

ГЕОГРАФИЯ И ЭКОЛОГИЯ

УДК 551.510.42 551.553.5 551.524.3

М.А. Локощенко¹, Н.Ф. Еланский², А.В. Трифанова³, И.Б. Беликов⁴, А.И. Скороход⁵

О ПРЕДЕЛЬНЫХ УРОВНЯХ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ВОЗДУХА В МОСКВЕ

По данным непрерывных 11-летних измерений на совместной экологической станции ИФА имени А.М. Обухова РАН и географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова с 2002 по 2012 г. приведены сведения о наибольших и наименьших значениях приземного содержания малых атмосферных газов: озона, окиси и двуокиси азота, окиси углерода и двуокиси серы. Показано, что в районе МГУ, в юго-западной части Москвы, вдали от промышленных предприятий и крупных автомагистралей, случаи превышения ПДК очень редки: их доля составляет ~0,1% для O₃, NO и CO; 0,01% для NO₂ и <0,001% для SO₂. Максимум-максимум содержания озона в среднем за 10 мин составил 150 млрд⁻¹; NO и NO₂ – 996 и 226 млрд⁻¹ соответственно; CO – 16 млн⁻¹; SO₂ – 276 млрд⁻¹. Аномально сильное загрязнение воздуха обычно связано с продолжительными антициклональными условиями. Самые высокие уровни содержания O₃, NO₂ и CO отмечены во время дымной мглы при исключительно жаркой погоде летом 2010 и 2002 г., а SO₂, напротив, – при очень сильных морозах зимой 2006 г. На примерах данных, полученных с помощью содаров «ЭХО-1» и «MODOS», показана связь рекордно высоких уровней загрязнения воздуха как с температурной стратификацией, так и с ветровым режимом нижней атмосферы. Впервые по многолетним данным выявлены закономерности суточного и годового хода предельно низких (близких к нулю) значений приземного содержания O₃, NO и SO₂.

Ключевые слова: загрязнение воздуха, малые атмосферные газы, приземное содержание, дымная мгла, температурная стратификация, ветровой режим, содарные данные.

Введение. Под химическим загрязнением воздуха принято понимать наличие в его составе примесей, оказывающих вредное воздействие на организмы людей, животных и растений, а также на некоторые материалы, если содержание этих примесей существенно превышает фоновые значения в ненаселенной местности вдали от источников выбросов.

Основными атмосферными загрязнителями служат озон (O₃), окись и двуокись азота (NO, NO₂), окись углерода (CO). Традиционно к их числу относят также и двуокись серы (SO₂), хотя за последние десятилетия связанная с ней опасность для здоровья людей существенно уменьшилась, поскольку содержание этого газа резко сократилось и даже во многих крупных городах приблизилось к фоновым значениям [Локощенко и др., 2008].

Вещества с малым временем жизни (τ), например NO, быстро окисляющийся в атмосфере до NO₂ (τ для NO составляет в среднем несколько часов, а для NO₂ – около 3 сут.), характеризуются локальными областями повышенных значений вблизи источников выбросов. В то же время более долгоживущие газы (например, CO со средним значением τ около 2–4 мес. и даже SO₂ с $\tau = 5$ сут. [Бримблкумб,

1988]) успевают распространиться с воздушными течениями на значительное расстояние – иногда на несколько сотен и даже на несколько тысяч километров от источников их выбросов. Тем не менее наиболее остро проблема загрязнения воздуха стоит именно в городах и в промышленных зонах, где вредные атмосферные примеси выбрасываются в большом объеме промышленными предприятиями, системами городского отопления и двигателями автомобилей. Скорость их рассеивания в нижней тропосфере существенно зависит от метеорологических условий – главным образом от температурной стратификации и ветрового режима. В ряду обобщенных показателей, учитывающих оба эти фактора, отметим предложенный Э.Ю. Безуглой и ее коллегами из Главной геофизической обсерватории потенциал загрязнения атмосферы [Безуглая, 1980].

Несмотря на закрытие многих промышленных предприятий в черте столицы в начале 1990-х гг., проблема загрязнения воздуха в Москве остается насущной в связи с продолжающимся быстрым и устойчивым ростом городского автомобильного парка. Число автомобилей здесь уже превысило

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, кафедра метеорологии и климатологии, вед. науч. с., канд. геогр. н., доцент; *e-mail:* loko@geogr.msu.ru

² Институт физики атмосферы имени А.М. Обухова, заведующий отделом исследования состава атмосферы, член-корреспондент РАН, докт. физ.-мат. н., профессор; *e-mail:* n.f.elansky@mail.ru

³ Государственный университет «Дубна», кафедра экологии и наук о Земле, аспирантка; *e-mail:* triav@yandex.ru

⁴ Институт физики атмосферы имени А.М. Обухова, лаборатория газовых примесей атмосферы, ст. науч. с., канд. физ.-мат. н.; *e-mail:* belikov@ifaran.ru

⁵ Институт физики атмосферы имени А.М. Обухова, заведующий лабораторией газовых примесей атмосферы, канд. геогр. н.; *e-mail:* skorokhod@ifaran.ru

4 млн (согласно данным Мосгорстата – 4369 тыс. в 2014 г.); оно увеличилось в 6,5 раз по сравнению с серединой 1980-х гг. (667 тыс. в 1986 г.) и почти в 30 раз за последние полвека (154 тыс. автомобилей в 1961 г.). Именно автомобильные выхлопы вносят основной вклад в загрязнение столичного воздуха – доля их в общих выбросах составляет в настоящее время ~90% [Обзор..., 2006]. Обычно замещение загрязненного городского воздуха более чистым из сельской местности и рассеивание факелов выбросов в вышележащие слои предотвращают чрезмерное накопление продуктов горения вблизи подстилающей поверхности. Однако в редких случаях при одновременном наличии разных явлений, способствующих загрязнению воздуха (сильная инверсия, штиль, туман и пр.), уровень содержания загрязняющих примесей в приземном слое может существенно превысить обычные значения. С неблагоприятными метеорологическими условиями было связано большинство катастроф, произошедших в XX в., например, в долине Маас (Бельгия), в Доноре (США), в Розе-Рике (Мексика), в Лондоне (Великобритания) и в других местах, когда из-за чрезвычайно сильного загрязнения воздуха погибли сотни и даже тысячи людей [Бримблкомб, 1988]. Заметим, что, за исключением Бхопала (Индия, 1984 г.), все остальные катастрофы были вызваны аномально высоким содержанием обычных малых газов, в основном SO_2 .

Для своевременного предотвращения подобных случаев необходимо оперативно отслеживать метеорологические условия рассеивания загрязняющих веществ. Требуется оценивать не только средние, но и предельно высокие значения их приземного содержания, которые возможны при стечении неблагоприятных обстоятельств. Как климат характеризуется не только средними значениями, но и диапазоном возможных изменений метеорологических величин, так и состав атмосферы («химический климат») конкретной местности требует знания не только средних, но и предельных значений содержания тех или иных веществ. Отдельные эпизоды сильного загрязнения воздуха и их связи с метеорологическими условиями рассмотрены для разных городов в ряде работ [Cuhadaroglu, Demirci, 1997; Katsoulis, 1988; Molina et al., 2007]. Однако наряду с рекордно высокими значениями важно оценивать повторяемость и самых низких возможных уровней накопления малых газов, а также метеорологические условия, при которых загрязнение воздуха наименьшее. Заметим, что рекордно малые значения приземного содержания загрязняющих веществ гораздо реже становятся объектом исследований, хотя их анализ представляет отдельный научный интерес и даже важен для практики с учетом медицинских показаний к нахождению на открытом воздухе людей, страдающих заболеваниями органов дыхания. Этой проблеме применительно к Москве и посвящена статья; предварительные результаты опубликованы в [Трифанова и др., 2011].

