

УДК 551.510.4:551.588.7,551.510.42

## ДОЛГОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ ОБЩЕГО СОДЕРЖАНИЯ ОКИСИ УГЛЕРОДА В АТМОСФЕРЕ МОСКОВСКОГО МЕГАПОЛИСА

© 2021 г. В. С. Ракитин<sup>a, \*</sup>, Н. Ф. Еланский<sup>a, \*\*</sup>, А. И. Скороход<sup>a, \*\*\*</sup>,  
А. В. Дзола<sup>a, \*\*\*\*</sup>, А. В. Ракитина<sup>a, \*\*\*\*\*</sup>, А. В. Шилкин<sup>a, b, \*\*\*\*\*</sup>,  
Н. С. Кириллова<sup>a, \*\*\*\*\*</sup>, А. В. Казаков<sup>a, \*\*\*\*\*</sup>

<sup>a</sup>Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Пыжевский пер., 3, Москва, 119017 Россия

<sup>b</sup>НПО “Тайфун”, ул. Победы, 4, Обнинск, Калужская область, 249038 Россия

\*e-mail: vadim@ifaran.ru

\*\*e-mail: n.f.elansky@mail.ru

\*\*\*e-mail: skorokhod@ifaran.ru

\*\*\*\*e-mail: dzhola@yandex.ru

\*\*\*\*\*e-mail: rakitinarabota@gmail.com

\*\*\*\*\*e-mail: dogget@list.ru

\*\*\*\*\*e-mail: n.kirillova65@gmail.com

\*\*\*\*\*e-mail: artem.kasakov@gmail.com

Поступила в редакцию 02.06.2020 г.

После доработки 22.08.2020 г.

Принята к публикации 14.10.2020 г.

Представлены результаты комплексного анализа измерений общего содержания окиси углерода СО на станциях ИФА РАН в Москве и Московской области, данных автоматизированных станций сети Мосэкомониторинг с привлечением результатов спутникового мониторинга и информации о параметрах пограничного слоя атмосферы в Москве и окружающих регионах. Исследована долговременная изменчивость общего содержания (ОС) СО и метеопараметров, получены характеристики накопления окиси углерода в штилевые дни в пограничном слое атмосферы. Установлено убывание среднегодовых величин ОС СО в 2000–2018 гг. в Москве ( $-2.56 \pm 0.52\%$ /год) и на ЗНС ( $-1.15 \pm 0.37\%$ /год). Однако скорость убывания в обоих пунктах в разные сезоны и периоды различна. После примерно 2007–2008 г. скорость убывания ОС СО уменьшилась в обоих пунктах. В период 2008–2018 гг. на ЗНС зафиксирован рост ОС СО в летние и осенние месяцы со скоростью около 0.7%/год. Установлено увеличение скорости ветра в атмосферном пограничном слое Москвы в разные периоды 2000–2018 гг. со скоростью 0.4–1.6%/год. При этом в Калужской области не обнаружено статистически значимых изменений скорости ветра. Повторяемость штилевых дней в Москве в период 2006–2017 гг. уменьшалась ( $-7.06 \pm 3.96\%$ /год) при уменьшении антропогенной части содержания СО в этот же период ( $-6.72 \pm 3.48\%$ /год). Полученные результаты свидетельствуют о влиянии климатического (метеорологического) фактора на качество воздуха в Москве.

**Ключевые слова:** состав атмосферы, окись углерода, атмосферная спектроскопия, дистанционное зондирование, мегаполис, тренды

**DOI:** 10.31857/S0002351521010107

### ВВЕДЕНИЕ

Окись, или монооксид, углерода (СО) является одной из ключевых малых газовых примесей атмосферного воздуха. Хотя собственный парниковый потенциал окиси углерода невелик, она способствует удалению гидроксила ОН из атмосферы, предотвращая окисление метана, а также участвует в производстве тропосферного озона (О<sub>3</sub>) и углекислого газа (СО<sub>2</sub>). С учетом непрямых воздействий радиационный форсинг от СО оценивается больше, чем, например, от закиси азота

(N<sub>2</sub>O) и галоидоуглеводородов, что подтверждает большую роль окиси углерода в процессах изменений состава атмосферы и климата [1]. В глобальном масштабе содержание СО определяет концентрацию гидроксила (ОН) как основного окислителя в атмосферных фотохимических процессах, уменьшение концентрации которого приводит к разрушению в стратосфере важнейшего газа – атмосферного озона [2, 3]. Окись углерода является относительно пассивной в химическом отношении примесью (время жизни атмосфере

от 2 недель до 3 мес.); поэтому СО можно считать почти идеальным трассером для исследования процессов дальнего атмосферного переноса. Высокоточные методы измерений атмосферного содержания СО, в том числе спутниковые, разработаны и применяются уже в течение нескольких десятилетий.

Помимо этого, мониторинг атмосферного СО чрезвычайно важен при исследованиях атмосферного загрязнения в городах, поскольку:

- приземная концентрация СО является одним из основных параметров оценки качества воздуха;

- содержание СО в атмосфере во многом определяется мощностью антропогенных источников и таким образом является индикатором экономической активности;

- антропогенные эмиссии СО, определяемые в основном сжиганием топлива в автомобильных двигателях и на промышленных предприятиях, взаимосвязаны с эмиссиями многих парниковых газов и летучих органических соединений (ЛОС);

- в условиях фотохимического смога реакции разрушения СО приводят к образованию высоких концентраций приземного озона.

В течение последних десятилетий интенсивные исследования пространственно-временных вариаций содержания СО, долгосрочных трендов, различных источников и стоков были осуществлены с помощью наземных локальных и дистанционных измерений на многочисленных российских [4–9] и международных научных станциях (в том числе NDACC и TCCON) [10, 11], с помощью самолетных и спутниковых измерений [12, 13], а также численного прямого и обратного моделирования [12, 14–17].

Многочисленные публикации свидетельствуют об уменьшении с начала XXI в. атмосферных концентраций не только СО, но и некоторых других загрязняющих примесей, NO<sub>x</sub> и аэрозолей, включая сажевый углерод (“black carbon”, или BC) в Европе, Северной Америке и странах Юго-Восточной Азии, исключая Индию [1, 4–10], а также отдельных климатически значимых газов (тропосферного озона, фреонов CFC-11, CFC-12 и хлоринитрата ClONO<sub>2</sub>) [6]. Москва в этом отношении не является исключением; примерно с начала нового века в городском воздухе наблюдается существенное уменьшение как общего содержания, так и приземных концентраций СО [4, 5, 9]. Аналогичные тенденции наблюдаются и во втором по величине российском городе Санкт-Петербурге [6, 8]. Отрицательные тренды атмосферного содержания и приземных концентраций упомянутых примесей в урбанизированных и фоновых районах Северного полушария до недавнего времени связывались в основном с уменьшением антропогенных эмиссий [1, 4, 13]; однако в более

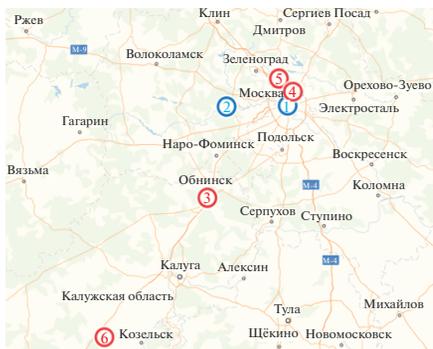
поздних работах высказывались предположения о существовании других факторов, влияющих на состав атмосферы, например изменения соотношения источники/стоки этих примесей, а также изменения метеорологических условий на фоне климатических изменений [12, 18].

