

М.А. Локощенко¹, Н.Ф. Еланский², В.П. Маляшова³, А.В. Трифанова⁴

Динамика приземного содержания двуокиси серы в Москве

¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,

²Институт физики атмосферы имени А.М. Обухова РАН,

³РХТУ имени Д.И. Менделеева, г. Москва

⁴Международный университет «Дубна», г. Дубна

Поступила в редакцию 8.02.2008 г.

Исследована изменчивость во времени приземного содержания двуокиси серы в Москве. Использованы два источника данных: многолетние измерения на постах Минздрава и Росгидромета с 1957 г. и автоматические ежеминутные измерения на экологической станции ИФА РАН и географического факультета МГУ за период 2004–2007 гг. За последние полвека содержание SO_2 в Москве резко уменьшилось и приблизилось к фоновым значениям. Наибольшие величины отмечаются зимой, наименьшие – летом и осенью. Суточный ход SO_2 характеризуется утренним максимумом весной и летом, вероятно связанным с частыми в это время приподнятыми инверсиями. Осенью максимум охватывает также и дневные часы. Разброс отдельных среднемесячных значений зимой существенно больше по сравнению с остальными сезонами. Выявлена резкая асимметрия в условиях переходных сезонов (весной содержание SO_2 намного больше, чем осенью). Вероятным объяснением этого эффекта служит большее количество осадков в осенние месяцы. Случаи аномально высокого накопления в приземном слое этой примеси до уровней выше ПДК наблюдаются в Москве крайне редко – при использовании резервного топлива (мазута) в городском отоплении при сильных морозах и, как правило, при наличии, по содарным данным, приподнятой инверсии на небольших высотах.

Введение

Изучение закономерностей изменчивости малых газов в приземном слое атмосферы необходимо для более полного понимания ее состава в целом, а также для правильного планирования природоохранных мероприятий. Двуокись серы, или сернистый ангидрид SO_2 , исторически относится к числу основных загрязнителей воздуха – наряду с окислами азота, угарным газом и озоном, хотя за последние десятилетия ее количество существенно сократилось. Соответственно уменьшились и значения SO_2 в ряду прочих загрязняющих примесей, и степень реальной опасности для здоровья человека при существующих ныне уровнях.

Как известно, в промышленных районах не менее 80% выбросов двуокиси серы связано с деятельностью человека (см., например, [14]). Наибольший вклад в выбросы (около 70%) вносит сжигание угля, в меньшей степени – мазута. Высокое содержание этого газа в воздухе оказывает вредное воздействие на органы дыхания людей и животных. В наибольшей степени среди всех прочих организмов его губительному влиянию подвержены лишайники. Известно, что крупные города с высоким содержанием SO_2 являются своеобразными «лишайниковыми пустынями», в пределах которых их видовое разнообразие сильно обеднено [3, 5].

Для здоровья человека особенно опасным является одновременное присутствие в воздухе высоких уровней SO_2 и частиц дыма, приводящее к рез-

кому усилению (синергизму) их совместного воздействия на организм, многократно превосходящему токсичность каждого из этих веществ в отдельности [3]. В начале и в середине прошлого столетия чрезмерное накопление в приземном слое воздуха двуокиси серы и частиц дыма привело к нескольким катастрофам в разных странах – в долине Мааса (Бельгия) в 1930 г., в Доноре (США) в 1948 г. и в Лондоне (Соединенное Королевство) в 1952 г. Во время этих трагических случаев содержание SO_2 достигало огромных значений: в Доноре – 5,7 мг/м³, а в Лондоне – 3,8 мг/м³ [1]. В результате погибли многие десятки, а в Лондоне – даже тысячи людей [3].

Таким образом, двуокись серы является одним из опасных загрязняющих веществ, и ее изменчивость во времени требует пристального изучения.

1. Изменчивость содержания SO_2 в Москве за последние полвека

Во второй половине XX в. в крупных городах произошло значительное уменьшение уровня приземного содержания двуокиси серы. Это было связано с заменой вида сжигаемого топлива и резким сокращением в его общем составе доли угля и мазута, которые содержат большое количество серы. Нами проанализированы данные измерений приземного содержания SO_2 на двух стационарных постах в Москве – в МГУ в юго-западной части

столицы и на Балчуге в центре города. В МГУ регулярные измерения этой примеси были начаты санитарно-эпидемиологической службой Минздрава СССР еще в 1957 г. и продолжались вплоть до 1981 г. Позднее, в 1966 г., в Москве под эгидой Госкомгидромета СССР была создана сеть постов ЦВГМО (ныне — МосЦГМС-Р) по контролю загрязнения воздуха, в том числе — пост Балчуг, работающий вплоть до настоящего времени. Данные самого первого года наблюдений здесь непоказательны, поскольку пробные измерения были редкими — в среднем лишь 12 раз в месяц. Начиная с 1967 г. измерения на Балчуге стали регулярными и производились уже несколько десятков раз, а после 1973 г. — в среднем от 80 до 100 раз за месяц. Обеспеченность данными в МГУ была лишь немного ниже: от 50 до 60 измерений в среднем за каждый месяц в 1970-е гг. На протяжении всего существования сети МосЦГМС-Р приземное содержание SO_2 определяется на ее постах фотокалориметрическим методом с помощью стандартных газоанализаторов, что обеспечивает однородность полученных рядов данных и сравнимость значений в разные годы.

Как видим на рис. 1, весь имеющийся ряд данных можно уверенно разделить на три части: высокий уровень значений без выраженной тенденции изменений в начале наблюдений, резкое их уменьшение в середине ряда и стабилизация на гораздо более низком уровне в последние годы.

