

УДК 504.3.054

# ВЛИЯНИЕ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ НА ЗАГРЯЗНЕНИЕ ВОЗДУХА В МОСКВЕ

М.А. Локощенко<sup>1</sup>,  
Н.Ф. Еланский<sup>2</sup>,  
А.В. Трифанова<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,

<sup>2</sup>Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН,

<sup>3</sup>Международный университет природы, общества и человека «Дубна»

Подробно рассмотрены закономерности влияния скорости ветра и относительной влажности на приземное содержание малых атмосферных газов в Москве.

**Ключевые слова:** загрязнение воздуха, источники выбросов, зондирование атмосферы, профили ветра, температурная стратификация, вертикальное перемешивание.

## ВВЕДЕНИЕ

Как известно, многие малые атмосферные газы (озон, окислы азота и серы, окись углерода и пр.) оказывают вредное воздействие на организмы людей, животных и растений, а также на строительные материалы, памятники архитектуры и истории и пр. [1, 2] и др. Поэтому понятие экологической безопасности включает в себя, помимо прочего, контроль содержания этих примесей в атмосфере и ограничение их уровней ниже предельно допустимых значений. Метеорологические условия существенно влияют на накопление и рассеивание загрязняющих веществ в приземном слое воздуха крупных городов и промышленных зон. К ним относятся как значения основных метеорологических величин – скорости и направления ветра, температуры воздуха и показателей атмосферной влажности – вблизи поверхности, так и их распределение с высотой. При одной и той же интенсивности вредных выбросов, но при разных метеорологических условиях приземное содержание малых газов может существенно отличаться. Поэтому самый простой и дешевый путь борьбы с загрязнением воздуха – это оперативное регулирование уровня выбросов с учетом текущих

## INFLUENCE OF METEOROLOGICAL CONDITIONS ON THE AIR POLLUTION IN MOSCOW

M.A. LOKOSHCHENKO,  
N.F. ELANSKY, A.V. TRIFANOVA

The dependences of meteorological parameters (wind speed, air temperature and relative humidity) on the air pollution ground levels in Moscow city with the use of combined database of continuous chemical and meteorological measurements during several years are presented and discussed.

**KEYWORDS:** air pollution, low and high emission sources, acoustic remote sensing of the atmosphere, wind profiles, thermal stratification, vertical mixing.

условий ветрового режима, температурной стратификации, направления переноса воздушных масс, выпадения атмосферных осадков, наличия туманов, инверсий и т.п. Временное ограничение выбросов вредных примесей промышленными предприятиями и городским отоплением при неблагоприятных условиях рассеивания в атмосфере и осуществление залповых выбросов при благоприятных условиях позволяет избежать опасных уровней их накопления в приземном слое воздуха. Регулирование интенсивности транспортных потоков в зависимости от метеорологических условий также осуществимо, хотя и в меньшей степени.

В Метеорологической обсерватории МГУ на Ленинских горах в юго-западной части столицы, начиная с 2002 года, работает совместная Экологическая станция ИФА РАН и Географического факультета МГУ [3 и др.]. Здесь с высокой точностью и в соответствии со стандартами Глобальной службы атмосферы Всемирной метеорологической организации ежеминутно измеряется приземное содержание углекислого газа, а также многих малых атмосферных газов: O<sub>3</sub>, NO, NO<sub>2</sub>, CO, SO<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>, CH<sub>4</sub> и др. Здесь же произво-

дятся наземные стационарные измерения метеорологических величин, а также работает первый в России серийный доплеровский акустический локатор (содар) «MODOS» производства фирмы МЕТЕК (Германия). С его помощью измеряются профили скорости и направления ветра в нижнем 500-метровом слое воздуха – в среднем за каждые 10 минут. Авторами создана объединенная база одновременных данных о приземном содержании малых газов, скорости ветра на разных уровнях, а также температуре воздуха  $T$  и относительной влажности  $F$  на уровне 2 м за каждый отдельный час в течение нескольких лет. Эта база данных позволила впервые исследовать зависимости уровней загрязнения воздуха от значений основных метеорологических величин с высокой статистической обеспеченностью.

### ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ ВЕТРА

На рис. 1 приведены эмпирические функции приземного содержания пяти малых газов от скорости ветра  $V$  в Москве на уровне 40 м (по содарным данным) в среднем за период с ноября 2004 по январь 2007 гг. Размер выборки, т.е. число часов одновременных измерений состава воздуха и скорости ветра составляет от 5436 до 5493 для разных примесей. Эта часть результатов опубликована в [6], а за расширенный период вплоть до июня 2008 года – в [7]. Как видно на рисунке, окись азота и окись углерода (первичные продукты сгорания топлива), а также двуокись азота (в основном вторичный продукт сгорания) демонстрируют монотонно убывающие функции: чем больше в среднем  $V$ , тем меньше их приземное содержание. Очевидно, это является результатом совместного действия двух причин. Во-первых, с ростом  $V$

закономерно возрастает вертикальный турбулентный обмен и, как следствие, интенсивность вертикального перемешивания, приводящего к рассеиванию малых газов в вышележащие слои воздуха и уменьшению их приземного содержания. Во-вторых, при более сильном горизонтальном переносе загрязненный городской воздух быстрее замещается чистым воздухом из Подмоскovie. Следствием обеих этих причин служит уменьшение уровня загрязнения приземного воздуха. Наибольшее содержание всех трех веществ ( $CO$ ,  $NO$  и  $NO_2$ ) наблюдается при предельно слабом ветре – от 0 до 1 м/с на уровне 40 м, поскольку основной источник выбросов этих газов – двигатели автомобилей в самом нижнем слое воздуха. Представленные на рис. 1 эмпирические функции этих веществ отражают также и опосредованное влияние температурной стратификации, поскольку условия штиля ночью обычно связаны с существованием задерживающего слоя приземной инверсии, также способствующей загрязнению воздуха.

В отличие от  $NO$  и  $CO$ , двуокись серы как продукт выбросов в основном высоких источников – труб ТЭЦ, котельных и др. – показывает немонотонную функцию. Наибольшее приземное содержание этой примеси связано не с предельно малой скоростью ветра, а с ее значениями в промежутке от 1 до 2 м/с. Очевидно, при полном штиле дымовые шлейфы от высоких источников поднимаются вверх, и уровень приземного загрязнения не самый высокий. Качественно данный эффект был также отмечен в [1, 4]. Озон же вследствие своей особенности (пониженного содержания вблизи земной поверхности из-за своего осаждения на ней) обнаруживает в целом противоположную зависимость: чем больше  $V$ , тем больше

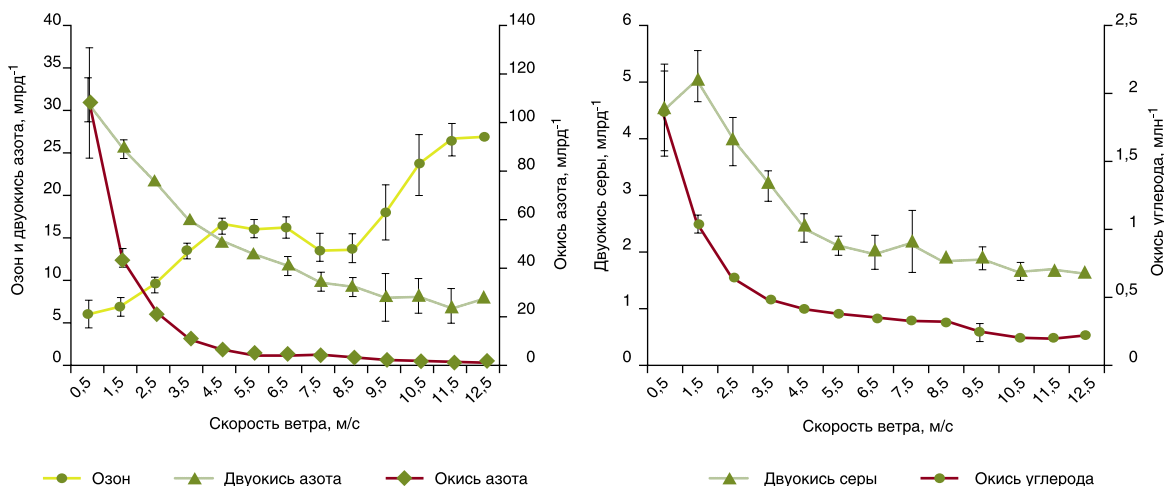


РИС. 1.

Зависимости приземного содержания озона, оксидов азота (слева) и двуокиси серы, окиси углерода (справа) в МГУ от скорости ветра по содарным данным на высоте 40 м в среднем за каждый час за период 2004–2007 гг. Доверительные интервалы рассчитаны с уровнем значимости 0,05