Настоящая работа коллектива авторов ИФА им. А.М. Обухова РАН продолжает цикл исследований состава атмосферы с применением спектроскопических методов. Анализируются долгосрочные измерительные ряды общего содержания СО (ОС СО), полученные методом абсорбционной солнечной спектроскопии в Москве (ИФА РАН) и на Звенигородской научной станции (ЗНС), расположенной в районе г. Звенигорода. Измерения проводятся уже около 50 лет (с 1970 г. на ЗНС и с 1972 г. – в Москве). Анализ самых продолжительных измерительных рядов ОС СО в мире дал ряд важных результатов. Изучены особенности временной изменчивости ОС СО и его антропогенной доли в мегаполисах Москвы и Пекина [4, 5], связь уровня атмосферного загрязнения СО с температурной стратификацией ПСА и скоростью ветра [4, 19]. С привлечением спутниковых данных и обратного моделирования получены оценки эмиссий СО от природных пожаров 2010 г. на Европейской территории России; исследованы вариации содержания и концентрации СО в воздушном бассейне Москвы во время этих пожаров [15, 20].

Анализ результатов многолетних (2002–2014 гг.) измерений приземной концентрации СО на станциях Мосэкомониторинга и экологической станции ИФА РАН выявил характерные особенности пространственно-временной изменчивости концентрации СО в приземном воздухе Московского региона [9]. Применение численной химико-транспортной модели SILAM позволило описать пространственно-временные вариации полей концентрации СО с учетом городской инфраструктуры и погодных условий [9, 17, 21].

Наряду с убыванием с начала XXI в. среднегодовых величин содержания и концентрации СО в атмосфере Москвы ( $-2.1 \pm 2.8\%$ /год, ОС СО, разные периоды 1998–2016 гг. и  $-3.4\%$ /год, концентрация, 2005–2014 гг.), а также убыванием среднегодовых ОС СО в Звенигороде ( $-0.6 \pm 1.6\%$ /год, разные периоды 1998–2016 гг.) был установлен рост фоновых ОС СО в летние и осенние месяцы (до  $0.9\%$ /год для ЗНС для сентября–ноября 2007–2016 гг.) [5, 9, 18]. Одновременно было отмечено уменьшение скорости убывания ОС СО в Москве после 2007 г. в любые сезоны [18].

Кроме того, приведенная в работе [9] величина отрицательных трендов интегральных эмиссий СО Москвы (около  $-1.7\%$ /год) оказалась меньше скорости снижения усредненных по городу концентраций ( $-3.4\%$ /год). Это несоответствие на-



**Рис. 1.** Схема расположения пунктов наблюдений: 1) Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва (ОС  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ; приземная концентрация  $\text{CO}$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{NO}_x$ , аэрозолей и др.); 2) Звенигородская научная станция ИФА РАН, Московская обл. (ОС  $\text{CO}$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ; приземная концентрация  $\text{CO}$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{NO}_x$ ); 3) Обнинск, Калужская обл. (метеопараметры, концентрации  $\text{CO}$  на разных высотных уровнях); 4) Метеостанция ВДНХ (ВВЦ), Москва; 5, 6) Станции аэрологического зондирования № 27612 (г. Долгопрудный, 5) и № 27707 (г. Сухиничи, Калужская обл., 6)

водило на мысль о возможном существовании иных факторов (кроме уменьшения эмиссий), влияющих на качество воздуха в Москве.

Проведенные исследования поставили ряд вопросов, от решения которых зависит понимание процессов, определяющих качество воздуха в регионе и возможность образования экстремальных экологических ситуаций. Какова причина начавшегося после 2007 г. роста фонового содержания  $\text{CO}$  на ЗНС в летние и осенние месяцы, и является ли причиной этого возрастание влияния Москвы? Является ли уменьшение приземных концентраций и ОС  $\text{CO}$  в ПСА Москвы следствием только уменьшения антропогенных эмиссий или частично имеет другое объяснение (например, изменение метеорологических условий)? и другие.

Основной задачей данной работы являлось продолжение исследований временной и пространственной изменчивости содержания  $\text{CO}$  в атмосфере Московского мегаполиса с использованием новых методов и подходов, а также экспериментальных данных последних лет. Особый интерес представлял комплексный анализ взаимосвязи трендов ОС  $\text{CO}$  в Московском мегаполисе с изменениями метеорологических условий и антропогенных эмиссий.

## МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И БАЗЫ ДАННЫХ. НАЗЕМНЫЕ СПЕКТРОСКОПИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Для анализа вариаций общего содержания (ОС)  $\text{CO}$  в атмосфере Московского мегаполиса и окружающих его районов использовались результаты долговременных спектроскопических изме-

рений в Москве (центр города, пункт ИФА РАН), также на ЗНС, находящейся на расстоянии 53 км к западу от центра (рис. 1). Измерения в обоих пунктах проводятся с помощью идентичных спектрометров среднего разрешения ( $0.2 \text{ см}^{-1}$ ) с использованием эффекта поглощения молекулами примеси солнечного излучения в области основной полосы поглощения  $\text{CO}$  (около  $4.67 \text{ мкм}$ ). Измерения проводятся в солнечные дни (около 70–80 измерительных дней в год) и, как правило, синхронно в обоих пунктах, что позволяет определить вклад Москвы (антропогенную часть содержания) как разницу между измеренными ОС  $\text{CO}$  в Москве (городской пункт) и на ЗНС (фоновый пункт). Все спектры, записанные с 1970 г. по настоящее время, обработаны единой методикой, подробно изложенной в [19, 22]. Спектрометры прошли прямую взаимокалибровку между собой и косвенную — со спектрометрами NDACC; погрешность единичного измерения составляет 5–6% [23].

Кроме того, для исследования вариативности  $\text{CO}$  в незагрязненных районах использовались данные измерений концентраций на высотной метеорологической мачте (ВММ) НПО “Тайфун” (г. Обнинск, Калужская область, 100 км к юго-западу от Москвы, рис. 1).

## МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ НАБЛЮДЕНИЯ

Для исследования долговременных тенденций параметров пограничного атмосферного слоя Москвы и окружающих районов были привлечены данные акустического лоатора SODAR (пункты ИФА и ЗНС) [24], а также данные аэрологического зондирования (г. Долгопрудный, город-спутник Москвы) и г. Сухиничи (небольшой город в Калужской области, 235 км к юго-западу от Москвы) — станции № 27612 и № 27707 соответственно. Расположение пунктов приведено на рис. 1. Данные доступны на сайте <http://weather.uwo.edu/upperair/sounding.html>.

Кроме того, для оценки повторяемости штитлевых дней были привлечены данные о скорости ветра на метеостанции ВДНХ на уровне 2 м над земной поверхностью. День считался штитлевым, если сумма скоростей ветра за сутки (8 стандартных измерений с дискретностью 3 ч) не превышала 3 м/с.