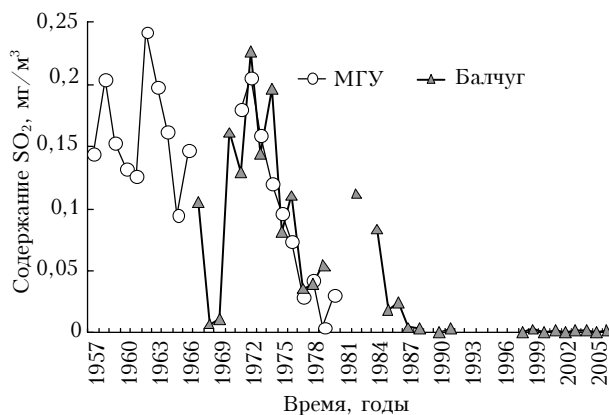


Рис. 1. Динамика среднегодовых значений приземного содержания диоксида серы в Москве

Вплоть до начала 1980-х гг. и на Балчуге, и в МГУ отмечались сравнительно высокие среднегодовые значения диоксида серы, как правило, превышавшие $0,05 \text{ мг/м}^3$, — значения, соответствующего ныне принятой предельно допустимой концентрации в среднем за сутки. В среднем за год содержание этой примеси в 1950-е и в 1960-е гг. достигало в Москве $0,15\text{--}0,20 \text{ мг/м}^3$.

Примечателен локальный максимум в 1972 г., очевидно связанный с сильными лесными и торфяными пожарами в Подмосковье во время необычайно жаркого и засушливого лета в тот год. На Балчуге среднегодовое значение ($0,23 \text{ мг/м}^3$) оказалось в 1972 г. рекордно высоким за всю 40-летнюю ис-

торию наблюдений. В МГУ, где наблюдения начались раньше, лишь один раз в 1962 г. среднегодовое значение было еще больше ($0,24 \text{ мг/м}^3$; в 1972 г. — $0,21 \text{ мг/м}^3$). На рис. 2 на примере данных этого поста видно, что высокое среднегодовое значение в 1972 г. связано именно с экстремальными приземными уровнями SO_2 в летние месяцы. Они в этот год оставались столь же большими, как и зимой, вопреки обычному понижению в теплое время года, отмечавшемуся в соседние годы.

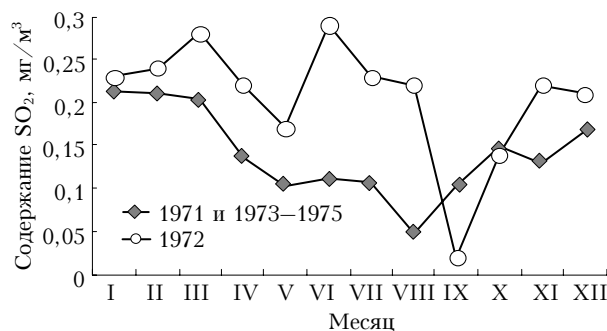


Рис. 2. Годовой ход приземного содержания диоксида серы в Москве (МГУ) в начале 1970-х гг.

После 1972 г. наметилось устойчивое уменьшение от года к году средних значений по данным обоих постов. Особенно быстро уровень содержания SO_2 сокращался в столице в 1970-е гг. В это время были почти полностью переселены последние деревни в черте города с дровяным и угольным отоплением частных домов, закрылись работавшие на мазуте мелкие котельные, а теплоэлектроцентрали Москвы перешли на использование газового топлива. В результате после 1984 г. среднегодовое значение SO_2 ни разу не превысило $0,05 \text{ мг/м}^3$, а после 1987 г. всегда было менее $0,01 \text{ мг/м}^3$. Впоследствии оно сократилось в центре столицы еще на целый порядок.

За последнее десятилетие, начиная с 1998 г., среднегодовое значение SO_2 по данным измерений на Балчуге менялось в пределах от $0,0005$ до $0,0030 \text{ мг/м}^3$, а в среднем составило около $0,001 \text{ мг/м}^3$. Таким образом, за последние полвека уровень приземного содержания диоксида серы в центре Москвы сократился, по данным Росгидромета, приблизительно на два порядка, т.е. более чем в 100 раз.

Подобная тенденция — резкое сокращение уровня содержания диоксида серы в воздушном бассейне крупных городов — отмечалась за последние десятилетия во многих странах. Так, и в Лондоне, и в Нью-Йорке быстрое уменьшение значений началось в середине 1960-х гг. [3]. В те же годы содержание SO_2 устойчиво уменьшалось и в Париже, и в городах ФРГ [1]. За период с 1965 до 1975 г. оно сократилось в городах Франции на 25–40%. В городах СССР содержание этой примеси за период с 1968 по 1975 г. также уменьшилось в среднем на 24% [1]. Что касается британской столицы, то резкое сокращение использования здесь угля для отопления стало результатом действия

«Акта о чистом воздухе», принятого в 1956 г. после катастрофы в 1952 г.

Впрочем, уменьшение приземного содержания SO_2 (конечно, не столь быстрое) наблюдается не только на городских, но и на фоновых станциях мониторинга. Для заповедников на Европейской территории России такая тенденция была впервые отмечена в [13] и подтвердилась данными последних 15 лет [10]. В эти годы среднегодовые значения здесь стали существенно меньше $0,001 \text{ мг/м}^3$ [10], тогда как 20 лет назад они составляли от $0,003$ до $0,006 \text{ мг/м}^3$ [13]. Ранее, в 1970-х и 1980-х гг., содержание SO_2 измерялось в этих заповедниках лишь эпизодически. Тем не менее отрывочные данные таких измерений, при их значительном разбросе, также показывали в то время оценки фоновых значений, составлявшие в среднем несколько мкг/м^3 [14]. Таким образом, однонаправленные изменения с разной скоростью приводят к уменьшению различий в содержании SO_2 между городами и сельской местностью. Ныне уровень загрязнения воздуха двуокисью серы в центре Москвы лишь ненамного превышает фоновые значения.