Материалы и методы исследований. Измерения состава воздуха в МГУ. В Метеорологичес-

кой обсерватории МГУ имени М.В. Ломоносова на Ленинских горах, в юго-западной части Москвы (в 8 км от центра), в феврале 2002 г. начала работать совместная экологическая станция ИФА РАН и географического факультета МГУ. Заметим, что измерения состава воздуха проводились здесь и ранее – с 1955 до 1988 г. на территории обсерватории действовал стационарный пост (до 1970 г. – пост № 13) СЭС Минздрава СССР, впоследствии вошедший в сеть постов ЦВГМО (ныне Центрального УГМС) и ставший совместным постом № 51 СЭС, ЦВГМО и МГУ. Однако измерения в 1950-е и 1960-е гг. ограничивались здесь лишь приземным содержанием SO_2 , пыли и сажевых частиц 2 раза в сутки. Отсутствие значительных источников загрязняющих выбросов вблизи МГУ, открытый характер местности (плато Теплостанской возвышенности) и большая площадь зеленых насаждений определяют сравнительно чистый воздух в этой части города, поэтому содержание SO_2 и сажи здесь часто оказывалось ниже пороговых значений чувствительности тогдашних приборов. Лишь в 2002 г. на созданной экологической станции были установлены серийные газоанализаторы нового поколения, которые регулярно калибруются в соответствии с государственным стандартом [ГОСТ, 1986]. С их помощью в автоматическом режиме производятся ежеминутные измерения даже крайне низких значений содержания малых атмосферных газов: приземного O_3 , NO и SO_2 – вплоть до 1 млрд⁻¹, NO_2 – до 0,5 млрд⁻¹, а CO – до 0,05 млн⁻¹ [Еланский и др., 2006, 2015; Локощенко и др., 2008].

Здесь же, на территории обсерватории, в 70 м от газоанализаторов находятся два акустических локатора (сонара). Вертикальный одноканальный содар «ЭХО-1» (ГДР) работает здесь с 1988 г. и дает очень подробные сведения о температурной стратификации и наличии задерживающих слоев инверсий в слое от 25 до 800 м с разрешением 12,5 м [Локощенко, 2007]. Второй содар «MODOS» («МЕТЕК», Германия) установлен в МГУ в 2004 г., это трехканальный доплеровский локатор, позволяющий непрерывно, в среднем через каждые 10 мин, измерять высотные профили скорости и направления ветра в слое воздуха от 40 до 500 м с разрешением 20 м [Lokoshchenko et al., 2009].

Содарные данные о ветре дополняются стационарными измерениями с помощью анеморумбометра М-63, а также датчика нового автоматизированного метеорологического комплекса (АМК) («R.M. Young Wind Monitor 05103», США) на уровне 15 м над поверхностью земли. Кроме того, в обсерватории проводятся наземные стационарные измерения многих других метеорологических величин, а также ведутся визуальные наблюдения за облачностью и атмосферными явлениями. Столь широкий охват в одном месте одновременных атмосферных наблюдений, включающий измерения состава воздуха, уникален не только для Москвы, но и для всей России. С его созданием впервые открылась возможность очень подробно изучать закономер-

сти накопления загрязняющих примесей и влияния на них метеорологических условий.

Результаты исследований и их обсуждение. Наибольшие уровни загрязнения воздуха в районе МГУ и связанные с ними метеорологические условия. В табл. 1 приведены сводные данные о наибольших и наименьших среднечасовых значениях приземного содержания 5 основных малых газов

табл. 2 видно, что для NO, NO₂ и CO лишь одно самое наибольшее среднечасовое значение (для SO₂ – первые два) резко отличаются от остальных; к пятой же рекордной величине все значения уже приобретают устойчивость. Иначе говоря, уменьшение их в порядке убывания асимптотически приближается к некоторому пределу во всех пяти рядах данных.

Таблица 1

Рекордно высокие и рекордно низкие значения приземного содержания малых атмосферных газов в Москве (МГУ) 2002–2013 гг.

Загрязняющее вещество	Озон O ₃ , млрд ⁻¹	Окись азота NO, млрд ⁻¹	Двуокись азота NO ₂ , млрд ⁻¹	Окись углерода CO, млн ⁻¹	Двуокись серы SO ₂ , млрд ⁻¹
Предельно допустимая концентрация	15 (80)	48 (320)	20,8 (104)	2,6 (4,3)	19 (190)
Максимум-максимум	134,2 (150)	593,5 (996)	214,7 (226)	15,8 (16)	141,6 (276)
Дата и время	06 августа 2010 г., 13 ч	29 марта 2007 г., 08 ч (в 08.00)	07 августа 2010 г., 10 ч (в 10.30)	07 августа 2010 г., 13 ч (в 13.30)	16 февраля 2006 г., 10 ч (в 10.10)
Метеорологические условия	Сильная дымная мгла, ясная погода, неустойчивая стратификация, умеренный ветер	Ясная тихая погода в центре антициклона, очень слабый ветер (~1 м/с в слое до 100 м)	Сильная дымная мгла, ясная погода, неустойчивая стратификация, слабый ветер	Сильная дымная мгла, ясная погода, неустойчивая стратификация, слабый ветер	Морозная малооблачная погода, приподнятая инверсия, слабый ветер
Минимум-минимум	<0,05	<0,05	0,55	0,07	<0,05
Дата и время	1642 ч измерений ниже порога обнаружения	2844 ч измерений ниже порога обнаружения	31 августа 2003 г., 3 ч	25 мая 2003 г., 18 ч	445 ч измерений ниже порога обнаружения

Примечание. Первые значения предельно допустимых концентраций – среднесуточные; в скобках – максимальные разовые. Первые наибольшие значения – в среднем за час; в скобках – в среднем за 10 мин. Время московское.

в районе МГУ с 2002 по 2012 г. (в скобках приведены рекордные 10-минутные значения). В дополнение к этим данным в табл. 2 представлены еще 4 самых больших среднечасовых значения для каждой примеси за 11 лет в порядке их убывания. Рассмотрение их в единой последовательности позволяет оценить, насколько случайным оказался максимум-максимум в ряду соседних значений на краевой области статистического распределения. Из данных

Помимо результатов измерений, в табл. 1 приведены значения предельно допустимых концентраций для всех рассматриваемых примесей [Гигиенические..., 2003, 2005; Руководящие документы 1991, 2006]. Эти концентрации определяются двояко – как среднесуточные (когда вредное воздействие той или иной примеси на организм человека не проявляется сколь угодно долго) и как максимальные разовые. Традиционные измерения на постах сети ЦВГМО

Таблица 2

Первые 5 наибольших среднечасовых значений приземного содержания малых газов в Москве (МГУ) за 2002–2013 гг.

Озон O ₃ , млрд ⁻¹	Окись азота NO, млрд ⁻¹	Двуокись азота NO ₂ , млрд ⁻¹	Окись углерода CO, млн ⁻¹	Двуокись серы SO ₂ , млрд ⁻¹
134,2 (06.08. 2010, 13 ч)	593,5 (29.03. 2007, 08 ч)	214,7 (07.08. 2010, 10 ч)	15,8 (07.08. 2010, 13 ч)	141,6 (16.02. 2006, 10 ч)
133,1 (06.08. 2010, 14 ч)	497,9 (12.02. 2007, 08 ч)	165,4 (07.08. 2010, 09 ч)	14,3 (07.08. 2010, 12 ч)	120,7 (16.02. 2006, 12 ч)
129,5 (30.07. 2002, 16 ч)	452,7 (17.04. 2007, 07 ч)	147,5 (07.08. 2010, 11 ч)	13,8 (07.08. 2010, 14 ч)	64,4 (16.02. 2006, 09 ч)
119,5 (31.07. 2002, 17 ч)	437,3 (29.03. 2007, 07 ч)	122,4 (07.08. 2010, 00 ч)	13,5 (04.08. 2010, 04 ч)	62,1 (08.02. 2006, 16 ч)
118,4 (31.07. 2002, 16 ч)	436,9 (12.02. 2007, 09 ч)	121,3 (07.08. 2010, 12 ч)	13,5 (04.08. 2010, 05 ч)	60,0 (16.02. 2006, 11 ч)

подразумевали соотнесение с максимальными разовыми ПДК единичных измерений с продолжительностью отбора проб 20–30 мин [ГОСТ, 1986], а со среднесуточными ПДК – их среднее значение в течение дня. Накопленный архив данных экологической станции содержит результаты измерений, осредненные за каждый час. Час – промежуток времени, слишком короткий для сравнения со среднесуточной ПДК, но слишком долгий для сравнения с максимальной разовой величиной. Поэтому в дополнение к часовым значениям в табл. 1 приведены также наибольшие значения в среднем за 10 мин.