Для исследования эпизодов накопления загрязнений в воздушном бассейне Москвы были выбраны дни со штитлевыми условиями не только у поверхности, но и в ПСА (когда скорость ветра в дневные часы не превышала 2 м/с в атмосферном слое 2–200 м).

Для всех предварительно выбранных дней был произведен анализ на предмет возможного влияния дальнего атмосферного переноса загрязнений с использованием данных наземных станций сети

Мосэкомониторинг, траекторного анализа и спутниковой информации. В результате было отобрано 13 дней 2018 г., удовлетворяющих выбранным критериям и совпадающих с многочасовыми спектроскопическими измерениями в пунктах ИФА и ЗНС.

### СПУТНИКОВОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ СОСТАВА АТМОСФЕРЫ

Спектрометр AIRS (Atmospheric InfraRed Sounder) запущен на борту спутника Aqua 4 мая 2002 г., выведенного на околополярную солнечно-синхронную орбиту высотой 680 км. Научный инструмент предназначен для измерения влажности, температуры, характеристик облачного покрова и содержания некоторых парниковых газов, а также окиси углерода в атмосфере. Основным элементом, орбитальный дифракционный спектрометр, записывает спектры атмосферного поглощения инфракрасного излучения Земли в спектральном диапазоне от 3.75 до 15.4 мкм [25–27] дважды в сутки, с покрытием более 80% земной поверхности. Полоса захвата сканера – 800 км. Данные первичных уровней рассчитываются для ячеек примерно  $45 \times 45$  км. В настоящей работе использовались данные третьего уровня (Level 3 v6, разрешение  $1^\circ \times 1^\circ$ , только дневные измерения ОС СО) с восходящей орбиты (ascending, т.е. около 12:30–13:30 местного времени для каждого пункта). Количество измерительных дней в году для каждой ячейки  $1^\circ \times 1^\circ$  составляет у AIRS около 300–320 для средних широт Евразии. Данные L3 ОС СО AIRS v6 находятся в открытом доступе ([https://acdisc.gesdisc.eosdis.nasa.gov/opendap/Aqua\\_AIRS\\_Level3/AIRS3STD.006/contents.html](https://acdisc.gesdisc.eosdis.nasa.gov/opendap/Aqua_AIRS_Level3/AIRS3STD.006/contents.html)).

### ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ АТМОСФЕРНОГО ПЕРЕНОСА ЗАГРЯЗНЕНИЙ

Чтобы исключить влияние заносов загрязнений, дополнительно проводились исследования переноса воздушных масс на разных уровнях методом обратных траекторий с помощью интерактивной модели NOAA HYSPLIT MODEL [28].

Для этой же цели были использованы распределения СО, полученные с использованием орбитальных данных AIRS. Эти распределения в сочетании с обратными траекториями позволяют оценить наличие или отсутствие интенсивных источников СО на пути следования воздушной массы и таким образом выявить перенос загрязнений (или его отсутствие) в район Москвы из других районов. Для совмещения распределений разных орбитальных систем мониторинга с траекториями было разработано программное обеспечение, позволившее в данном случае в интерактивном режиме накла-

дывать траектории HYSPLIT на архивные спутниковые распределения ОС СО AIRS v6.

### ВЫЧИСЛЕНИЕ ТРЕНДОВ

Межгодовые вариации и долговременные тенденции изменения исследуемых параметров анализировались в разные периоды наблюдения 2000–2018 гг. и для разных сезонов. Тренды ОС СО, а также тренды скорости ветра и характеристик температурных инверсий вычислялись на основе среднесезонных (или среднегодовых) значений с последующим построением линейной регрессии и вычислением ее параметров и статистических характеристик. Все оценки трендов приведены с указанием 90% доверительного интервала.

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

#### *1. Региональный фон: влияние заносов из Москвы и других дополнительных факторов*

Москва является крупнейшим Европейским городом и располагается на равнине. Большую часть года городской воздушный бассейн хорошо проветривается натекающими воздушными потоками. Но иногда возникают ситуации, сопровождающиеся резким ухудшением качества воздуха. Малоподвижные антициклоны и сопутствующие им штили, температурные инверсии способствуют накоплению антропогенных выбросов в атмосфере мегаполиса и окружающих районов. Кроме этого, к ухудшению качества воздуха в регионе может привести атмосферный перенос загрязнений из районов действия интенсивных источников, например природных пожаров [20, 28]. ЗНС расположена примерно в 50 км к западу от центра Москвы (см. рис. 1) в сельском районе, удаленном как от небольшого г. Звенигорода, так и от автомагистралей. Однако в случае направления ветра с востока возможен занос загрязнений из Москвы в район Звенигорода. В этой связи представляет интерес оценка влияния Москвы на измерения ОС СО на ЗНС. Как будет показано ниже, эпизоды заноса СО относительно редки.

На рис. 2 и в табл. 1 представлен анализ случаев повышенных среднедневных содержаний СО на ЗНС (более чем на 10% над типичными значениями). Увеличение ОС СО на ЗНС над типичными сезонными значениями происходит под влиянием разных факторов. Этими факторами являются заносы из Москвы, сельскохозяйственные выжигания, дальний перенос. Установлено, что заносы из Москвы приводят к существенному повышению ОС СО в ЗНС лишь в 5–6% случаев от общего количества измерительных дней (в зависимости от выбранного периода). Таким образом, установлено, что данные ЗНС о содержании СО могут быть использованы в качестве региональных фоновых характеристик.

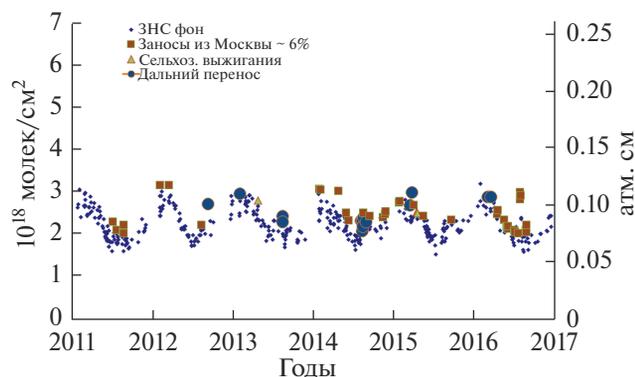


Рис. 2. Влияние дополнительных факторов на общее содержание СО в Звенигороде в 2011–2016 гг.

Статистический анализ факторов, оказывающих заметное влияние на содержание СО в Звенигороде, приведен в табл. 1.

## 2. Сезонные вариации и тренды

Анализ межгодовых вариаций ОС СО в Москве указывает на уменьшение общего содержания СО в Москве в 2000–2018 гг. со скоростью  $(-2.56 \pm 0.43\%/год)$ , оценка по среднегодовым значениям), см. рис. 3а и табл. 2. Отметим, что в разные сезоны и временные интервалы скорость уменьшения различна. Минимальная скорость уменьшения характерна для теплого (июль–сентябрь) сезона  $(-1.81 \pm 0.57\%/год)$  для 2000–2018 гг. и  $-0.99 \pm 1.07\%/год$  для 2008–2018 гг.), см. рис. 3б и табл. 2.