Относительная стабилизация в последние годы содержания этой примеси в Москве на новом уровне косвенно подтверждается и обобщенными оценками в целом по России [9]. Согласно этим данным, за период с 1999 по 2003 г. как выбросы SO_2 , так и ее содержание в воздухе оставались практически неизменными от года к году. Примечательно, что SO_2 — единственный из основных загрязняющих газов в атмосфере, приземное содержание которого, даже наибольшие его значения, намного ниже их предельно допустимой концентрации — в целом как по Москве (по данным измерений на 16 постах МосЦГМС-Р [11]), так и по России (по данным измерений в 248 городах [10]).

Таким образом, при существующих сегодня уровнях двуокиси серы в городском воздухе реальная опасность для здоровья людей практически исключена. Тем не менее регулярные наблюдения за этой примесью продолжают, поскольку именно с ней были связаны наиболее известные случаи катастрофического загрязнения воздуха в прошлом.

2. Особенности годового и суточного хода двуокиси серы в Москве

Данные постов сети МосЦГМС-Р в Москве, усредненные за длительные промежутки времени, позволяют проследить общую тенденцию многолетних изменений. Однако подробно исследовать суточный ход содержания той или иной примеси по этим данным не удастся, поскольку единичные измерения здесь производятся лишь от 2 до 4 раз в сутки. В последние годы в столице появилась и быстро развивается альтернативная сеть постов контроля качества воздуха — ГУП «Мосэкомониторинг». Однако, к сожалению, оборудование этой сети не стандартизовано, а надежность его калибровки недостаточно высокая.

Начиная с февраля 2002 г. на территории Метеорологической обсерватории МГУ в юго-западной части Москвы (где ранее находился пост Минздрава СССР) работает совместная экологическая станция ИФА им. А.М. Обухова РАН и географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова. Здесь в непрерывном режиме производятся ежеминутные измерения приземного содержания основных атмосферных примесей — O_3 , NO , NO_2 , CO , SO_2 , взвешенных частиц и пр. [4 и др.]. Все измерительные приборы регулярно калибруются по международным эталонам и стандартным смесям. Измерение двуокиси серы ведется здесь с января 2004 г. методом флуоресценции с помощью серийного газоанализатора APSA-360, которым оснащены станции Глобальной службы атмосферы под эгидой ВМО. Его чувствительность составляет $\pm 0,5 \text{ млрд}^{-1}$. Предварительные данные о суточном и годовом ходе двуокиси серы по результатам первого года измерений приведены в [4]. В настоящей статье нами обобщены результаты непрерывных измерений этой примеси уже за 4 года.

По данным измерений на фоновых станциях Европейской России годовой ход приземного содержания SO_2 характеризуется наибольшими значениями в холодный и наименьшими — в теплый период года [13]. Очевидными причинами этого служат, с одной стороны, повышенные выбросы двуокиси серы при сжигании топлива для отопления зданий, а с другой — преобладающая зимой устойчивая стратификация нижней тропосферы, способствующая накоплению выбросов в приземном слое воздуха [8]. Качественно близкий годовой ход с максимумом зимой ранее был отмечен и во многих городах Сибири — в Омске, Иркутске и др. [1], в Кракове (Польша) [16].

На рис. 3 приведен годовой ход двуокиси серы в Москве по результатам измерений на экологической станции ИФА и МГУ.

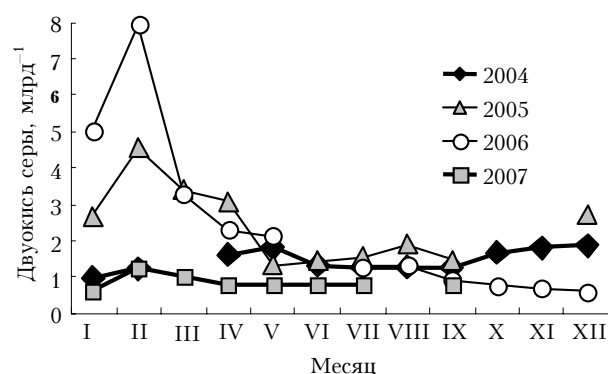


Рис. 3. Годовой ход приземного содержания двуокиси серы в Москве (МГУ)

Как видно, в целом отмеченная закономерность (наибольшие значения зимой) подтверждается для условий Москвы нашими данными последних лет, так же как и данными измерений в 1970-х гг. (см. рис. 2), однако сам по себе годовой ход более

сложный. Во-первых, минимум значений не ограничивается летним сезоном, а охватывает также осенние месяцы. Во-вторых, средние значения за отдельные зимние месяцы характеризуются крайне широким разбросом: от $0,6 \text{ млрд}^{-1}$ ($1,7 \text{ мкг/м}^3$) в декабре 2006 г. до $8,0 \text{ млрд}^{-1}$ ($23,8 \text{ мкг/м}^3$) в феврале 2006 г., т.е. различаются между собой на целый порядок. Самые большие значения были отмечены в январе и особенно в феврале 2006 г. в условиях сильных морозов. В целом за год содержание двуокиси серы в Москве составило по данным экологической станции ИФА и МГУ в 2004 г. $1,5 \text{ млрд}^{-1}$ ($0,004 \text{ мг/м}^3$), а в 2005 и 2006 г. — $2,4 \text{ млрд}^{-1}$ ($0,007 \text{ мг/м}^3$).