Как видно из данных табл. 1, и среднесуточные, и максимальные разовые предельно допустимые концентрации были превышены в продолжение 11 лет для всех 5 газов, причем для 4 из них (кроме SO_2) даже среднечасовые значения оказывались иногда выше максимальных разовых ПДК. При этом 3 из 5 малых газов – O_3 , NO_2 и CO – достигли наибольшего содержания в одни и те же дни 6 и 7 августа 2010 г. во время сильной дымной мглы, вызванной лесными и торфяными пожарами в Московском регионе. Такие особые условия исключительно редки и за время существования экологической станции наблюдались лишь дважды – во время аномальной жары летом 2002 и 2010 г. Неслучайно 5 наибольших среднечасовых значений содержания приземного озона представляют, по сути, лишь два случая – 6 августа 2010 и 30–31 июля 2002 г. В эти дни содержание O_3 достигало в отдельные часы 130 млрд⁻¹ и более, а в среднем за 10 минут – даже 150 млрд⁻¹ – аномально больших значений для средних широт, характерных для фотохимического смога в Лос-Анджелесе (США). Для сравнения – столь высокое содержание озона сравнимо с максимальными значениями этой примеси (более 120 млрд⁻¹), отмеченными летом в дневные часы в Афинах (Греция) [Katsoulis, 1988]. Всего же за 11 лет измерений в МГУ все 27 самых наибольших (и 43 из первых 50) среднечасовых значений приземного O_3 были связаны с условиями дымной мглы летом 2002 и 2010 г. Как показано во многих работах, например в [Еланский и др., 2011], основной причиной столь высокого уровня озона при дымной мгле служит дополнительная фотохимическая генерация этого газа в условиях чрезвычайно высокого содержания CO – первичного продукта горения.

Наряду с этим дополнительной причиной накопления озона стал динамический фактор, связанный с интенсивным вертикальным перемешиванием и поступлением к поверхности O_3 из вышележащих слоев. Усилению вертикального турбулентного обмена способствует неустойчивая стратификация, при которой наблюдается умеренный, а иногда и сильный ветер. Как видно на рис. 1, а, б, именно такие условия отмечены в периоды аномально высокого накопления озона у поверхности. На высотновременной развертке эхосигнала (содарной записи) содара «ЭХО-1» на рис. 1, а четко прослеживаются конвективные термики в виде вертикальных турбулентных структур черного цвета, что означает очень

сильный эхосигнал. Такой вид содарной записи объясняется периодическим прохождением над местом зондирования зон восходящих воздушных токов в центре отдельных конвективных ячеек, что подтверждает неустойчивую стратификацию нижней атмосферы [Локощенко, 1995]. Еще один случай аномально высокого содержания озона при сильной дымной мгле, но в уже 2010 г. сопровождался сравнительно сильным ветром, по данным содара «MODOS» – до 10 м/с в 11:00 (рис. 1, б). Значительная скорость ветра также способствует усилению вертикального турбулентного обмена и, как следствие, ускорению нисходящего переноса транзитного озона по направлению к поверхности.

Примечательно, что все 5 наибольших значений содержания O_3 в табл. 2 отмечены в послеполуденные часы при ясной погоде и высоком стоянии Солнца. С одной стороны, в это время поток ультрафиолетовой радиации наибольший, и фотохимические реакции образования озона идут быстрее [Бримблкумб, 1988; Graedel, Crutzen, 1993]. Однако, с другой стороны, прогрев подстилающей поверхности в середине дня также наибольший, что приводит к развитию термической конвекции и дополнительному поступлению к поверхности O_3 из средней и верхней тропосферы. Таким образом, рост содержания приземного озона объясняется совместным действием и химических, и динамических причин. Разделить эти факторы и оценить отдельный вклад каждого из них в общее повышение уровня O_3 трудно. В работе [Lokoshchenko et al., 2004] на основе статистической выборки из 27 случаев косвенно показана существенная роль динамического фактора в изменении приземного содержания озона в утренние часы, поскольку в среднем его увеличение значительно ускорялось вскоре после момента разрушения задерживающего слоя приподнятой инверсии при плавном увеличении потока ультрафиолетовой радиации. В работе [Neu et al., 1994] показано, что в обычных условиях свыше половины (до 70%) всего поступающего к поверхности O_3 в утренние часы связано с его притоком из вышележащих слоев и лишь от 30 до 50% объясняется фотохимическим образованием O_3 вблизи поверхности. Разумеется, при дымной мгле это соотношение может быть иным.

С условиями дымной мглы связаны рекордно высокие значения содержания не только озона, но и окиси углерода. Это вполне естественно, поскольку CO – первичный продукт горения древесины и торфа. Как видно из данных табл. 2, три самых высоких значения этой примеси наблюдались в один и тот же день – 07 августа 2010 г., когда дымная мгла была наиболее сильной. Вообще же со шлейфами пожаров с 04 по 09 августа 2010 г. связано более 30(!) самых больших среднечасовых значений содержания CO за 11 лет в порядке их убывания. Что касается NO_2 , то 6 самых больших среднечасовых значений ее содержания также отмечены 06 и 07 августа 2010 г., и лишь 7-е по счету значение (117,1 млрд⁻¹ в 10:00 30 марта 2007 г.) наблюдалось в отсутствие

дымной мглы. Очевидно, оно было связано с отмеченным накануне абсолютным максимумом содержания NO (с учетом инерции процессов окисления в атмосфере). Отметим, что в крупных городах в средних широтах приземное содержание двуокиси азота бывает и еще больше: так, в Лондоне в 1995 г. оно превысило 400 млрд⁻¹ [Baklanov, 2006].

Предельно высокие значения содержания SO₂, в отличие от O₃, CO и NO₂, напротив, отмечались не летом, а зимой 2006 г. при аномально холодной погоде с 30-градусными морозами, когда в городском отоплении использовалось резервное топливо (мазут) с высоким содержанием серы. В январе и феврале 2006 г. доля мазута составила ~9 и 8% соответственно в общем объеме использованного топлива на теплоэлектроцентралях столицы, что бывает крайне редко. Неудивительно поэтому, что все 5 наибольших значений содержания SO₂ были отмечены в феврале 2006 г., в том числе 4 – в один и тот же день. Вообще первые 31 среднечасовые значения этой примеси в порядке их убывания за 11 лет (и 65 из первых 67) наблюдались именно в эти очень холодные месяцы (с 27 декабря 2005 г. до 01 марта 2006 г.).

Дополнительной причиной рекордно высоких значений содержания SO₂, помимо сжигания мазута, было абсолютное преобладание устойчивой стратификации нижней атмосферы (наличие длительных приземных и приподнятых инверсий) и крайне слабый ветер в условиях господствовавших отрогов сибирского максимума, а также медленное окисление SO₂ в атмосфере при крайне низкой температуре воздуха (вплоть до -30,1 °C 18 января 2006 г.). Однако даже на фоне таких условий превышение максимальной разовой ПДК для двуокиси серы в течение 40 мин подряд утром 16 февраля [Локощенко и др., 2008] кажется удивительным. Скорее всего, в эти часы в районе МГУ произошло опускание свежего факела выбросов от одной из городских ТЭЦ.