На рис. 3б и 3в представлены межгодовые вариации ОС СО в Москве и области (ЗНС) для холодного (январь–март) и теплого (июль–сентябрь) сезонов. Среднегодовые и летние (июль–сентябрь) тренды для периода 2000–2018 гг. вычислялись без учета 2002 г. (год продолжительных лесных и торфяных пожаров на ЕТР, длившихся с июля по октябрь). Период влияния аналогичных пожаров в 2010 г. был значительно короче (22.07–20.08), поэтому среднегодовое и среднесезонное (для летних месяцев) значения ОС СО были вычислены при исключении небольшого количества данных, относящихся именно к этому периоду. Все характе-

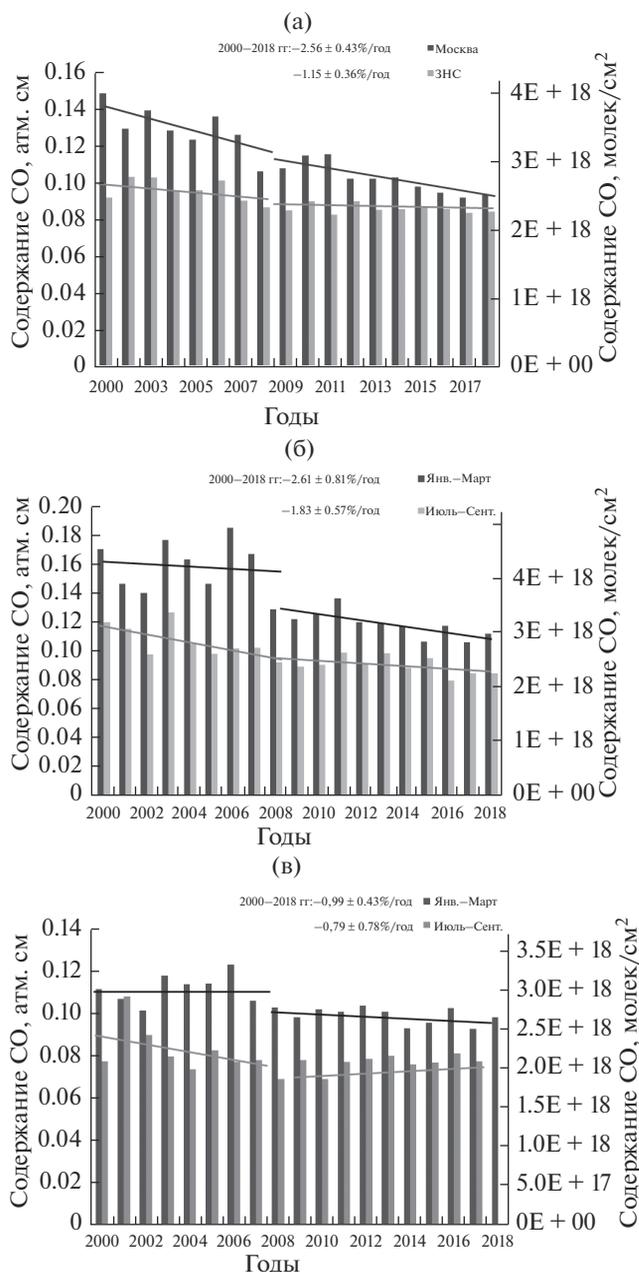


Рис. 3. Межгодовые вариации и тренды ОС СО в разные периоды и сезоны 2000–2018 гг.: (а) – в Москве и Звенигороде (ЗНС) (по среднегодовым значениям); (б) – в Москве в холодный (январь–март) и теплый (июль–сентябрь) сезоны; (в) – в Звенигороде (ЗНС) в холодный (январь–март) и теплый (июль–сентябрь) сезоны.

Таблица 1. Факторы, влияющие на содержание СО в Звенигороде, периоды 2005–2010 и 2011–2016 гг.

Название фактора	Число случаев/% от общего количества дней измерений	
	2006–2011 гг.	2011–2016 гг.
Дальний перенос	3/0.5	13/3.4
Занос из Москвы	29/4.8	24/6.4
Сельхоз. выжигания	15/2.5	3/1.3
Лесные пожары на ЕТР	18/3.2	0/0
Общее кол-во измерений	589/100	377/100

**Таблица 2.** Тренды общего содержания СО в Москве и Звенигороде в разные сезоны 2000–2018 гг. Некоторые значения вычислялись без учета 2002 г. (год продолжительных летне-осенних природных пожаров на ЕТР)

Пункт	Период	Сезон	Тренд $\pm$ дов.интервал, %/год
Звенигород	2000–2018	Ср. год	$-1.06 \pm 0.36$
		Январь–март	$-0.99 \pm 0.43$
		Июль–сентябрь	$-0.79 \pm 0.78$
	2000–2008	Ср. год	$-1.05 \pm 1.59$
		Январь–март	$0.03 \pm 1.69$
		Июль–сентябрь	$-2.34 \pm 3.27$
	2008–2018	Ср. год	$-0.28 \pm 0.46$
		Январь–март	$-0.59 \pm 0.63$
		Июль–сентябрь	$0.73 \pm 0.85$
Москва	2000–2018	Ср. год	$-2.56 \pm 0.43$
		Январь–март	$-2.61 \pm 0.81$
		Июль–сентябрь	$-1.83 \pm 0.57$
	2000–2008	Ср. год	$-2.53 \pm 1.83$
		Январь–март	$-0.48 \pm 3.09$
		Июль–сентябрь	$-2.73 \pm 2.12$
	2008–2018	Ср. год	$-1.99 \pm 0.77$
		Январь–март	$-1.83 \pm 0.89$
		Июль–сентябрь	$-0.99 \pm 1.07$

ристики трендов ОС СО в Москве и Звенигороде в разные периоды и сезоны приведены в табл. 2.

Снижение в последние годы содержания и концентрации СО в атмосфере Москвы и повышение качества воздуха подтверждается нашими недавними результатами, основанными на анализе более коротких измерительных рядов [4, 5, 9, 18] и свидетельствует, в первую очередь, о сокращении городских выбросов оксида углерода. Основные причины уменьшения загрязненности атмосферы города – это:

- закрытие, перепрофилирование и модернизация промышленных предприятий в городе или перевод их за городскую черту;
- изменение состава автомобильного парка и улучшение качества автомобильных двигателей и автомобильного топлива, а также ограничительные меры правительства Москвы в отношении большегрузного транспорта.

Возможно также влияние т.н. “климатического фактора”, связанного с улучшением условий удаления примесей из городского воздушного бассейна (например, уменьшение продолжительности существования температурных инверсий или повторяемости штилевых условий).

В то же время в Московской области (ЗНС) тренды ОС СО отличаются от московских по ве-

личине и направленности (в зависимости от периода и сезона). Так, в зимние и весенние месяцы наблюдаются отрицательные тренды (например,  $-0.99 \pm 0.43$  и  $-0.59 \pm 0.63\%/год$ , для 2000–2018 и 2008–2018 гг. соответственно); в летние и осенние месяцы после 2007 г. фоновое ОС СО начало расти ( $0.73 \pm 0.85\%/год$ , июль–сентябрь 2008–2018 гг.), см. рис. 5 и табл. 2. О начале возрастания величин фонового ОС на ЗНС в летние и осенние месяцы примерно с 2007–2008 г. СО сообщалось в наших предыдущих работах [5, 18, 30]. Аналогичная тенденция (увеличение СО в осенние месяцы после 2007 г.) наблюдается и в Обнинске (Калужская обл.), где усредненные концентрации на уровнях 121 и 302 м росли в 2008–2017 гг. со скоростью  $\sim 0.7\%/год$ .

