

В.М. Артемов, Н.А. Николаев, Ш.Д. Фридман

ДИСТАНЦИОННЫЙ МОНИТОРИНГ ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРЫ И ВЫБРОСОВ НА УРБАНИЗИРОВАННЫХ ТЕРРИТОРИЯХ

Рассмотрены особенности и трудности решения конкретных задач мониторинга загрязнения атмосферного воздуха урбанизированных территорий в условиях ограниченности инструментальной базы локальных измерений. Приведены примеры измерений временных ходов уровней загрязнения атмосферного воздуха в городах и их окрестностях, а также выбросов промышленных предприятий в атмосферу с использованием оптических, в том числе лазерных средств измерений и средств дистанционного пробоотбора, устанавливаемых на малоразмерных дистанционно пилотируемых летательных аппаратах.

Содержание настоящей статьи носит прикладной характер и ориентировано на поиск концепции включения дистанционных средств измерения в структуру сети мониторинга атмосферного воздуха в природоохранных целях. Рассматриваются стационарные и передвижные средства наземного базирования.

Целью мониторинга загрязнения атмосферы и выбросов на урбанизированных территориях является информационное обеспечение управления природоохранной деятельностью и экологической безопасностью в городах, населенных пунктах, промышленных регионах и примыкающих к ним площадях. При определении стратегии такого управления необходимо учитывать различие химической и фотохимической активности выбрасываемых на урбанизированных территориях компонентов. Например, в пределах урбанизированных территорий сравнительно консервативны окись углерода, двуокись углерода, метан, фреоны, а неметановые углеводороды и окислы азота участвуют в быстрых фотохимических реакциях с образованием оксидантов (в первую очередь озона), пероксиацетилнитратов и других опасных для человека, животных и растительности компонентов. В отношении консервативных примесей управление состоит в принятии решений по снижению интегральных выбросов из источников загрязнения. Для фотохимически активных примесей необходимо регулировать и соотношение концентраций, так как неконтролируемое снижение концентрации одного из компонентов может вызвать нежелательный эффект (например, в Лос-Анджелесе наблюдалось увеличение концентрации озона как следствие снижения выбросов окислов азота [1]).

Решения об изменении объема и состава выбросов должны приниматься на основе данных о среднесуточных или максимальных разовых концентрациях с учетом метеобстановки. Средства мониторинга, поставляющие соответствующую информацию, должны обеспечивать ее представительность с получением данных в реальном масштабе времени без необходимости их осреднения за время порядка месяца, сезона или года. Для локальных средств измерения в условиях сложного рельефа городской застройки это связано с проблемой оптимального размещения стационарных постов сети мониторинга, минимальное расстояние между которыми в центрах мегаполисов должно быть 1 км [2–4]. Такая плотность размещения постов традиционного типа не может быть достигнута в городах России в ближайшие десятилетия ввиду отсутствия отечественной производственной базы для крупносерийного изготовления автоматических газоанализаторов и средств их метрологического обеспечения.

Применение трассовых оптических средств измерения с длиной трасс в интервале 100 м – 10 км дает возможность оперативно (с постоянной времени 1 с ÷ 10 мин) получать представительные результаты за счет эффекта пространственного осреднения. Объем анализируемого воздуха в трассовых измерениях в 10^4 ÷ 10^8 раз больше, чем объем пробы при локальном анализе в предположении равенства времени измерения трассовым прибором и времени отбора пробы локальным средством. Наши результаты трассовых измерений суточных

ходов различных загрязняющих атмосферу примесей так же, как и результаты других исследований, хорошо коррелируют с метеопараметрами, что свидетельствует о высокой представительности данных об интегральных содержаниях примесей, получаемых на длинных трассах. Такого рода информация, получаемая на небольшом числе станций (в Москве, например, по-видимому, достаточно 5-ти станций), может быть использована для краткосрочного прогноза опасных по метеоусловиям ситуаций, рационального планирования природоохранных мероприятий и эффективного контроля результатов их проведения.