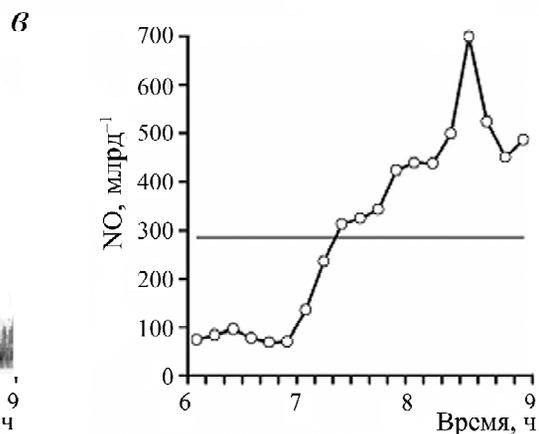
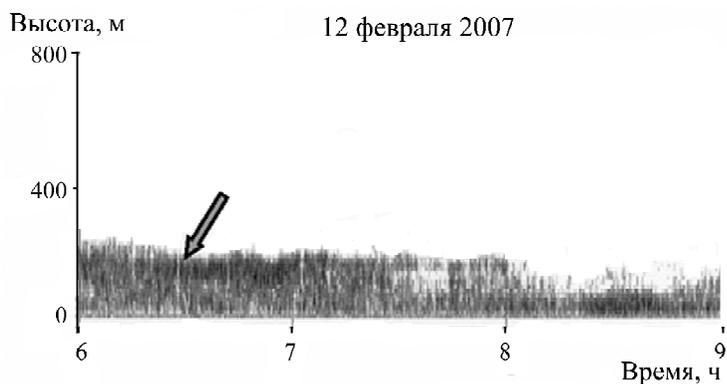
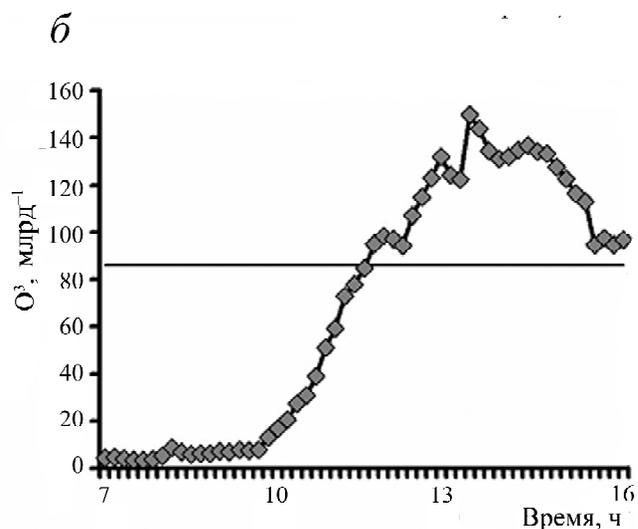
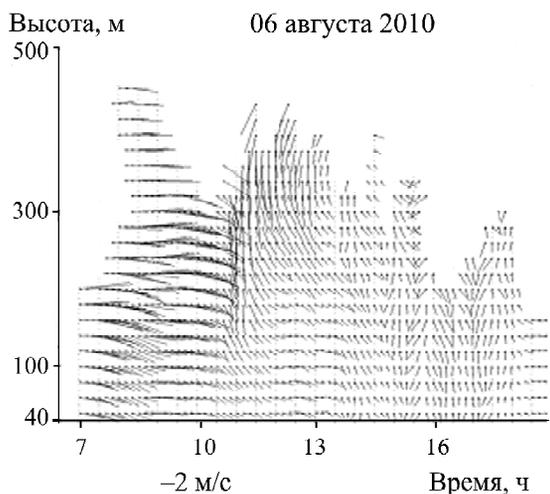
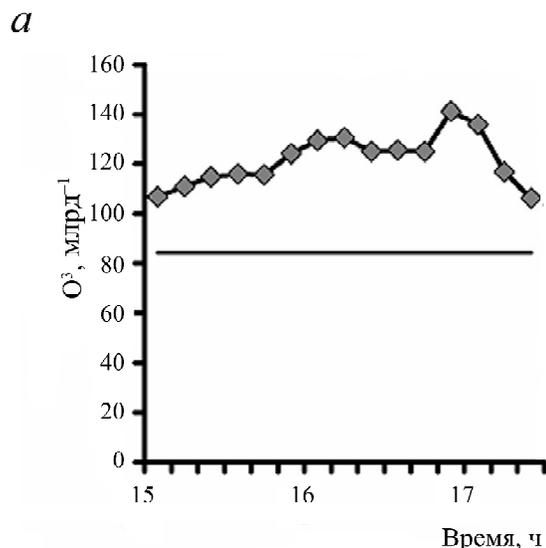
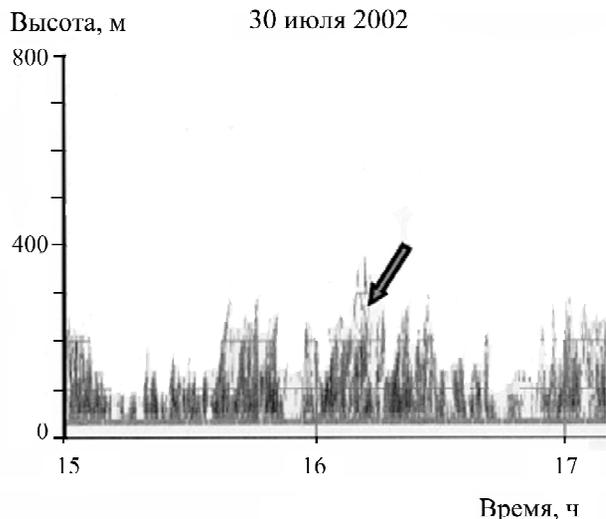
В пользу такого предположения говорит наличие по данным содара «ЭХО-1» приподнятой инверсии утром 16 февраля (рис. 1, д), а также то, что очень высокие значения содержания SO₂ (>50 млрд⁻¹) отмечались непрерывно в продолжение 3,5 часов. Как известно, задерживающий слой приподнятой инверсии способствует накоплению выбросов от источников на нижележащих высотах. Утром в этот день с 9 до 10 ч, в начале эпизода аномального загрязнения, высота вершины инверсии менялась по содарным данным от 160 до 230 м, что выше большинства труб городских ТЭЦ. Умеренный ветер в этом слое (от 2 до 4 м/с по данным содара «MODOS») также мог способствовать переносу шлейфа выбросов от ТЭЦ в радиусе нескольких километров. Однако нельзя полностью исключить и влияние в эти часы какого-то локального источника горения в непосредственной близости от обсерватории. Заметим для сравнения, что, например, в Трабзоне (Турция) наибольшее за несколько лет приземное содержание SO₂ составило в 1995 г. ~70 млрд⁻¹

[Cuhadaroglu, Demirci, 1997], что в 2 раза меньше значения, отмеченного в Москве 16 февраля 2006 г. В то же время в Афинах (Греция) случаи сильного загрязнения воздуха с содержанием этой примеси более 250 мкг/м³ (т.е. с учетом среднегодовой температуры +18,5 °C более 93 млрд⁻¹) отмечались за 15 лет – с 1970 по 1984 гг. – 343(!) раза [Katsoulis, 1988].

Если рекордно высокие уровни содержания приземного озона всегда наблюдаются в послеполуночные часы, то для двуокиси серы, как видно из данных табл. 2, четко выраженной зависимости от времени суток нет. Аномально высокое содержание окиси углерода также может отмечаться в любые часы, поскольку в основном определяется лишь наличием сильной дымной мглы, содержащей этот газ. Для окиси же азота самые большие значения отмечены утром, что связано с утренним часом пик движения автомобильного транспорта. Накоплению этой примеси в приземном слое способствует приземная инверсия (пример ее наблюдения в структуре мелкомасштабной турбулентности по данным содара «ЭХО-1» приведен на рис. 1, в), а также штиль или очень слабый ветер. Так, в 8:00 29 марта 2007 г., когда было отмечено самое большое за 11 лет содержание NO (почти 1000 млрд⁻¹), скорость ветра во всем нижнем 100-метровом слое воздуха была по данным содара «MODOS» <1 м/с (рис. 1, з).

В целом за 11 лет наблюдений в МГУ максимальные разовые ПДК были превышены для озона в течение 107 ч, что составляет 0,12% всего времени измерений; для окиси и двуокиси азота – в течение 64 и 22 ч соответственно (0,08 и 0,03%); для окиси углерода – в течение 142 ч (0,16%). Соотнесение с максимальными разовыми ПДК среднечасовых значений не совсем точное, однако отдельные 10-минутные значения, превысившие ПДК в часы с меньшими средними значениями, в значительной мере компенсируются, напротив, 10-минутными значениями ниже ПДК в часы, когда в среднем за час они превышали предельно допустимый уровень. Таким образом, если приведенные на основе часовых данных оценки доли времени с превышением ПДК и занижены, то незначительно. Что касается двуокиси серы, то максимальная разовая ПДК за все 9 лет измерений (содержание SO₂ измеряется с 2004 г.) была превышена в течение только 40 мин, так что доля этого времени в общей выборке всех измерений ничтожно мала – лишь 0,001%.