Причины начала летне-осеннего роста фонового СО в Московской и Калужской областях пока неясны. Возможно, этот рост связан с разрастанием Московского мегаполиса и городов Московской и сопредельных областей, с интенсификацией и изменением инфраструктуры транспортных потоков и хозяйственной деятельности в Московском мегаполисе, а также с переносом загрязнений. В особенности вопросы вызывает осенний период, когда влияние природных пожаров маловероятно. Полученные нами результаты об увели-

**Таблица 3.** Тренды средней скорости ветра в слое 100–500 м над поверхностью Земли по дневным данным аэрологического зондирования в г. Долгопрудный (пригород Москвы, станция № 27612) и г. Сухиничи (Калужская обл., станция № 27707)

Станция	Период, годы	Сезоны (усреднение)	Тренд %/год $\pm$ дов. инт
Долгопрудный	2000–2018	Год	$0.64 \pm 0.29$
		Январь–март	$0.62 \pm 0.51$
		Июль–сентябрь	$1.55 \pm 0.69$
Сухиничи	2002–2018	Год	$-0.04 \pm 0.71$
		Январь–март	$-0.55 \pm 0.71$
		Июль–сентябрь	$0.23 \pm 1.12$

чении СО в незагрязненных районах Московской и Калужской областей согласуются с подобными оценками для различных фоновых районов Европы и Азии. Например, в наших предыдущих работах также было отмечено возрастание содержания СО над Северной и Центральной Европой в летние и осенние месяцы и положительная динамика трендов СО в этих районах во все сезоны примерно после 2007–2008 г. при уменьшении эмиссий от природных пожаров в Европе и Западной части Сибири в 2008–2017 гг. [18, 30].

### 3. Влияние метеорологических процессов

Величина содержания СО в атмосфере Москвы зависит от скорости ветра и наличия температурных инверсий [4, 19], а в дни со слабым ветром происходит накопление загрязнений в ПСА Москвы [19]. Так, в дни со слабым ветром 2011–2016 гг. средняя величина накопления ОС СО составила примерно 12% за 9 ч [н. р.].

В настоящей работе проведено исследование долговременных трендов метеорологических параметров в ПСА Москвы и окружающих районов.

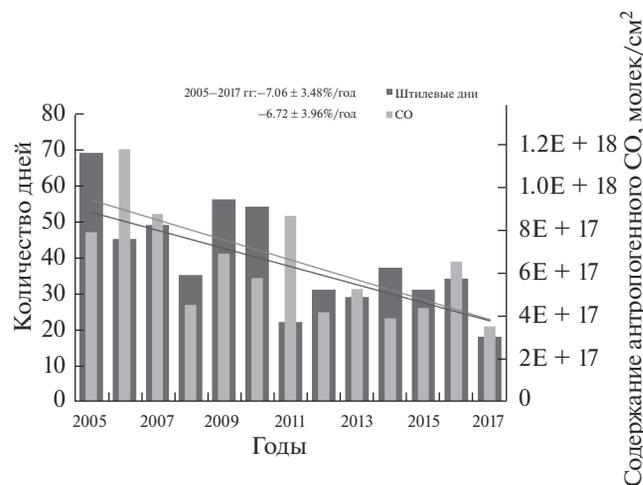
По данным аэрологического зондирования в пригороде Москвы (г. Долгопрудный) и в Калужской области (г. Сухиничи) были изучены межгодовые вариации скорости ветра в ПСА после 2000 г. Получено, что изменения скорости ветра в Москве и Калужской области отличаются. Так, в дневные часы в слое 100–500 м над земной поверхностью средняя скорость ветра в Москве увеличивается в разные сезоны и периоды; в то же самое время в Калужской области тренды скорости ветра слабоотрицательны или близки к нулю. Параметры трендов скорости ветра в разные сезоны 2000–2018 гг. для обоих пунктов приведены в табл. 3.

Получен статистически незначимый положительный тренд среднегодового времени существования (средней продолжительности в течение суток) температурных инверсий в ПСА Москвы ( $0.64 \pm 3.05\%$ /год для 2006–2016 гг.), см. рис. 4а.

Направленность сезонных трендов продолжительности инверсий в ПСА в Москве и Звенигороде отличается. Так, в холодные месяцы (январь–март) установлен отрицательный тренд этого параметра как в Москве, так и в области ( $-5.7 \pm 4.9\%$ /год, 2006–2016 гг. для Москвы и  $-5.5 \pm 10.0\%$ /год, 2009–2016 гг. для Звенигорода); в теплые месяцы (июль–сентябрь) в Москве установлен рост ( $3.7 \pm 3.3\%$ /год, 2006–2016 гг.), в то время как в Звенигороде наблюдалось уменьшение продолжительности инверсий ( $-9.3 \pm 7.5\%$ /год, 2008–2016 гг.).

Поскольку наиболее высокие значения концентрации и содержания СО в воздушном бассейне Москвы наблюдаются обычно в январе–марте [4, 9, 19], а направленность трендов продолжительности инверсий для сезонов отличается, то пока преждевременно однозначно утверждать о существенном влиянии изменений повторяемости устойчивой стратификации ПСА на качество воздуха в Москве.

Как было сказано выше, наибольшие уровни атмосферного загрязнения в Москве реализуются, как правило, в штилевые дни или дни со слабым ветром. Поэтому при оценке роли метеоро-



**Рис. 4.** Повторяемость штилевых дней и антропогенная часть содержания СО в период 2005–2017 гг.

логического фактора и его влияния на качество воздуха изучение повторяемости штилевых условий в городе и ее долговременных тенденций представляет дополнительный интерес.

В результате анализа метеоданных станции ВДНХ (ВВЦ) (период 2005–2017 гг.) о скорости ветра на уровне 2 м над земной поверхностью были выбраны дни, когда сумма скоростей ветра по 8 трехчасовым срокам наблюдений не превышала 3 м/с в сутки. Эти дни считались штилевыми.

Среднегодовое количество штилевых дней с 2005 по 2017 гг. уменьшалось со скоростью около 7%/год ( $-7.06 \pm 3.96\%$ /год), см. рис. 4. В этот же период антропогенная часть содержания СО снижалась практически с той же скоростью ( $-6.72 \pm 3.48\%$ /год).

Итак, в результате анализа метеорологических условий в ПСА Москвы установлены:

- статистически незначимые изменения времени существования температурных инверсий при выборке за год и отрицательные тренды этого параметра в холодные месяцы;
- увеличение в слое 100–500 м скорости ветра в дневные часы;
- уменьшение повторяемости штилевых дней.