Заметим, что полученные значения существенно (в несколько раз) превосходят средние оценки за те же годы по данным измерений на Балчуге. Причиной этого может быть как неоднородное распределение источников выбросов SO_2 внутри большого города, так и дискретные во времени (4 раза в сутки) измерения на Балчуге.

На рис. 4 приведен суточный ход приземного содержания SO_2 в разные сезоны года.

Показаны средние значения, а также доверительные интервалы с уровнем значимости 5% за каждые 10 мин в течение суток, рассчитанные по данным измерений в 2004–2006 гг. Как видно, суточный ход весной и летом качественно очень сходный и главной его особенностью служит ярко выраженный утренний максимум — статистически значимый с учетом доверительных интервалов. После 7 ч начинается быстрый рост содержания SO_2 у поверхности земли, которое достигает наибольших значений около 10 ч, а затем постепенно уменьшается вплоть до 19 ч. В остальное время суток, вечером и ночью, содержание двуокиси серы остается на стабильно низком уровне без выраженных изменений.

Примечательно, что ни одна другая примесь по данным экологической станции ИФА и МГУ не показывает подобного суточного хода [4]. По-видимому, причиной этого служит то, что городские выбросы двуокиси серы в отличие от большинства прочих газов связаны преимущественно с высокими источниками. В силу этого она накапливается в приземном слое именно утром, когда приземная радиационная инверсия отрывается от поверхности и существует по инерции несколько часов в виде уже приподнятой инверсии на высотах до 300–400 м.

Согласно многолетним данным акустического зондирования в Москве, приподнятая инверсия отмечается в утренние часы примерно в 40% случаев весной и приблизительно в половине всех случаев летом [8]. Термическая конвекция, развивающаяся в слое воздуха под инверсией, способствует интенсивному вертикальному перемешиванию выбросов двуокиси серы и увеличению ее содержания вблизи поверхности.

После разрушения инверсии происходит интенсивное рассеивание выбросов SO_2 в вышележащие слои и приземное ее содержание в дневные

часы быстро уменьшается. В течение же ночи выбросы SO_2 трубами ТЭЦ и котельных распространяются либо в верхней части приземной инверсии, в пределах которой турбулентный обмен ослаблен, либо поверх ее вершины, так что приземное содержание этого газа остается почти неизменным.

Осенью и зимой также наблюдается утренний рост двуокиси серы у земли, но термическая конвекция в это время отмечается значительно реже, и утренний максимум оказывается протяженным во времени, охватывающим также и дневные часы. Особенностью зимних месяцев является крайне широкий разброс отдельных значений, так что различия в суточном ходе оказываются зимой статистически незначимыми. Еще одной особенностью зимнего сезона служит сильная изрезанность суточного хода с шагом 10 мин, связанная с преобладающим влиянием в общей выборке отдельных дней, когда выбросы двуокиси серы значительно превышали обычный их уровень. Примечательно, что повторный расчет суточного хода для зимы (рис. 4, черные кружки) с исключением только одного дня — 16 февраля 2006 г. — показал заметное смещение средних оценок утром и в околополуденное время. Ниже мы рассмотрим подробнее метеорологические условия дней с очень высоким приземным содержанием SO_2 .

Заметим, что по данным измерений в 1970-е гг. [1] суточный ход в холодное время года в городах СССР (например, в Днепропетровске) был иным и характеризовался наличием утреннего и вечернего максимумов. Возможно, что значительное сокращение выбросов за прошедшее с тех пор время проявилось и в качественном изменении вида суточного хода.

На рис. 4 приведен также сводный график средних значений в МГУ для более наглядного сравнения условий в разные сезоны года. Очевидно, что наибольшее содержание двуокиси серы, как и на фоновых станциях в заповедниках [13], наблюдается в Москве зимой. Вместе с тем интересно отметить явную асимметрию условий переходных сезонов. Если весной уровни SO_2 в столице почти столь же высокие, как и зимой, то осенью — даже более низкие, нежели летом. Следует заметить, что средняя температура воздуха в Москве за период 1961–2000 гг. составила весной $+5,8 \text{ }^\circ\text{C}$, а осенью $+4,8 \text{ }^\circ\text{C}$, так что весна в целом теплее осени на $1 \text{ }^\circ\text{C}$ [15]. Тем не менее отопительный сезон в столице, как правило, начинается в начале октября и заканчивается в конце апреля, охватывая и весной, и осенью приблизительно одинаковое время. Чтобы понять природу различий между переходными сезонами, обратимся к климатическим данным о количестве осадков. В среднем за те же 40 лет количество осадков в Москве весной составило 42 мм, тогда как осенью — 60 мм [15]. Как известно, растворение и вымывание осадками служит важнейшим стоком двуокиси серы из нижней тропосферы. Вероятно, именно большее количество осадков осенью создает различия между условиями переходных сезонов.