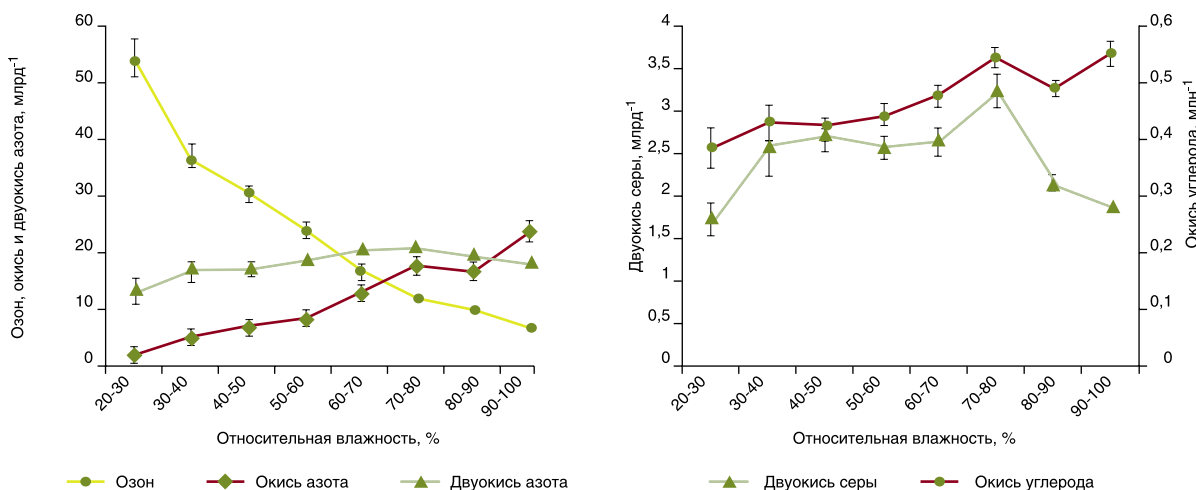


РИС. 2.

Зависимости приземного содержания озона, оксидов азота (слева) и двуокиси серы, окиси углерода (справа) в МГУ от относительной влажности на высоте 2 м в среднем за каждый час за период 2004–2007 гг. Доверительные интервалы рассчитаны с уровнем значимости 0,05

содержание приземного озона. Более интенсивное вертикальное перемешивание, связанное с сильным ветром, ведет, как правило, к росту приземного содержания  $O_3$  вследствие притока этого газа из вышележащих слоев.

### ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА

Как показали наши расчеты (графические результаты приведены в [6]), в пределах большей части диапазона значений  $T$  в Москве (от  $-10$  и до  $+20^\circ C$ ) зависимости малых газов от этого показателя практически отсутствуют: приземное содержание каждой примеси приблизительно одинаковое при любом обычном значении  $T$  в пределах статистической погрешности. Лишь при экстремально низких или экстремально высоких значениях температуры воздуха, наблюдающихся крайне редко, происходят достоверные изменения: резкий рост приземного содержания  $NO$ ,  $CO$  и  $SO_2$  в условиях сильных морозов, а также рост приземного  $O_3$  при сильной жаре. Первый эффект очевидно связан с задерживающей ролью приземных инверсий, с замедлением скорости окисления  $NO$  и  $CO$  при очень низких температурах, а также с использованием резервного топлива (мазута) в системе городского отопления во время сильных морозов 2006 г., что привело к существенному увеличению выбросов в атмосферу  $SO_2$  [5]. Второй же эффект (рост  $O_3$  при значениях  $T$  до  $+30^\circ C$  и выше) косвенно связан с антициклональными условиями в теплое время года, приводящими, с одной стороны, к увеличению прихода в условиях ясного неба ультрафиолетовой радиации, способствующей образованию озона вблизи поверхности, а также к более быстрому поступлению к поверхности озона из вышележащих слоев благодаря интенсивной

термической конвекции. Таким образом, зависимости состава приземного воздуха от температуры воздуха в значительной мере отражают опосредованное влияние температурной стратификации и, как следствие, условий вертикального перемешивания.

### ВЛИЯНИЕ ОТНОСИТЕЛЬНОЙ ВЛАЖНОСТИ

Эта часть наших результатов представлена здесь впервые. На рис. 2 представлены результаты расчетов, размер выборок составляет от 21525 до 23397 ч одновременных измерений для разных малых газов. Следует заметить, что при выпадении осадков относительная влажность  $F$  на уровне 2 м, как правило, превышает 85–90%, а при тумане или при сильной дымке подчас достигает даже 100%.

В суточном ходе наибольшие значения  $F$  наблюдаются обычно ночью, а в годовом ходе – осенью и зимой, поскольку  $F$  – не самостоятельный физический показатель, а функция двух переменных: температуры воздуха  $T$  и упругости водяного пара. Наименьшие же значения  $F$  отмечаются в суточном ходе днем (иногда – даже менее 20%), а в годовом ходе – весной и летом. Таким образом, динамика значений  $F$  косвенно отражает условия температурной стратификации (преимущественно устойчивой зимой и ночью и преимущественно неустойчивой летом в дневные часы) и, как следствие, интенсивность вертикального перемешивания. Поэтому связь приземного загрязнения воздуха на рис. 2 с относительной влажностью – в основном опосредованная: чем больше  $F$ , тем обычно меньше  $T$  и тем чаще отмечается приземная инверсия, способствующая накоплению вредных примесей. Поэтому зависимости от  $F$  всех малых газов, кроме только озона, – в основном устойчиво возрастающие

