациями общего содержания в течение дня зафиксированы в 50% случаев.

Использование результатов акустического зондирования позволило выявить характер связи величин загрязнения с условиями выноса примеси. Надежность данных о скорости ветра, полученных с помощью содара, в большинстве случаев ограничена накоплением примеси в атмосфере города оказывает скорость ветра в некотором (до 500 м) приземном слое. Для холодного и теплого сезонов получены коэффициенты корреляции  $R$  городской части содержания CO с величиной, обратной скорости ветра, усредненной по слоям воздуха разной высоты. Наибольшая зависимость городской части содержания от скорости ветра в слое 60–300 м проявляется в холодный период (рис. 5). Для теплого периода,

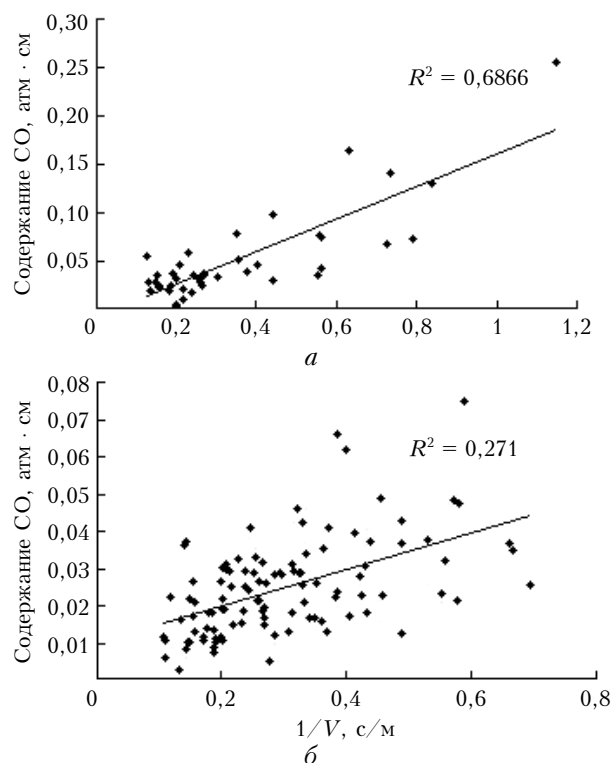


Рис. 5. Зависимость городской части содержания CO от обратной скорости ветра в слое 60–300 м в холодный (а) и теплый (б) периоды в Москве, 2005–2007 гг.

характеризующегося конвекцией и меньшим временем существования приземных инверсий, корреляция существенно меньше, что объясняется, по-видимому, рассредоточением городской части содержания в более высоком слое. Так, летом в Москве высота слоя перемешивания может значительно превышать 500 м [8]. В слоях меньшей высоты коэффициент корреляции городской части содержания со скоростью ветра уменьшается для обоих сезонов.

### Заклучение

Применение спектроскопического метода измерения полного содержания газа в толще атмосферы позволяет определить тренд загрязнения воздуха над городом. Содержание СО в слое воздуха, загрязненного городом, за это время (15 лет) не возросло, несмотря на более чем трехкратное увеличение числа автомобилей в городе. Отсутствие роста городской части содержания объясняется, по-видимому, мерами, направленными на сокращение выбросов автотранспорта и изменением его качественного состава, а также сокращением промышленных выбросов в связи с закрытием большинства промышленных предприятий города.

Вариации содержания СО зависят в основном от скорости ветра и наличия температурных инверсий. Дневные ходы содержания СО с ярко выраженными максимумами наблюдаются чаще всего в холодное время года и только при слабой скорости ветра. Коэффициент корреляции городской части содержания и скорости ветра в слое 60–300 м для холодного периода существенно выше, чем для теплого.

Наиболее часто повторяются метеорологические условия, при которых среднедневные величины городской части содержания не превышают 20% от фонового содержания. Экстремальные значения городской части содержания зафиксированы лишь в 3% случаев от общего числа измерений, что свидетельствует о благоприятных в целом условиях рассеяния примесей в Москве.