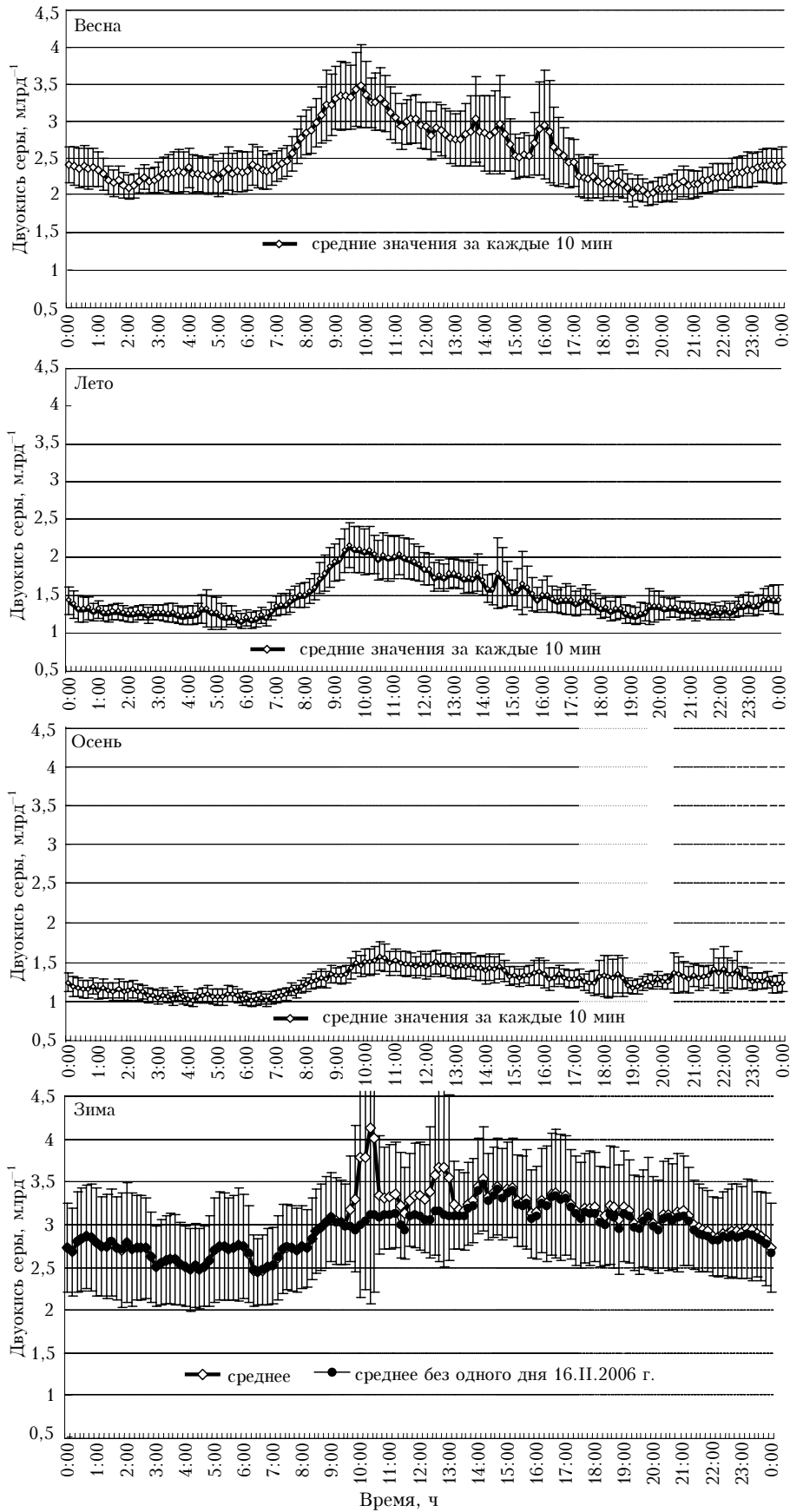


Рис. 4. Суточный ход приземного содержания двуокиси серы в Москве (МГУ) в разные сезоны года по данным измерений в 2004–2006 гг., млрд⁻¹ (а)

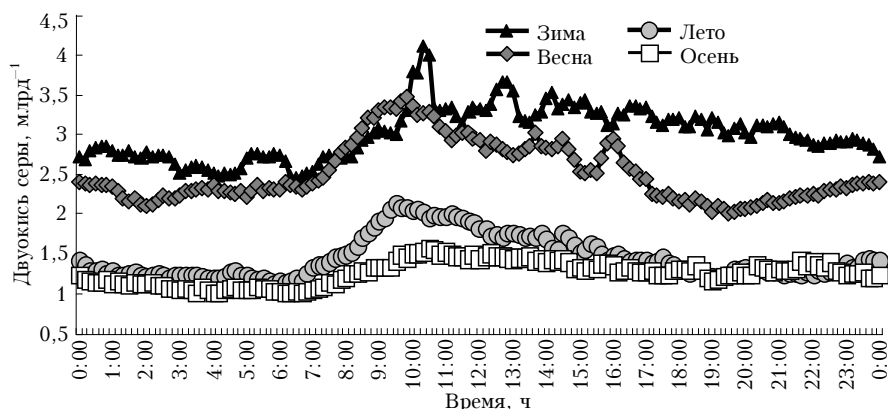


Рис. 4. (Продолжение). Сводный график средних значений (б)

3. Причины экстремально высокого накопления диоксида серы в воздушном бассейне Москвы

Как известно, в большинстве крупных городов основная доля выбросов загрязняющих веществ в атмосферу приходится на автомобильный транспорт. В Москве в 1980-х гг. его доля в общих выбросах составляла около 70% [2]. Ныне, в условиях спада производства и быстрого роста автомобильного парка, она еще выросла и составляет в последние годы в столице 84% по данным ГУП Мосэкомониторинг и 92% по данным Росгидромета [11]. Однако в отдельных случаях, например при усилении работы городского отопления, вклад высоких источников в общее загрязнение атмосферы может стать значительным.