вплоть до значения 80%. Как уже отмечено выше, усиление вертикального перемешивания приводит к росту приземного  $O_3$  и к уменьшению содержания всех остальных малых газов, основные источники которых сосредоточены вблизи поверхности. Лишь при очень высокой относительной влажности в промежутке от 80 до 100% проявляется ее прямое воздействие на  $NO_2$  и  $SO_2$ , степень растворимости которых наибольшая. Осаждение этих веществ на частицах тумана и их вымывание каплями осадков приводит к уменьшению приземного содержания двуокиси азота и двуокиси серы при  $F > 80\%$ , в силу чего зависимости этих двух газов на рис. 2 немонотонные. Особенно сильно это уменьшение проявляется для двуокиси серы: как известно, именно вымывание осадками служит главным стоком этой примеси, ограничивающим время ее жизни в атмосфере в среднем до 5 дней [2]. Сравнительно слабо растворимая окись азота и почти нерастворимая окись углерода демонстрируют почти монотонные зависимости с наибольшими значениями при предельно высокой относительной влажности ( $F > 90\%$ ).

Таким образом, как температура воздуха, так и относительная влажность влияют на приземное содержание загрязняющих примесей в воздушном бассейне крупного города в средних широтах значительно слабее по сравнению со скоростью ветра. За исключением медленной скорости окисления  $NO$  и  $CO$  при очень низкой температуре воздуха и растворения  $NO_2$  и  $SO_2$  на гидрометеорах при очень высокой относительной влажности, влияние обоих этих показателей в основном косвенное и опосредовано через интенсивность вертикального перемешивания. Влияние же скорости ветра на состав воздуха в приземном слое в основном прямое и непосредственное и проявляется в целом существенно сильнее.

## КРАТКИЕ ВЫВОДЫ

С точки зрения экологического состояния воздушного бассейна в крупном городе наиболее опасны условия штиля или очень слабого ветра. Однако применительно к озону при его высоком содержании в приземном слое воздуха опасной является, напротив, очень большая скорость ветра. Вероятность накопления вблизи поверхности продуктов сгорания топлива сверх обычных значений возрастает при экстремально низкой температуре воздуха, а приземного озона – наоборот, при очень высоких значениях  $T$ . В целом благоприятными являются условия очень высокой относительной влажности, связанные с наличием в атмосфере большого числа гидрометеоров.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ, проекты №№ 14-05-00594 и 13-05-00461.

## Литература

1. Безуглая Э.Ю. Метеорологический потенциал и климатические особенности загрязнения воздуха городов. Л.: Гидрометеиздат, 1980.
2. Бримбакумь П. Состав и химия атмосферы. М.: Мир, 1988.
3. Еланский Н.Ф., Локощенко М.А., Беликов И.Б., Скороход А.И., Шумский Р.А. Изменчивость газовых примесей в приземном слое атмосферы Москвы. Известия РАН. Сер. Физика атмосферы и океана. 2007. Т. 43, № 2. С. 246–259.
4. Климатические характеристики условий распространения примесей в атмосфере / Под редакцией Э.Ю. Безуглой и М.Е. Берлянда. Л.: Гидрометеиздат, 1983.
5. Локощенко М.А., Еланский Н.Ф., Маляшова В.П., Трифанова А.В. Динамика приземного содержания двуокиси серы в Москве. Оптика атмосферы и океана. 2008. № 5. С. 441–449.
6. Трифанова А.В., Локощенко М.А., Еланский Н.Ф. Влияние скорости ветра по содарным данным на приземное содержание малых газов в Москве. Труды XVI международной школы-конференции молодых ученых «Состав атмосферы. Атмосферное электричество. Климатические эффекты». М.: ГЕОС, 2012. С. 202–205.
7. Lokoshchenko M.A., Trifanova A.V., Elansky N.F. Wind velocity by the sodar data and its influence on air pollution in Moscow. Extended Abstracts of Presentations from the 16th International Symposium for the Advancement of Boundary-Layer Remote Sensing. Boulder, Colorado, USA, 2012. P. 184–187.

**Локощенко Михаил Александрович**,  
к.г.н., в.н.с. Географического факультета МГУ имени  
М.В. Ломоносова, доцент,

☎ 119991, г. Москва, Ленинские горы, МГУ,  
тел.: +7 (495) 939-42-84, e-mail: loko@geogr.msu.ru

**Еланский Николай Филиппович**,  
д.ф.-м.н., профессор, чл.-корр. РАН, зав. отделом Института  
физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН,

☎ г. Москва, Пыжевский пер., д. 3

**Трифанова Александра Викторовна**,  
аспирантка ГБОУ ВПО МО «Международный университет  
природы, общества и человека «Дубна»

☎ 141980, Московская обл., г. Дубна, ул. Университетская,  
д. 19, каб. 1-301, тел.: +7 (496) 219-07-29