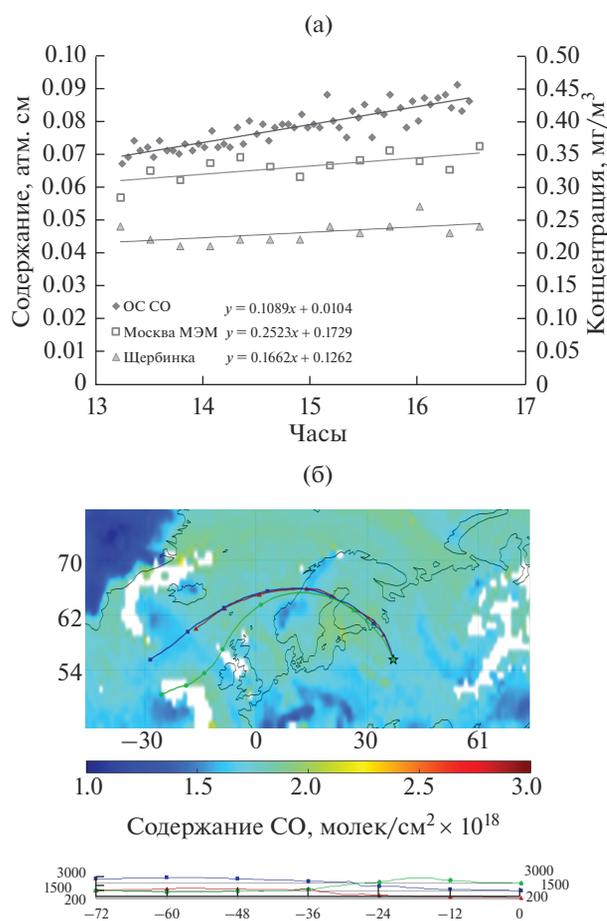
При этом в окружающих Москву сельских районах тенденции изменений метеорологических параметров иные. Так, скорость ветра в ПСА (пункт Сухиничи) практически не менялась, а время существования инверсий уменьшалось (пункт ЗНС).

Одним из возможных объяснений различий в характеристиках изменений метеопараметров ПСА Москвы и окружающих районов может быть увеличение влияния городского “острова тепла” (как результат разрастания мегаполиса и увеличения высотности городской застройки); для подтверждения правоты этого предположения необходимы дальнейшие исследования.

Таким образом, отрицательные тренды ОС СО в Москве могут быть частично объяснены не только уменьшением городских выбросов, но также уменьшением повторяемости неблагоприятных метеорологических условий.

#### 4. Исследование эпизодов накопления СО в атмосфере мегаполиса в штилевые дни

С учетом полученных ранее результатов, в 2018 г. был запланирован и проведен эксперимент по исследованию вариаций общего содержания и концентрации СО в пограничном слое атмосферы Москвы. В солнечные дни в условиях, близких к штилевым, спектроскопические измерения проводились непрерывно в течение всего светового дня. Для анализа метеорологических параметров были привлечены данные метеостанции ВДНХ о скорости и направлении ветра у поверх-



**Рис. 5.** Пример исследования накопления СО в штилевой день 11.10.2018: (а) – вариации общего содержания СО (пункт ИФА), концентрации СО в городе (усреднение по пунктам МЭМ в пределах МКАД) и в Шербинке (за пределами МКАД, 27 км к югу от центра города); (б) – распределение общего содержания окиси углерода по данным орбитального спектрометра AIRS и 72-часовые обратные траектории на уровнях 200, 1500 и 3000 м для 12:00 11.10.2018 (московское время).

ности и данные акустического зондирования в центре Москвы в пункте ИФА РАН на нескольких высотных уровнях. Затем были выбраны все солнечные измерительные дни со штилевыми условиями не только у земной поверхности, но и в атмосферном слое до 200 м (скорость ветра во время спектроскопических измерений не превышала 2 м/с во всем слое).

Для исключения из анализа дней с возможным переносом загрязнения из других загрязненных регионов Европы и Азии дополнительно были привлечены данные спутниковых измерений спектрометра AIRS для всех выбранных штилевых дней 2018 г. Также был выполнен траекторный анализ переноса воздушных масс HYSPLIT. Дополнительно были привлечены данные автоматизированных станций МЭМ в Москве (все доступные

**Таблица 4.** Характеристики накопления СО в атмосферной толще Москвы в штилевые солнечные дни 2018 г. по данным спектроскопических измерений.

День	Нач. изм	Оконч. изм	Накопл., %/час
03.05.2018	13:00	17:30	$2.50 \pm 1.06$
07.05.2018	14:00	18:00	$4.26 \pm 1.83$
10.05.2018	13:28	17:45	$2.65 \pm 0.92$
11.05.2018	14:03	17:33	$3.67 \pm 4.07$
12.05.2018	12:03	14:15	$4.13 \pm 3.29$
21.05.2018	12:56	17:49	$2.39 \pm 0.97$
29.05.2018	16:00	18:00	$8.03 \pm 2.65$
06.09.2018	12:15	15:16	$3.84 \pm 1.09$
08.10.2018	13:58	16:48	$6.62 \pm 1.54$
11.10.2018	13:01	16:53	$5.80 \pm 0.88$
15.10.2018	12:03	16:41	$4.32 \pm 0.70$
17.10.2018	8:58	16:37	$3.10 \pm 0.35$
22.10.2018	13:03	16:04	$5.94 \pm 1.50$
Среднее			$4.40 \pm 1.73$

пункты) и за ее пределами. Для всех штилевых дней были проанализированы вариации средней по городу концентрации СО и концентрации СО в пункте Щербинка (станция расположена за пределами МКАД в 27 км к югу от центра Москвы).

На рис. 5 приведен пример проведенного комплексного анализа в виде дневных ходов общего содержания и концентрации СО в Москве и Московской области, спутниковые распределения и обратные 72-часовые траектории для 11.10.2018 г.

На рис. 5б видно отсутствие областей с повышенным содержанием СО и интенсивных источников эмиссий на пути следования воздушных масс к Москве и, следовательно, отсутствие заноса загрязнений извне. На рис. 5а видно накопление СО в атмосфере Москвы как в толще, так и в приземном слое; при этом за пределами МКАД (пункт Щербинка) концентрация примеси остается в пределах типичных фоновых значений, что служит дополнительным свидетельством отсутствия атмосферного переноса загрязнений в район Москвы.

Подобным образом был произведен анализ других эпизодов накопления СО в ПСА Москвы. Были получены характеристики накопления СО в толще атмосферы над городом в штилевые дни. Результаты представлены в табл. 4.

Средняя скорость накопления составила  $4.40 \pm 1.73\%/ч$ ; такая скорость накопления в случае длительного штиля (например, 8–10 ч) может привести к увеличению содержания СО в атмосферной толще на 35–40%, а в отдельных случаях –

до 80% – и формированию уровня загрязнения в приземном слое с концентрациями СО, близкими к предельно допустимым. Подобный пример длительного штиля и связанного с ним высокого уровня загрязнения атмосферы Москвы был подробно разобран в [19].

Все вышесказанное свидетельствует о том, что даже в условиях сокращения антропогенных городских эмиссий случаи неблагоприятных метеорологических условий и в настоящее время могут привести к высоким концентрациям загрязняющих примесей в приземном воздухе такого крупного города, как Москва.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Заносы из Москвы в Звенигород относительно редки и приводят к существенному (более чем на 10%) повышению общего содержания СО в ЗНС в 5–6% случаев. Это обстоятельство позволяет использовать данные измерений ОС СО на ЗНС в качестве характеристик регионального фона.