Предельно допустимой среднесуточной концентрацией диоксида серы в воздухе считается значение $0,05 \text{ мг/м}^3$, а максимальной разовой — $0,5 \text{ мг/м}^3$ [2]. За весь 4-летний период наблюдений в Москве (МГУ) приземное содержание SO_2 в среднем за сутки лишь шесть раз превысило предельно допустимое значение (в объемных единицах — $17,0 \text{ млрд}^{-1}$ с учетом средней за зиму температуры воздуха): 19, 20 и 21 января, 7 и 8 февраля, а также 16 февраля 2006 г. Что касается отдельных измерений в среднем за 10 мин, то лишь в один из дней, 16 февраля 2006 г., они 4 раза подряд превысили максимальную разовую концентрацию. В этот день в 10.00, 10.10, 10.20 и 10.30 содержание диоксида серы достигло в МГУ соответственно 216, 202, 274 и 240 млрд^{-1} (в массовых единицах — 0,66, 0,62, 0,84 и $0,73 \text{ мг/м}^3$) — рекордно высоких значений за весь 3-летний период наблюдений.

Таким образом, наибольшее измеренное содержание SO_2 в среднем за 10 мин превысило среднегодовое значение в 115 раз. Еще несколько десятилетий назад наибольшие значения в разных городах, как правило, лишь в 5–10 раз превышали средние [1]. Очевидной причиной изменения этого соотношения является резкое уменьшение обычных уровней содержания диоксида серы.

На рис. 5 приведен ход среднесуточных значений приземного содержания SO_2 и температуры

воздуха за первые 2 мес 2006 г. Как видно, на фоне очень малых обычных значений, составляющих всего лишь около 1 млрд^{-1} и даже менее, именно в эти дни трижды произошло резкое увеличение содержания до $20\text{--}25 \text{ млрд}^{-1}$ и даже более.

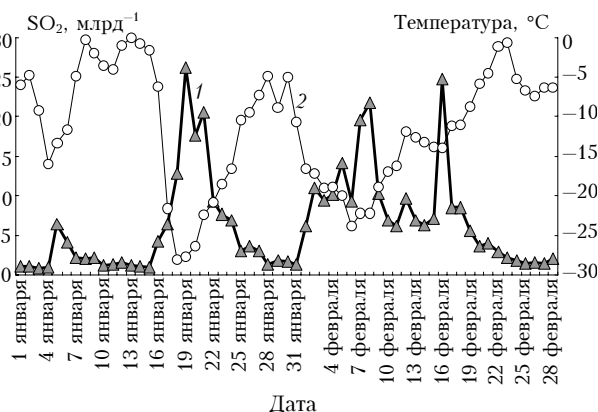


Рис. 5. Ход среднесуточных значений приземного содержания SO_2 (1) и температуры воздуха (2) зимой 2006 г. в Москве (МГУ)

В двух случаях из трех этот скачкообразный рост наблюдался сразу вслед за резким понижением температуры воздуха. Так, 18 января среднесуточная температура в МГУ достигла $-28,0 \text{ }^\circ\text{C}$, а наименьшая утром опустилась до $-30,1 \text{ }^\circ\text{C}$. Заметим, что за последние 20 лет температура воздуха в МГУ только один раз, в 2003 г., была еще ниже.

На рис. 6 приведена микрокольцевая карта приземного анализа за 3 ч в этот день. Как видно, столица находилась вблизи оси гребня, у края зоны интенсивных градиентных потоков между антициклоном с центром над побережьем Карского моря и циклоном над Казахстаном. Как видно, стационарный участок в системе Арктического фронта достигал Черноморского побережья, так что вся европейская часть России находилась в условиях господства исключительно холодного континентального арктического воздуха. Именно в это время, в условиях очень сильных морозов, на теплоэлектроцентралях Москвы, помимо обычного газа, начало использоваться резервное топливо — мазут с высоким содержанием серы.