Наименьшие уровни загрязнения воздуха в районе МГУ и общие закономерности их повторяемости. Как видно из данных табл. 1, трем малым газам в воздушном бассейне Москвы – озону, окиси азота и двуокиси серы – нередко присущи предельно низкие значения их содержания, которые выходят за пределы чувствительности даже современных газоанализаторов. При значениях ниже порога обнаружения приборы формально регистрируют нулевое содержание, хотя очевидно, что в реальности оно может принимать любое значение, например для озона, в промежутке от 0 до 1 млрд⁻¹. Однако поро-



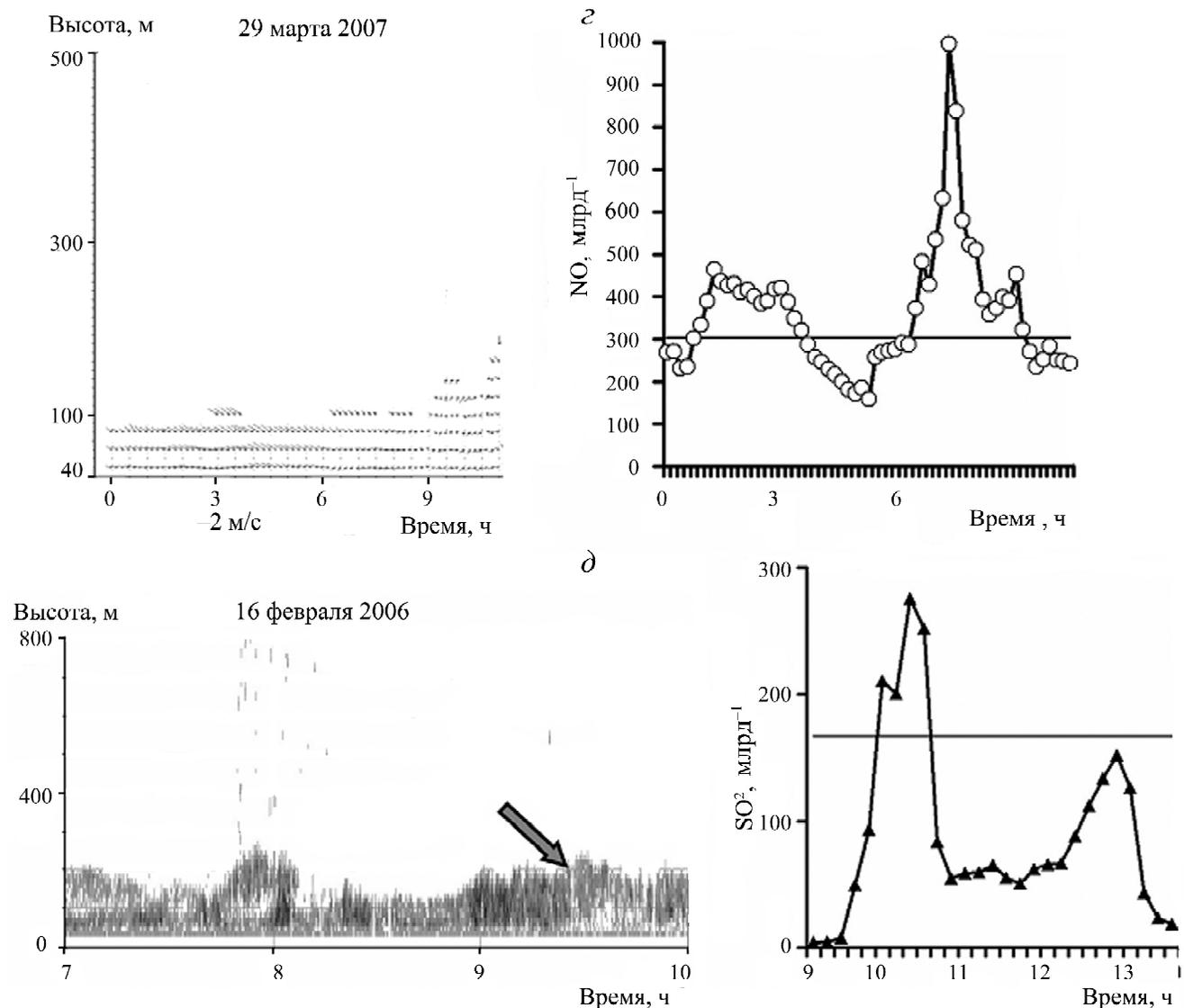


Рис. 1. Содарные данные о температурной стратификации и ветровом режиме в МГУ в часы anomalously высокого загрязнения воздуха
a – 30 июля 2002 г., слева – фрагмент записи содара «ЭХО-1», неустойчивая стратификация (стрелкой показан один из конвективных термиков), справа – приземное содержание озона. Время летнее, $T = +31\text{ }^{\circ}\text{C}$, $P = 1000\text{ гПа}$, $\text{ПДК}_{\text{max}} = 84\text{ млрд}^{-1}$
б – 06 августа 2010 г., слева – фрагмент высотно-временной развертки данных о ветре содара «MODOS», сильный ветер. Внизу указан масштаб (длина стрелки соответствует скорости ветра, м/с); справа – приземное содержание озона. Время летнее, $T = +36\text{ }^{\circ}\text{C}$; $P = 998\text{ гПа}$; $\text{ПДК}_{\text{max}} = 86\text{ млрд}^{-1}$
в – 12 февраля 2007 г., слева – фрагмент записи содара «ЭХО-1», приземная инверсия (стрелкой показана вершина турбулентной структуры слоя инверсии), справа – приземное содержание окиси азота. Время зимнее, $T = -17\text{ }^{\circ}\text{C}$; $P = 1001\text{ гПа}$; $\text{ПДК}_{\text{max}} = 284\text{ млрд}^{-1}$
г – 29 марта 2007 г., слева – фрагмент высотно-временной развертки данных о ветре содара «MODOS», ветер слабый, близкий к условиям штиля, внизу указан масштаб (длина стрелки соответствует скорости ветра, м/с), справа – приземное содержание окиси азота. Время зимнее, $T = +3\text{ }^{\circ}\text{C}$; $P = 1004\text{ гПа}$; $\text{ПДК}_{\text{max}} = 305\text{ млрд}^{-1}$
д – 16 февраля 2006 г., слева – фрагмент записи содара «ЭХО-1», приподнятая инверсия (стрелкой показана вершина связанной с ней турбулентной структуры), время зимнее, $T = -14\text{ }^{\circ}\text{C}$; $P = 1001\text{ гПа}$; $\text{ПДК}_{\text{max}} = 168\text{ млрд}^{-1}$.
 Справа везде горизонтальными линиями показаны значения максимальной разовой ПДК_{max} , рассчитанные в объемных единицах с учетом температуры воздуха и атмосферного давления в часы anomalously высокого уровня загрязнения

Fig. 1. Sodar data about thermal stratification and wind profiles near the Moscow University during the anomalously high air pollution:
a – July 30, 2002, left – fragment of «ECHO-1» sodar record, unstable stratification (arrow indicates a convective plume), right – ground concentration of ozone. Summer time, $T = +31\text{ }^{\circ}\text{C}$, $P = 1000\text{ hPa}$, $\text{MAC} = 84\text{ ppb}$; *b* – August 06, 2010, left – fragment of the altitude-time base of the «MODOS» sodar wind data, strong wind (length of arrows below shows the wind velocity, m/s), right – ground concentration of ozone. Summer time, $T = +36\text{ }^{\circ}\text{C}$; $P = 998\text{ hPa}$; $\text{MAC} = 86\text{ ppb}$; *в* – February 12, 2007, left – fragment of «ECHO-1» sodar record, surface inversion (arrow indicates the top of a turbulent structure in the inversion layer), right – ground concentration of nitrogen oxide. Winter time, $T = -17\text{ }^{\circ}\text{C}$; $P = 1001\text{ hPa}$; $\text{MAC} = 284\text{ ppb}$; *г* – March 29, 2007, left – fragment of the altitude-time base of the «MODOS» sodar wind data, light wind close to calm (length of arrows below shows the wind velocity, m/s), right – ground concentration of nitrogen oxide. Winter time, $T = +3\text{ }^{\circ}\text{C}$; $P = 1004\text{ hPa}$; $\text{MAC} = 305\text{ ppb}$; *д* – February 16, 2006, left – fragment of «ECHO-1» sodar record, elevated inversion (arrow indicates the top of a turbulent structure), right – ground concentration of sulfur dioxide. Winter time, $T = -14\text{ }^{\circ}\text{C}$; $P = 1001\text{ hPa}$; $\text{MAC} = 168\text{ ppb}$.

Horizontal lines on right graphs are for maximum acceptable one-time concentrations calculated in volume units with account of air temperature and atmospheric pressure during the anomalously high air pollution episodes

говые значения относятся к единичным минутным измерениям. В среднем же за час наименьшим содержанием озона, окислов азота и двуокиси серы при усреднении по выборке из 60 значений в архиве данных экологической станции служит значение $0,1 \text{ млрд}^{-1}$, поскольку программа обработки осуществляет округление до десятых долей млрд^{-1} . Поскольку точные законы распределения содержания этих газов нам неизвестны, то можно предположить, что вероятность любого значения в промежутке от 0 до $0,1 \text{ млрд}^{-1}$ одинакова. Следовательно, формально нулевые среднечасовые значения в базе данных фактически означают содержание $<0,05 \text{ млрд}^{-1}$, т.е. менее середины этого промежутка.