Данные о концентрации 2005 г. взяты по результатам измерений на станции ГПУ «Мосэкомониторинг» «Балчуг», расположенной в центре Москвы [9].

Авторы признательны РФФИ, грант № 06-05-64153, за частичную финансовую поддержку.

1. *Novelli P.C., Masarie K.A., Lang P.M.* Distributions and recent changes in carbon monoxide in the lower troposphere // *J. Geophys. Res. D.* 1998. V. 103. N 19. P. 19,015–19,033.
2. *Thompson A.M., Cicerone R.J.* Possible Perturbations to Atmospheric CO, CH<sub>4</sub>, and OH // *J. Geophys. Res. D.* 1986. V. 91. N 10. P. 10,853–10,864.
3. *Khalil M.A.K., Pinto J.P., Shearer M.J.* Preface Atmospheric carbon monoxide Chemosphere: *Glob. Change Sci.* 1999. V. 1. P. 1–3.
4. *Dianov-Klokov V.I., Yurganov L.N., Grechko E.I., Dzhola A.V.* Spectroscopic measurements of atmospheric carbon monoxide and methane. 1. Latitudinal distribution // *J. Atmos. Chem.* 1989. V. 8. N 2. P. 139–151.
5. *Yurganov L.N., Duchatelet P., Dzhola A.V., Edwards D.P., Hase F., Kramer I., Mahieu E., Mellqvist J., Notholt J., Novelli P.C., Rockmann A., Scheel H.E., Schneider M., Schulz A., Strandberg A., Sussmann R., Tanimoto H., Velasco V., Drummond J.R., Gille J.C.* Increased Northern Hemispheric carbon monoxide burden in the troposphere in 2002 and 2003 detected from the ground and from space // *Atmos. Chem. Phys.* 2005. V. 5. N 2. P. 563–573.
6. *Кузнецов Р.Д.* Акустический локатор ЛАТАН-3 для исследований атмосферного пограничного слоя // *Оптика атм. и океана.* 2007. Т. 20. № 8. С. 749–753.
7. *Фокеева Е.В., Гречко Е.И., Дзола А.В., Ракитин В.С.* Определение загрязнения атмосферы города Москвы окисью углерода спектроскопическим методом // *Изв. РАН. Физ. атм. и океана.* 2006. Т. 43. № 5. С. 664–670.
8. *Pekour M.S., Kallistratova M.A.* SODAR Study of the Boundary Layer over Moscow for Air-Pollution Application // *Appl. Phys. B.* 1993. V. 57. N 1. P. 49–55.
9. *Горчаков Г.И., Семутникова Е.Г., Зоткин Е.В., Карпов А.В., Лезина Е.А., Ульяненко А.В.* Вариации газовых компонент загрязнения в воздушном бассейне г. Москвы // *Изв. РАН. Физ. атм. и океана.* 2006. Т. 42. № 2. С. 176–190.

#### *E.I. Grechko, A.V. Dzhola, V.S. Rakitin, E.V. Fokeeva, R.D. Kuznetsov. Variation of the carbon monoxide total column and atmospheric boundary layer parameters in the center of Moscow.*

The results of measurements of the carbon monoxide total content are given for the period 1993–2007 using the absorption of solar radiation in the atmospheric column over Moscow. This method makes it possible to separate an urban part of the CO content by virtue of a comparison of the CO content measured at two observation sites, one of which being situated in the rural zone and the other one being situated in the city center. Two identical grating spectrometers of medium resolution (0.2 cm<sup>-1</sup>) are used with appropriate solar tracking systems. Starting from 2005 the permanent sounding of boundary layer has been carried out using acoustic locator (SODAR) LATAN-3 intended to determine the boundary layer parameters. Variations in the CO content depend mainly on the variations of the wind-velocity or temperature inversions. Correlation coefficients were obtained for the urban part of the CO content with the average wind speed for cold and warm seasons. The use of SODAR data demonstrates preeminent influence of the wind in certain boundary layer (up to 500 m) in conditions of the CO extension. Over this measurement period the urban part of the CO content in the surface air layer over the city did not increase in spite of more than tripled number of motor-vehicles in Moscow.