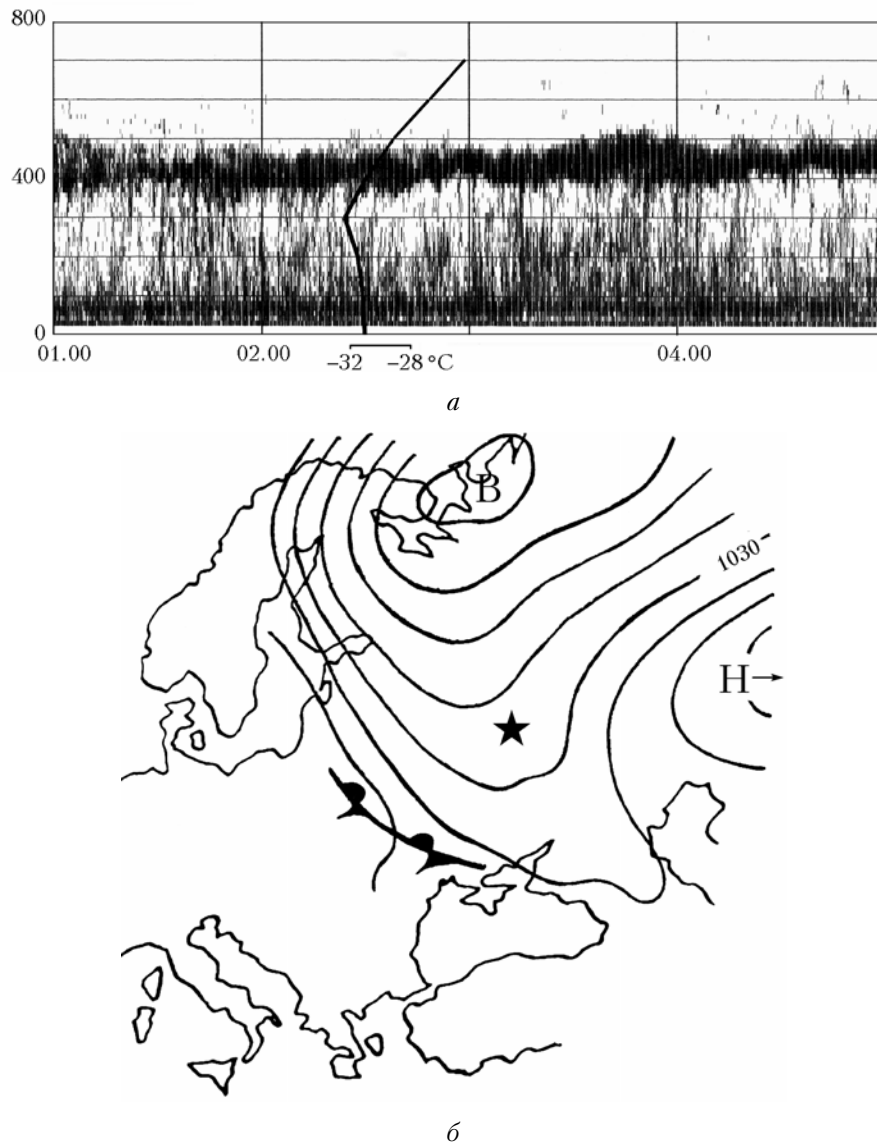


Рис. 6. Турбулентная структура приподнятой инверсии на содарной записи 18 января 2006 г. в МГУ в условиях сильного мороза (а) и микрокольцевая карта приземного анализа за 03 ч московского времени в этот день (б). Москва показана звездочкой. На содарную запись наложен температурный профиль по данным радиозонда в 02.30. Изобары отмечены с шагом 5 гПа

Дополнительным фактором, определившим повышенное накопление выбросов SO_2 в приземном слое воздуха, явилась температурная стратификация. Как известно, высотно-временная развертка эхосигнала акустического локатора (содарная запись) служит источником очень подробных данных о температурной стратификации, включая определение ее вида с точностью до знака вертикального градиента температуры и границ характерных турбулентных структур, связанных с задерживающими слоями инверсий [6, 7 и др.]. В Метеорологической обсерватории МГУ акустическое зондирование атмосферы ведется в непрерывном режиме с помощью двух содаров: «ЭХО-1» производства ГДР и «MODOS» производства фирмы МЕТЕК (Германия). Высотный диапазон содара «ЭХО-1» состав-

ляет 800 м, вертикальное разрешение — 12,5 м [8]. Данные этого содара используются для подробного изучения температурной стратификации. На рис. 6 видно, что в начале первого эпизода экстремально высокого содержания SO_2 18 января 2006 г. в МГУ на содарной записи в течение всего дня отмечалась структура приподнятой инверсии в виде слоя интенсивного эхосигнала.

Можно было ожидать, что при столь морозной погоде должна наблюдаться сильная приземная инверсия. Однако ниже этого слоя, связанного с основанием инверсии, на записи видны неупорядоченные структуры эхосигнала, характерные для слабоустойчивой стратификации. Действительно, по данным радиозондирования на ближайшей аэрологической станции Долгопрудный в 25 км от МГУ

(температурный профиль, наложенный на содарную запись), инверсия в это время действительно была приподнятой с нижней границей около 300 м. В приземном же слое воздуха температура почти не менялась с высотой. Вероятно, продолжавшаяся в эти часы адвекция холода из Западной Сибири определила отсутствие приземной инверсии в центре Европейской России. Дополнительной причиной образования приподнятой инверсии в Москве могло стать повышение температуры в приземном слое вследствие интенсивного отопления города. Приподнятую инверсию данного вида можно назвать «городской», а качественный механизм ее образования описан в [12].

Эта инверсия почти непрерывно существовала над Москвой в пределах нижнего 800-метрового слоя с утра 17-го и вплоть до полудня 21 января, т.е. в течение всего первого эпизода аномально высокого содержания SO_2 . Очень низкая приподнятая инверсия с нижней границей не более 200 м отмечалась в утренние часы и 7, 8 и 16 февраля 2006 г. Именно в 6 ч 7 февраля, при наличии задерживающего слоя инверсии, приземный уровень SO_2 резко повысился вплоть до 70 млрд⁻¹. Только 1 раз из 6 дней — 8 февраля — повышение содержания этой примеси (тоже до 70 млрд⁻¹) произошло в период с 16 до 19 ч, когда инверсии по содарным данным не было. Что касается скорости ветра V на высотах, измеряемой в МГУ содаром «MODOS», явной ее связи с условиями накопления двуокиси серы не выявлено. Если утром 16 февраля ветер в нижнем 100-метровом слое был очень слабым (V — менее 3 м/с), то с 19 по 21 января его скорость оказалась в этом слое близкой к обычным для зимы значениям (5–7 м/с и более). Вероятно, определяющее значение для динамики приземного содержания SO_2 имеет не скорость, а направление ветра от ближайших источников ее выбросов.

Итак, резкое повышение приземного уровня двуокиси серы сверх обычных значений возможно зимой при использовании резервного топлива для отопления города при сильных морозах и обычно сопровождается неблагоприятными метеорологическими условиями — наличием задерживающей приподнятой инверсии.

Заключение

1. За последние полвека приземное содержание двуокиси серы в Москве существенно сократилось; особенно быстро оно уменьшалось в 1970-е гг. вследствие исключения твердого и жидкого топлива с высоким содержанием серы из использования в системе городского отопления. В результате различия между городскими и фоновыми значениями этой примеси также уменьшились.