Содержание приземного O_3 и NO за первые 9 лет измерений с февраля 2002 по сентябрь 2010 г. оказывалось $<0,05 \text{ млрд}^{-1}$ в продолжение 1234 и 2464 ч соответственно, а SO_2 – с января 2004 по сентябрь 2010 г. – 198 ч (в табл. 1 приведены дополненные данные за все 11 лет). Таким образом, повторяемость предельно малых значений составляет около 2% для озона, ~3% для окиси азота и <1% для двуокиси серы в общей выборке всех измерений.

Поскольку накоплены уже большие выборки данных о предельно малом содержании 3 из 5 рассматриваемых газов (O_3 , NO и SO_2), на данном этапе измерений открылась возможность впервые исследовать суточный и годовой ход повторяемости их предельно низких значений и выявить статистически достоверные закономерности.

Как видно на рис. 2, суточный ход предельно малых ($<0,05 \text{ млрд}^{-1}$) значений содержания O_3 и NO представляет собой функции, близкие к синусоиде. Наиболее часто близкие к нулю значения содержания приземного озона наблюдаются вечером и в начале ночи. Затем повторяемость их уменьшается, особенно быстро утром – с 7:00 до 9:00 вследствие, очевидно, разрушения задерживающего слоя

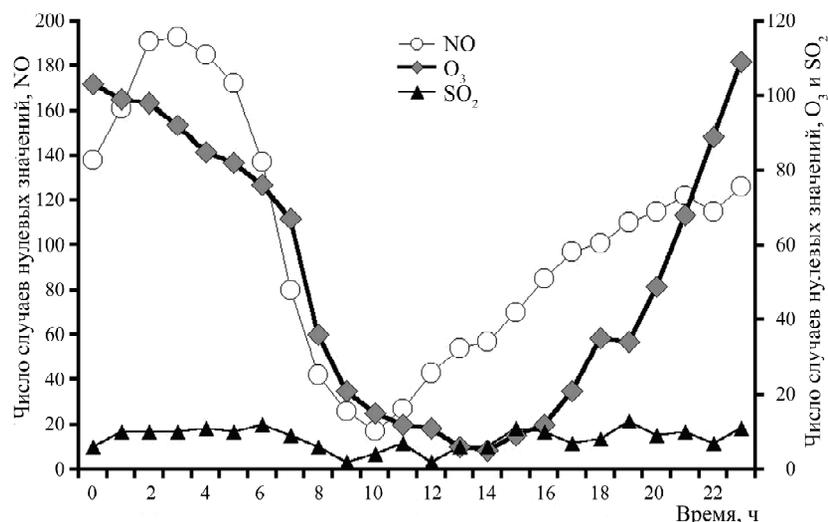


Рис. 2. Суточный ход повторяемостей предельно низких значений приземного содержания малых атмосферных газов в Москве за 2002–2010 гг.

Fig. 2. Diurnal variation of occurrence probability of extremely low surface concentrations of minor air gases in Moscow for the period of 2002–2010

приземной инверсии, а также начала фотохимического образования O_3 . Реже всего содержание приземного озона $<0,05 \text{ млрд}^{-1}$ отмечается в послеполуденные часы, что вполне естественно с учетом основного дневного максимума в суточном ходе этой примеси в теплое и переходное время года [Еланский и др., 2006, 2015]. В 13:00 и 14:00 столь малые значения O_3 были отмечены за неполные 9 лет лишь 6 и 5 раз соответственно. Таким образом, повторяемость близкого к нулю содержания приземного озона составляет в середине дня ~0,4–0,5% от общего числа его предельно малых значений, что на целый порядок меньше, чем в среднем за каждый час суток – 4,17%. По отношению же ко всем измерениям O_3 в дневные часы доля его предельно малых значений составляет лишь 0,2% (всего в 13:00 и в 14:00 вплоть до октября 2010 г. получено 2812 часовых значений).

Предельно малое содержание NO также чаще отмечается в темное время суток, однако максимум повторяемости значений $<0,05 \text{ млрд}^{-1}$ смещен по сравнению с O_3 вперед на середину ночи – с 2:00 до 4:00 (когда интенсивность автомобильного движения наименьшая). Минимум же, напротив, смещен в суточном ходе назад на утренние часы, что связано с часом пик автомобильного движения и частым существованием в это время приподнятой инверсии. Как следствие, приземное содержание NO утром почти никогда не бывает столь малым. Повторяемость же предельно низких уровней содержания SO_2 приблизительно одинаковая в любое время суток.

Изменения повторяемости почти нулевых значений отдельных малых газов в годовом ходе (рис. 3) выражены значительно слабее. Тем не менее отмечено более частое наблюдение предельно малого содержания O_3 летом и в начале осени, по видимому, в ночные часы в условиях сильных в это время приземных инверсий, препятствующих посту

плению озона к поверхности из вышележащих слоев. Случаи близкого к нулю содержания SO_2 почти всегда отмечаются также летом и в начале осени, когда интенсивность выбросов этого газа из высоких источников наименьшая. Наконец, почти полное отсутствие в приземном слое воздуха NO чаще наблюдается зимой и весной и реже летом.

Что касается окиси углерода и двуокиси азота, то ни одно из среднечасовых значений их приземного содержания за 11 лет наблюдений не оказалось ниже порога обнаружения. Наименьшее из достоверных значений CO составило $0,068 \text{ млн}^{-1}$ в 18:00 25 мая 2003 г., причем два следующих в порядке возрастания значения ($0,070$ и $0,075 \text{ млн}^{-1}$) зафиксированы в тот же и на следующий день (в 2:00 26 мая и в 17:00 25 мая соответствен-

но). Правда, в 00:00 13 февраля 2003 г. его содержание оказалось еще меньше (0,051 млн⁻¹), но достоверность этих данных сомнительна, поскольку в течение часа было получено лишь одно минутное значение. Самое же наименьшее значение в среднем за минуту – 0,050 млн⁻¹, оно отмечено в 18:12 25 мая 2003 г. и совпадает с приборным порогом обнаружения этого газа. По данным содара «ЭХО-1», работавшего в тот день в Обнинске, на 100 км южнее Москвы, в период с 15:00 до 19:00 отмечалась неустойчивая стратификация (обычно пространственное поле температурной стратификации в середине дня в открытой местности однородно на больших расстояниях). Связанная с атмосферной неустойчивостью термическая конвекция способствует рассеиванию примесей в вышележащие слои и уменьшению приземного содержания всех малых газов кроме озона.

Довольно интенсивное вертикальное перемешивание при отсутствии приземной инверсии наблюдалось в МГУ по данным содара «ЭХО-1» и ночью 31 августа 2003 г., когда было отмечено рекордно низкое за 11 лет наблюдений приземное содержание двуокиси азота. Скорость ветра на высоте 15 м в МГУ по данным прибора М-63 в обоих случаях была высокой: 4 м/с (в порывах до 7 м/с) днем 25 мая и 5 м/с (в порывах до 11 м/с) ночью 31 августа. Таким образом, температурная стратификация и ветровой режим в значительной мере определяют условия не только накопления, но и рассеивания загрязняющих атмосферных примесей.

Выводы:

– состояние воздушного бассейна столицы в районах, удаленных от локальных источников выбросов и с большой площадью зеленых насаждений (территория МГУ), характеризуется крайне редкими эпизодами повышенного загрязнения воздуха. В среднем за последние 11 лет доля времени с превышением в среднем за час максимальных разовых ПДК составляет здесь порядка 0,1% для озона, окиси азота и окиси углерода, порядка 0,01% для двуокиси азота и, по данным в среднем за 10 мин, лишь 0,001% для двуокиси серы. Как правило, случаи превышения ПДК связаны с ярко выраженными

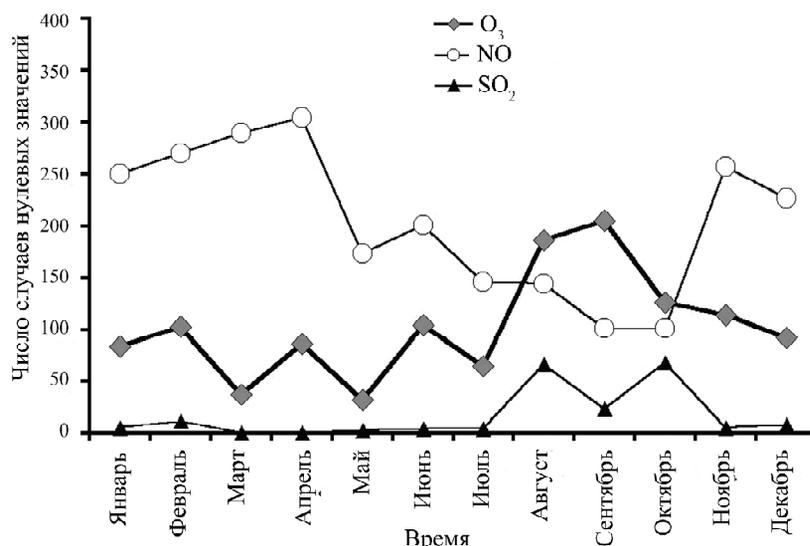


Рис. 3. Годовой ход повторяемости предельно низких значений приземного содержания малых атмосферных газов в Москве за 2002–2010 гг.