2. Скорость уменьшения ОС СО в Москве в разные сезоны 2000–2018 гг. различна:  $(-2.61 \pm 0.81\%/год)$  для января–марта и  $(-1.81 \pm 0.57\%/год)$  для июля–сентября.

3. Установлено уменьшение среднегодовых величин фонового ОС СО  $(-1.06 \pm 0.36\%/год)$ , ЗНС, период 2000–2018 гг.). Однако после 2007 года спад фонового ОС СО замедлился; более того, в летние и осенние месяцы 2008–2018 гг. наблюдается рост фонового ОС СО со скоростью около 0.7%/год. Возможно, это увеличение связано с интенсификацией хозяйственной деятельности и автомобильного движения в загородных районах, а также с разрастанием мегаполиса.

4. Анализ метеорологических условий в ПСА Москвы и Московской и Калужской области установил:

– статистически незначимые изменения времени существования температурных инверсий в ПСА Москвы при выборке за год  $(0.64 \pm 3.05\%/год)$  для 2006–2016 гг.) и отрицательные тренды этого параметра в Звенигороде  $(-7.86 \pm 6.31\%/год)$  для 2008–2016 гг.);

– увеличение скорости ветра в слое 100–500 м в Москве в дневные часы  $(0.64 \pm 0.36\%/год)$ , среднегодовые значения 2000–2018 гг.);

– уменьшение повторяемости штилевых дней в Москве  $(-7.06 \pm 3.48\%/год)$  для 2005–2017 гг.).

При этом скорость ветра в ПСА в окружающих Москву сельских районах практически не менялась.

Полученные результаты свидетельствуют в целом не только о сокращении антропогенных эмиссий, но также о “климатическом вкладе” в улучшение качества воздуха в Москве.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект № 16-17-10275. Анализ спутниковой информации выполнен в рамках проекта РФФ № 20-17-00200.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Climate Change 2013: The Physical Science Basis: Ed. *T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, P.M. Midgley* IPCC, Cambridge; New York, 2013.
2. *Novelli P.C., Masarie K.A., Lang P.M.* Distributions and Recent Changes in Carbon Monoxide in the Lower Troposphere // *J. Geophys. Res.* 1998. V. 103(19). P. 015–033.
3. *Jacob D.J.* Introduction to Atmospheric Chemistry. New Jersey, Princeton: Princeton University Press, 1999. 267 p.  
<https://doi.org/10.1515/9781400841547>  
<http://acmg.seas.harvard.edu/people/faculty/djj/book/>
4. *Голицын Г.С., Гречко Е.И., Ван Г. Ван П., Джола А.В., Емиленко А.С., Копейкин В.М., Ракитин В.С., Сафронов А.Н., Фокеева Е.В.* Исследование загрязнения Москвы и Пекина окисью углерода и аэрозолям // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана.* 2015. № 1. С. 1–12.
5. *Wang P., Elansky N.F., Timofeev Yu.M., Wang G., Golitsyn G.S., Makarova M.V., Rakitin V.S., Stabkin Yu.A., Skorokhod A.I., Grechko E.I., Fokeeva E.V., Safronov A.N.* Long-term trends of carbon monoxide total columnar amount in urban areas and background regions: ground- and satellite-based spectroscopic measurements // *Adv. Atmos. Sci.* 2018. V. 35. № 7. P. 785–795
6. *Тимофеев Ю.М., Поляков А.В., Виралайнен Я.А., Макарова М.В., Ионов Д.В., Поберовский А.В., Имхасин Х.Х.* Оценки трендов содержания климатически важных атмосферных газов вблизи Санкт-Петербурга // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана.* 2020. Т. 56. № 1. С. 97–103.
7. *Макарова М.В., Поберовский А.В., Осипов С.И.* Временная изменчивость общего содержания СО в атмосфере вблизи Санкт-Петербурга // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана.* 2011. Т. 47. № 6. С. 801–808.  
<https://doi.org/10.1134/S0002351511060101>
8. *Фока С.Ч., Макарова М.В., Поберовский А.В., Тимофеев Ю.М.* Временные вариации концентрации СО<sub>2</sub>, СН<sub>4</sub> и СО в пригороде Санкт-Петербурга (Петергоф) // *Оптика атмосферы и океана.* 2019. Т. 32. № 10. С. 860–866.
9. *Elansky N.F., Ponomarev N.A., Verevkin Ya.M.* Air quality and pollutant emissions in the Moscow megacity in 2005–2014 // *Atmos. Environ.* 2018. V. 175. № 2. P. 54–64.
10. *Dlugokencky E., Crotwell A., Masarie K., White J., Lang P., Crotwell M.* NOAA measurements of long-lived greenhouse gases // *Asia – Pacific GAW Greenhouse Gases.* Newsletter KMA. 2013. V. 4. P. 6–9.
11. *De Mazière, M., Thompson A.M., Kurylo M.J., Wild J.D., Bernhard G., Blumenstock T., Braathen G., Hannigan J.W., Lambert J., Leblanc T., McGee T.J., Nedoluha G., Petropavlovskikh I., Seckmeyer G., Simon P., Steinbrecht W., Strahan S.* The Network for the Detection of Atmospheric Composition Change (NDACC): history, status and perspectives // *Atmos. Chem. Phys.* 2018. V. 18. P. 4935–4964.
12. *Jiang Z., Worden J.R., Worden H., Deeter M., Jones D.B.A., Arellano A.F., Henze D.K.* A fifteen year record of CO emissions constrained by MOPITT CO observations // *Atmos. Chem. Phys.* 2017. V. 17. P. 4565–4583.  
<https://doi.org/10.5194/acp-17-4565-2017>
13. *Yin Y., Chevallier F., Ciais P., Broquet G., Fortems-Cheiney A., Pison I., Saunois M.* Decadal trends in global CO emissions as seen by MOPITT, *Atmos. Chem. Phys.* 2015. V. 15. P. 13433–13451.  
<https://doi.org/10.5194/acp-15-13433-2015>
14. *Krol M., Peters W., Hooghiemstra P., George M., Clerbaux C., Hurtmans D., McInerney D., Sedano F., Bergamaschi P., El Hajj M., Kaiser W., Fisher D., Yershov V., Muller J.-P.* How much CO was emitted by the 2010 fires around Moscow? // *Atmos. Chem. Phys.* 2013. V. 13. P. 4737–4747.
15. *Safronov A.N., Fokeeva E.V., Rakitin V.S., Grechko E.I., Shumskii R.A.* Severe wildfires near Moscow, Russia, in 2010: modeling of carbon monoxide pollution and comparisons with observations // *Remote Sensing.* 2015. № 7. P. 395–429.  
<https://doi.org/10.3390/rs70100395>
16. *Ghosh D., Basu S., Ball A.K., Sarkar U.* Spatio-temporal variability of CO over the Eastern Indo-Gangetic Plain (IGP) and in parts of South-East Asia: a MER-RA-2-based study // *Air Qual. Atmos. Health.* 2019. V. 12. P. 1153–1167.  
<https://doi.org/10.1007/s11869-019-00728-2>
17. *Еланский Н.Ф., Курсанов А.А., Пономарёв Н.А., Постыляков О.В., Боровский А.Н., Веревкин Я.М.* Применение химико-транспортных моделей атмосферы для валидации эмиссий загрязняющих примесей в Москве // *Оптика атмосферы и океана.* 2020. Т. 33. № 2. С. 119–126.  
DOI: 10.15372/AOO20200206.
18. *Rakitin V.S., Elansky N.F., Wang P., Wang G., Pankratova N.V., Shtabkin Yu.A., Skorokhod A.I., Safronov A.N., Makarova M.V., Grechko E.I.* Changes In Trends Of Atmospheric Composition Over Urban And Background Regions Of Eurasia: Estimates Based On Spectroscopic Observations // *Geography, Environment, Sustainability.* 2018. V.11. № 2. P. 84–96.
19. *Ракитин В.С., Фокеева Е.В., Гречко Е.И., Джола А.В., Кузнецов Р.Д.* Вариации содержания окиси углерода в атмосфере Московского мегаполиса // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана.* 2011. Т. 47. № 1. С. 64–72.
20. *Yurganov L. N., Rakitin V., Dzhola A., August T., Fokeeva E., George M., Gorchakov G., Grechko E., Hannon S., Karpov A., Ott L., Semutnikova E., Shumsky R., Strow L.* Satellite- and ground-based CO total column observations over 2010 Russian fires: accuracy of top-down estimates based on thermal IR satellite data // *Atmos. Chem. Phys.* 2011. V. 11. P. 7925–7942.
21. *Elansky N.F., Shilkin A.V., Ponomarev N.A., Semutnikova E.G., Zakharova P.V.* Weekly patterns and weekend effects of air pollution in the Moscow megacity // *Atmos.*