2. В годовом ходе двуокиси серы в Москве наибольшие значения отмечаются при сильных морозах зимой, а наименьшие — летом и осенью. Наибольший разброс между отдельными среднемесячными значениями наблюдается также зимой. Значительные различия в средних приземных

уровнях двуокиси серы в переходные сезоны года (весной — больше, чем осенью) предположительно связаны с большим количеством осадков в Москве в осенние месяцы.

3. Суточный ход двуокиси серы у земли в Москве во все сезоны, кроме зимы, характеризуется статистически значимым утренним максимумом, предположительно связанным с повышенным накоплением под приподнятой инверсией выбросов этой примеси высокими источниками (трубами предприятий и ТЭЦ).

4. В результате понижения средних уровней двуокиси серы отношение наибольших разовых и средних значений возросло в Москве до значений 100 и более. За несколько последних лет разовое содержание этой примеси только в один из дней, а среднесуточное — лишь 6 раз превысило предельно допустимое значение. Это произошло в 2006 г. в условиях сильных морозов и усиления работы городского отопления с использованием резервного топлива (мазута). Накоплению выбросов двуокиси серы способствовало также наличие приподнятой инверсии на небольших высотах по содарным данным.

5. Усиление отопления города при сильных морозах может быть самостоятельной причиной образования «городской» приподнятой инверсии.

Авторы благодарят Игоря Борисовича Беликова за большой вклад в осуществление измерений на Экологической станции ИФА РАН и МГУ, а также сотрудников МосЦГМС-Р за любезно предоставленные архивные данные измерений на постах этой сети.

Наблюдения и анализ данных выполнены при поддержке проектов РФФИ № 07-05-00874, 06-05-08089 и 07-05-00428.

1. Безуглая Э.Ю. Метеорологический потенциал и климатические особенности загрязнения воздуха городов. Л.: Гидрометеониздат, 1980. 184 с.
2. Безуглая Э.Ю., Расторгуева Г.П., Смирнова И.В. Чем дышит промышленный город. Л.: Гидрометеониздат, 1991. 256 с.
3. Бридлжумб П. Состав и химия атмосферы. М.: Мир, 1988. 352 с.
4. Еланский Н.Ф., Локощенко М.А., Беликов И.Б., Скороход А.И., Шумский Р.А. Изменчивость газовых примесей в приземном слое атмосферы Москвы. М.: Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана. 2007. Т. 43. № 2. С. 246–259.
5. Загрязнение воздуха и жизнь животных / Под ред. М. Трешоу. Л.: Гидрометеониздат, 1988. 536 с.
6. Красненко Н.П. Акустическое зондирование атмосферного пограничного слоя. Томск: ИОМ СО РАН, 2001. 280 с.
7. Локощенко М.А. Применение вертикальных содаров в метеорологии (обзор) // Оптика атмосфер. и океана. 1996. Т. 9. № 7. С. 970–992.
8. Локощенко М.А. Температурная стратификация нижней атмосферы в Москве // Метеорол. и гидрол. 2007. № 1. С. 53–64.
9. Обзор загрязнения природной среды в Российской Федерации за 2003 год. М.: Росгидромет, 2004. 154 с.
10. Обзор загрязнения природной среды в Российской Федерации за 2004 год. М.: Росгидромет, 2005. 170 с.

11. *Обзор* загрязнения природной среды в Российской Федерации за 2005 год. М.: Росгидромет, 2006. 192 с.
12. *Оке Т.Р.* Климаты пограничного слоя. Л.: Гидрометеониздат, 1982. 360 с.
13. *Парамонов С.Г.* Фоновое загрязнение атмосферы на Европейской территории России: Дис. ... канд. геогр. наук. М., 1994. 154 с.
14. *Ровинский Ф.Я., Егоров В.И.* Озон, окислы азота и серы в нижней атмосфере. Л.: Гидрометеониздат, 1986. 184 с.
15. *Справочник* эколого-климатических характеристик г. Москвы / Под ред. А.А. Исаева. М.: Изд-во МГУ, 2003. 300 с.
16. *Orkisz K., Walczewski J.* Udział napływu w średnich stężeniach SO₂ w Krakowie – próba oceny na podstawie pomiarów mobilnym spectrometrem korelacyjnym w latach 1992–1998. Warszawa, Wiadomości Instytutu meteorologii i gospodarki wodnej, 2000. T. XXIII (XLIV), zeszyt 3, 93–101 (на польском языке).

M.A. Lokoshchenko, N.F. Elansky, V.P. Malyashova, A.V. Trifanova. **Dynamics of sulfur dioxide surface concentration in Moscow.**

The variability of sulfur dioxide surface concentration in Moscow has been investigated. Two sources of data have been used: both long-term measurements at stations of Hydro-Meteorological Service and of Ministry of Health since 1957 and automatic measurements at the Ecological station of the Institute of Atmospheric Physics and Geography Faculty of MSU occurring every minute for period 2004–2007. During last half of a century the sulfur dioxide concentration in Moscow has been sharply reduced and became closer to background estimations of this admixture. The most values have been occurred in winter, the least ones – in summer and in fall. The daily course of SO₂ in spring and in summer is noted by maximum in morning which is probably connected with frequent elevated inversions at this time. In fall this maximum is longer and involves the daily time as well. In winter a scatter between separate values is significantly more than at other seasons. There is a sharp asymmetry between conditions of transitional seasons (it means that in spring the SO₂ contents is much more than in fall). Probable explanation of this effect is in more amount of precipitation in fall. Cases of anomalously high levels of this gas in the ground air layer in Moscow exceeding the maximum permissible concentration have been observed only several times during four years. They took place in time of black oil usage in the central heating of the city during strong frosts in winter and, besides, as a rule, in time of low elevated inversion existence above Moscow (by the sodar data).