Fig. 3. Annual variation of occurrence probability of extremely low surface concentrations of minor air gases in Moscow for the period of 2002–2010

и длительными антициклональными условиями. При этом аномально высокие уровни накопления O₃, NO₂ и CO отмечаются в большинстве случаев при сильной дымной мгле в условиях крайне жаркого лета; SO₂, наоборот, – в очень морозную погоду зимой при сжигании мазута на объектах городского отопления;

– в суточном ходе аномально высокое содержание озона отмечается обычно в середине дня, окиси азота – в утренние часы во время часа пик городского транспорта. Для NO, NO₂ и CO явной зависимости от времени суток нет;

– накоплению высоких уровней содержания озона, как правило, способствует неустойчивая стратификация, а также умеренный или сильный ветер в нижней атмосфере по содарным данным. Напротив, эпизоды аномально высокого загрязнения окисью азота обычно связаны со штилевыми условиями и наличием приземной инверсии, а двуокисью серы – с наличием приподнятой инверсии на небольшой высоте и при умеренном ветре;

– приземное содержание O₃ в Москве бывает близким к нулю чаще всего в начале ночи, NO – в середине ночи, для SO₂ однозначной зависимости от времени суток нет. В годовом ходе предельно малые значения содержания озона чаще наблюдаются зимой и весной, окиси азота и двуокиси серы – летом и осенью.

Благодарности. Работа выполнена за счет гранта РФФИ (проект № 14-05-00594), а также Российского научного фонда (проект № 16-17-10275) в части уточнения оценок предельных значений содержания газов. Измерения состава воздуха проведены при частичной поддержке Министерства образования и науки РФ (Государственный контракт № 14.515.11.0004).

Авторы благодарят за помощь своих сослуживцев – сотрудников метеорологической обсерватории МГУ и ИФА РАН, а также Г.Ю. Шайдуллину за предоставление данных о выбросах объектами городского отопления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Безуглая Э.Ю. Метеорологический потенциал и климатические особенности загрязнения воздуха городов. Л.: ГМИ, 1980.
- Бримблжумб П. Состав и химия атмосферы. М.: Мир, 1988.
- Гигиенические нормативы ГН 2.1.6.1338-03. Предельно допустимые концентрации загрязняющих веществ в воздухе населенных мест. М., 2003.
- Гигиенические нормативы ГН 2.1.6.1983-05. Предельно допустимые концентрации загрязняющих веществ в воздухе населенных мест. Дополнения и изменения № 2 к ГН 2.1.6.1338-03. М., 2005.
- ГОСТ 17.2.3.01 – 86 – Межгосударственный стандарт. Охрана природы. Атмосфера. Правила контроля качества воздуха населенных пунктов. М.: Госкомитет СССР по стандартам, 1986.
- Еланский Н.Ф., Локощенко М.А., Сарана Н.Н. и др. О суточном и годовом ходе загрязнения воздуха в Москве // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2006. № 1. С. 29–35.
- Еланский Н.Ф., Локощенко М.А., Трифанова А.В. и др. О содержании малых газовых примесей в приземном слое атмосферы над Москвой // Изв. РАН. Сер. Физика атмосферы и океана. 2015. Т. 51, № 1. С. 39–51.
- Еланский Н.Ф., Мохов И.И., Беликов И.Б. и др. Газовые примеси в атмосфере над Москвой летом 2010 г. // Изв. РАН. Сер. Физика атмосферы и океана. 2011. Т. 47, № 6. С. 1–10.
- Локощенко М.А. О содарных наблюдениях свободной конвекции // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 1995. № 4. С. 43–51.
- Локощенко М.А. Температурная стратификация нижней атмосферы в Москве // Метеорология и гидрология. 2007. Т. 32, № 1. С. 53–64.
- 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.
- Обзор загрязнения природной среды в Российской Федерации за 2005 год. М.: Росгидромет, 2006. 192 с.
- Руководящий документ РД 52.04.186-89. Руководство по контролю загрязнения атмосферы. Государственный комитет по гидрометеорологии, Министерство здравоохранения СССР. М., 1991.
- Руководящий документ РД 52.04.667-2005. Документы о состоянии загрязнения атмосферы в городах для информирования государственных органов, общественности и населения. М.: Росгидромет РФ, 2006.
- Трифанова А.В., Локощенко М.А., Еланский Н.Ф. Предельные значения приземного содержания малых атмосферных газов в Москве и условия их наблюдений // Тез. докл. XV Всеросс. школы-конференции молодых ученых «Состав атмосферы. Атмосферное электричество. Климатические процессы», Борок, 30 мая–4 июня 2011 г. Борок: Геофизическая обсерватория «Борок» ИФЗ РАН, 2011. С. 56–57.
- Baklanov A. Overview of the European project FUMAREX // Atmospheric Chem. and Physics. 2006. Vol. 6. P. 2005–2015.
- Cuhadaroglu B., Demirci E. Influence of some meteorological factors on air pollution in Trabzon city // Energy and Buildings. 1997. Vol. 25. P. 179–184.
- Graedel T.E., Crutzen P.J. Atmospheric change: an Earth system perspective. N.Y.: W.H. Freeman and Company, 1993.
- Katsoulis B.D. Some meteorological aspects of air pollution in Athens, Greece // Meteorol. and Atmospheric Physics. 1988. Vol. 39. P. 203–212.
- Lokoshchenko M.A., Elansky N.Ph., Semenova N.V. Influence of thermal stratification on morning growth of surface ozone. In: Proceedings of the 12th International Symposium on Acoustic Remote Sensing and Associated Techniques of the Atmosphere and Oceans. Clare College. Cambridge: Addendum, 2004. P. 27–30.
- Lokoshchenko M.A., Yavlyayeva E.A., Kirtzel H.-J. Sodar data about wind profiles in Moscow city // Meteorologische Zeitschrift. 2009. Vol. 18, N 3. P. 321–330.
- Molina L.T., Kolb C.E., de Foy B. et al. Air quality in North America's most populous city // overview of the MCMA-2003 campaign // Atmospheric Chemistry and Physics, 2007. Vol. 7. P. 2447–2473.
- Neu Ur., Kunzle T., Wanner H. On the relation between ozone storage in the residual layer and daily variation in near-surface ozone concentration – a case study // Boundary-Layer Meteorology. 1994. Vol. 69, Iss. 3. P. 221–247.

Поступила в редакцию 30.12.2015
Принята к публикации 28.04.2016

**M. A. Lokoshchenko¹, N. F. Elansky², A. V. Trifanova³,
I. B. Belikov⁴, A. I. Skorokhod⁵**

ABOUT EXTREME LEVELS OF AIR POLLUTION IN MOSCOW

According to continuous 11 years-long measurements (2002–2012) at the joint ecological station of the A.M. Obukhov IAP RAS and the MSU Faculty of Geography data on the upper and lower limits of the surface concentrations of minor atmospheric gases (ozone, nitrogen oxide and dioxide, carbon monoxide and sulfur dioxide) are provided. It is shown that around the MSU, in the southwestern part of Moscow, far from production enterprises and large highways, maximum allowable concentrations are very rarely exceeded: such cases account for about 0,1% for O₃, NO and CO; 0,01% for NO₂ and 0,001% for SO₂. The highest average 10 min concentrations were 150 ppb for ozone; 996 and 226 ppb for NO and NO₂ respectively; 16 ppm for CO; and 276 ppb for SO₂. Anomalously high air pollution is usually characteristic of long-lasting anti-cyclonic conditions. The highest concentrations of O₃, NO₂ and CO were recorded in 2010 and 2002 summers during a smoky haze in extraordinary hot weather; while on the contrary, those of SO₂ occurred during the deep freeze in 2006 winter. The data of «ECHO-1» and «MODOS» sodars allowed correlating the record-breaking high levels of air pollution with both temperature stratification and wind

¹ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Meteorology and Climatology, Leading Research Scientist, PhD. in Geography, Associate Professor; *e-mail*: loko@geogr.msu.ru

² A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics, Head of the Department of atmosphere structure research, Corresponding member of RAS, D.Sc. in Physics and Mathematics, Professor; *e-mail*: n.f.elansky@mail.ru

³ University «Dubna», Department of Ecology and Earth Sciences, post-graduate student; *e-mail*: triav@yandex.ru

⁴ A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics, Laboratory of atmosphere gas impurities, Senior Research Scientist, PhD. in Physics and Mathematics; *e-mail*: belikov@ifaran.ru

⁵ A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics, Head of the Laboratory of atmosphere gas impurities, PhD. in Geography; *e-mail*: skorokhod@ifaran.ru

regime of the lower atmosphere. For the first time regularities of diurnal and annual variations of extremely low (near-zero) surface concentrations of O_3 , NO and SO_2 are revealed according to the long-term data.