- Environ. 2020. V. 224. P. 54–64. 117303.  
<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117303>
22. 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. V8. №2. P. 139–151.
  23. Yurganov L.N., Grechko E.I., Dzhola A.V. Long-term measurements of carbon monoxide over Russia using a spectrometer of medium resolution // Recent Res. Devel. Geophys. 2002. №. 4. P. 249–265.
  24. Кузнецов П.Д. Акустический локатор ЛАТАН-3 для исследований атмосферного пограничного слоя // Оптика атмосферы и океана. 2007. Т. 20. № 8. С. 749–753.
  25. Aumann H.H., Chahine M.T., Gautier C., Goldberg M., Kalnay E., McMillin L., Revercomb H., Rosenkranz P.W., Smith W.L., Staelin D., Strow L., Susskind J. AIRS/AMSU/HSB on the Aqua mission: Design, science objectives, data products and processing systems // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 2003. V. 41. № 2. P. 253–264.
  26. McMillan W.W., Evans K.D., Barnet C.D., Maddy E.S., Sachse G.W., Diskin G.S. AIRS V5 CO retrieval with DACOM in situ measurements // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 2011. V. 49. P. 1–12.  
<https://doi.org/10.1109/TGRS.2011.2106505>
  27. AIRS/AMSU/HSB Version 6 Data Release User Guide. Ed. by E.T. Olsen. [https://docsserver.gesdisc.eosdis.nasa.gov/repository/Mission/AIRS/3.3\\_Science-DataProductDocumentation/3.3.4\\_ProductGenerationAlgorithms/V6\\_Data\\_Release\\_User\\_Guide.pdf](https://docsserver.gesdisc.eosdis.nasa.gov/repository/Mission/AIRS/3.3_Science-DataProductDocumentation/3.3.4_ProductGenerationAlgorithms/V6_Data_Release_User_Guide.pdf).
  28. Stein A.F., Draxler R.R., Rolph G.D., Stunder B.J.B., Cohen M. D., Ngan F. NOAA's HYSPLIT atmospheric transport and dispersion modeling system // Bull. Amer. Meteorol. Soc. 2015. V. 96. P. 2059–2077.
  29. Ситнов С.А., Мохов И.И., Горчаков Г.И. Связь задымления атмосферы европейской территории России летом 2016 года с лесными пожарами в Сибири и аномалиями атмосферной циркуляции // Докл. РАН. 2017. Т. 472. № 4. С. 456–461.
  30. Rakitin V.S., Skorokhod A.I., Pankratova N.V., Shtabkin Yu.A., Rakitina A.V., Wang G., Vasilieva A.V., Markarova M.V., Wang P. Recent changes of atmospheric composition in background and urban Eurasian regions in XXI-th century // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2020. Т. 606. № 1. P. 012048.  
[doi:10.1088/1755-1315/606/1/012048](https://doi.org/10.1088/1755-1315/606/1/012048).

## Long-Term Tendencies of Carbon Monoxid Total Content in the Moscow Megapolis Atmosphere

V. S. Rakitin<sup>1,\*</sup>, N. F. Elansky<sup>1,\*\*</sup>, A. I. Skorokhod<sup>1,\*\*\*</sup>, A. V. Dzhola<sup>1,\*\*\*\*</sup>, A. V. Rakitina<sup>1,\*\*\*\*\*</sup>,  
A. V. Shilkin<sup>1,2,\*\*\*\*\*</sup>, N. S. Kirillova<sup>1,\*\*\*\*\*</sup>, and A. V. Kazakov<sup>1,\*\*\*\*\*</sup>

<sup>1</sup>Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS, Pyzhevsky per., 3, Moscow, 119017 Russia

<sup>2</sup>RPO "Taifun", Pobedy str., 4, Obninsk, Kaluga province, 249038 Russia

\*e-mail: vadim@ifaran.ru

\*\*e-mail: n.f.elansky@mail.ru

\*\*\*e-mail: skorokhod@ifaran.ru

\*\*\*\*e-mail: dzhola@yandex.ru

\*\*\*\*\*e-mail: rakitinarabota@gmail.com

\*\*\*\*\*e-mail: dogget@list.ru

\*\*\*\*\*e-mail: n.kirillova65@gmail.com

\*\*\*\*\*e-mail: artem.kasakov@gmail.com

Complex analysis results of CO total content (CO TC) measurements on OIAP stations in Moscow and its outskirts as well as Mosecomonitoring network data are presented with using of satellite monitoring results and information on ABL parameters in Moscow and surrounding regions. CO TC and meteorological parameters long-term variability was investigated, carbon monoxide accumulation characteristics during calm days and Moscow integral emission estimates were obtained. A decrease in CO TC in the 2000–2018 for was established Moscow ( $-2.56 \pm 0.52\%/year$ ) and ZSS ( $-1.06 \pm 0.36\%/year$ ). However, the rate of decrease in both sites is different in different seasons and periods. After about 2007–2008, the rate of CO TC reduction decreased at both sites. In the 2008–2018 at the ZSS, an increase in CO TC at a rate of about  $0.7\%/year$  was recorded in the summer and autumn months. An increase in the wind speed in the atmospheric boundary layer of Moscow in different periods of 2000–2018 was established at a rate of  $0.4–1.6\%/year$ . At the same time, no statistically significant changes in wind speed were found in the Kaluga region. The recurrence of calm days in Moscow in 2006–2017 decreased ( $-7.06 \pm 3.96\%/year$ ) with a decrease in the anthropogenic part of the CO content in the same period ( $-6.72 \pm 3.48\%/year$ ). The results obtained indicate the influence of the climatic (meteorological) factor on air quality in Moscow.

**Keywords:** atmospheric composition, carbon monoxide, atmospheric spectroscopy, remote sensing, megapolis, trends