Key words: air pollution, minor atmospheric gases, ground concentrations, smoky haze, temperature stratification, wind regime, sodar data.

Acknowledgements. The study was financially supported by the Russian Foundation for Basic Research (project N 14-05-00594) and the Russian Scientific Foundation (project N 16-17-10275, updating extreme values of gas concentrations). Measurements of air composition were partially supported by the RF Ministry of Education and Science (State contract N 14.515.11.0004).

Authors are grateful to their colleagues from the MSU meteorological observatory and the IAP RAS for their assistance and to G.Yu. Shaidullina for providing data on emissions from the urban heating facilities.

REFERENCES

- Baklanov A.* Overview of the European project FUMAREX // Atmospheric Chem. and Physics. 2006. Vol. 6. P. 2005–2015.
- Bezulgaya E.Yu.* Meteorologicheskii potentsial i klimaticheskie osobennosti zagryazneniya gorodov. [Meteorological Potential and climatic features of urban air pollution], Leningrad, Gidrometeoizdat, 1980 (in Russian).
- Brimblecombe P.* Sostav i khimiya atmosfery [Air composition and Chemistry], Cambridge University Press, 1986; Mir, Moscow, 1988.
- Cuhadaroglu B., Demirci E.* Influence of some meteorological factors on air pollution in Trabzon city // Energy and Buildings. 1997. Vol. 25. P. 179–184.
- Elansky N.F., Lokoshchenko M.A., Sarana N.N.* et al. O sutochnom i godovom khode zagryazneniya vozdukh v Moskve. [On daily and annual courses of air pollution in Moscow], Vestnik Moskovskogo universiteta, Series 5, Geography, 2006, no 1, pp. 29–35 (in Russian).
- Elansky N.F., Lokoshchenko M.A., Trifanova A. V.* et al. O sodержanii malykh gazovykh primesey v prizemnon sloye atmosfery nad Moskvoy [On Contents of trace gases in the atmospheric surface layer over Moscow], Izvestiya AN, Fizika Atmosfery y Oceana, 2015. Vol. 51, no 1, pp. 30–41 (in Russian).
- Elansky N.F., Mokhov I.I., Belikov I. B.* et al. Gazovye primesi v atmosfere nad Moskvoy letom 2010 g. [Gaseous admixtures in the atmosphere y Oceana over Moscow during the 2010 summer]. Izvestiya, AN. Atmosfery i Oceana, 2011. Vol. 47, no 6, pp. 672–681 (in Russian).
- GOST 17.2.3.01-86 – Mezhgosudarstvennyi standart. Okhrana prirody. Atmosfera. Pravila kontrolya kachestva vozdukh naselyonnykh punktov. Goskomitet SSSR po standartam [GOST 17.2.3.01-86. Environmental Protection. Atmospheric air. Residential air quality control regulations. USSR State Committee of Standards], Moscow, 1986 (in Russian).
- Gigienicheskie normativy GN 2.1.6.1338-03. Predel'no dopustimye kontsentratsii zagryaznyayushchikh veshchestv v vozdukh naselyonnykh mest. Dopolneniya i izmeneniya N 2 k GN 2/1/6/1338-03 [Hygienic standards HS 2.1.6.1338-03. Maximum allowable concentrations of pollutants in the air of populated areas], M.: 2003 (in Russian).
- Gigienicheskie normativy GN 2.1.6.1983-05. Predel'no dopustimye kontsentratsii zagryaznyayushchikh veshchestv v vozdukh naselyonnykh mest. Dopolneniya i izmeneniya N 2 k GN 2.1.6.1338-03 [Hygienic standards HS 2.1.6.1983-05. Maximum allowable concentrations of pollutants in the air of populated areas. Additions and alterations. N 2 to HS 2.1.6.1338-03]. Moscow, 2005 (in Russian).
- Graedel T.E., Crutzen P.J.* Atmospheric change: an Earth system perspective. N.Y.: W.H. Freeman and Company, 1993.
- Katsoulis B.D.* Some meteorological aspects of air pollution in Athens, Greece // Meteorol. and Atmospheric Physics. 1988. Vol. 39. P. 203–212.
- Lokoshchenko M.A.* O sodarnykh nablyudeniyakh svobodnoi konveksii. [Sodar observations of free convection], Vestnik of the Moskovskogo Universiteta, Series 5, Geography, 1995, no 4, pp. 43–51 (in Russian).
- Lokoshchenko M.A.* Temperaturnaya stratifikatsiya nizhnay atmosfery v Moskve [Temperature stratification of the lower atmosphere over Moscow. Russian Meteorology and Hydrology], 2007. Vol. 32, no 1, pp. 35–42 (in Russian).
- Lokoshchenko M.A., Elansky N.F., Malyashova V.P., Trifanova A.V.* Dinamika prizemnogo sodержaniya dvyokisi sery v Moskve [Dynamics of sulfur dioxide surface concentration in Moscow. Optika atmosfery i okeana], 2008. Vol. 21, no 5, pp. 384–391 (in Russian).
- Lokoshchenko M.A., Elansky N.Ph., Semenova N.V.* Influence of thermal stratification on morning growth of surface ozone // Proceed. of the 12th Intern. Symp. on Acoustic Remote Sensing and Associated Techniques of the Atmosphere and Oceans. Clare College. Cambridge, the United Kingdom, 2004, Addendum. P. 27–30.
- Lokoshchenko M.A., Yavlyaeva E.A., Kirtzel H.-J.* Sodar data about wind profiles in Moscow city // Meteorologische Zeitschrift. 2009. Vol. 18. N 3. P. 321–330.
- Molina L.T., Kolb C.E., de Foy B.* et al. Air quality in North America's most populous city // overview of the MCMA-2003 campaign. Atmospheric Chemistry and Physics, 2007. Vol. 7. P. 2447–2473.
- Neu Ur., Kunzle T., Wanner H.* On the relation between ozone storage in the residual layer and daily variation in near-surface ozone concentration – a case study. Boundary-Layer Meteorology, May 1994. Vol. 69, Iss. 3. P. 221–247.
- Obzor zagryazneniya prirodnoy sredy v Rossiyskoy Federatsii za 2005 god. [Review of environmental pollution in Russian Federation for 2005. M.: Russian Hydrometeorological Service], 2006, 192 p. (in Russian).
- Rukovodyashchiy dokument RD 52.04.186-89. Rukovodstvo po kontrolyu zagryazneniya atmosfery. Gosudarstvennyi komitet po gidrometeorologii, Ministerstvo zdravookhraneniya SSSR [Guidance document GD 52.04.186-89. Control guide for air pollution. State Hydrometeorological service, USSR Ministry of Health]. Moscow, 1991 (in Russian).
- Rukovodyashchiy dokument RD 52.04.667-2005. Dokumenty o sostoyanii zagryazneniya atmosfery v gorodakh dlya informirovaniya gosudarstvennykh organov, obshchestvennosti i naseleniya [Guidance document GD 52.04.667-2005. Documents about air pollution state in cities to inform public authorities, public and population. M.: Russian Hydrometeorological Service], 2006 (in Russian).
- Trifanova A.V., Lokoshchenko M.A., Elansky N.F.* Predel'nye znacheniya prizemnogo sodержaniya malykh atmosfernykh gazov v Moskve i usloviya ikh nablyudeniya. Tezisy dokladov XV Vseross. shkoly-konferentsii molodykh uchyonykh «Sostav atmosfery. Atmosfernoye elektrichestvo. Klimaticheskiye protsessy» [Extreme values of the minor air gases' surface content and conditions of their observations. Proceedings of the 15th All-Russian scientific school-conference of young scientists «Atmospheric Structure. Atmospheric Electricity. Climatic Process»], Borok, 2011, pp. 56–57 (in Russian).

Received 30.12.2015

Accepted 28.04.2016