Примерами применения трассовых приборов для получения информации, необходимой для принятия решений об изменении объема выбросов, являются наши измерения на территории музея-усадьбы «Ясная Поляна» [5] и мемориального комплекса «Горки Ленинские» [6].

В обоих случаях непрерывно с постоянной времени 1 с регистрировалось содержание аммиака с помощью трассового газоанализатора на основе CO_2 -лазера. Вблизи первого объекта природоохранными службами систематически регистрировались случаи гибели лесной растительности, что связывалось с высоким уровнем концентраций аммиака в атмосферном воздухе. Немногочисленные пункты дискретного отбора проб воздуха в условиях сложной орографии не позволяли определять относительный вклад возможных источников выброса аммиака (животноводческие комплексы, металлургический завод, химический комбинат, удобряемые поля) в загрязнение воздуха на территории усадьбы. Измерения же на трассе длиной 500 м, идущей на высоте около 2 м, при различных направлениях ветра при его скорости более 1 м/с позволили выделять основной источник загрязнения – химкомбинат ЩПО «Азот». На рис. 1 показаны измеренные средние по трассе концентрации аммиака при различных направлениях ветра.

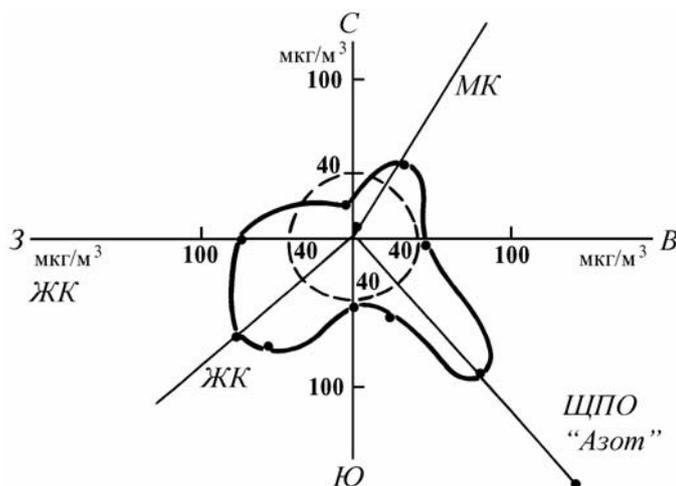


Рис. 1. Распределение средних концентраций аммиака в атмосферном воздухе территории музея-усадьбы «Ясная Поляна» в зависимости от направления ветра и размещения источников выброса аммиака. ЖК–животноводческий комплекс; ЩПО «Азот»–химкомбинат; МК–Косогорский металлургический комбинат; штриховая кривая – среднесуточное значение пдк

Результаты осреднены по выборкам за сентябрь–октябрь 1981 г. и июль–август 1982 г. Источники выброса легко идентифицируются по направлению ветра. При ветрах юго-восточных румбов (со стороны химкомбината) наблюдались состояния атмосферы с очень высокими уровнями концентрации аммиака. Одна из таких ситуаций с существенным превышением уровня предельно допустимой концентрации (ПДК) (максимальная разовая – $200 \text{ мкг/м}^3 = 335 \text{ млрд}^{-1}$) представлена на рис. 2. Расчет с использованием математической модели позволил оценить выброс аммиака в атмосферу в объеме 0,5 т. Данные наших измерений послужили основой для принятия решений по перепрофилированию ЩПО «Азот». Выброс был сокращен на порядок. Животноводческие комплексы были убраны, была исключена опасность влияния удобряемых полей на растительность на территории музея-усадьбы.

На другом объекте – в музее-заповеднике «Горки Ленинские» – также отмечалось угнетение лесной растительности, связанное с повышенным уровнем концентрации аммиака в воздухе. Потенциальными источниками предполагались Видненский коксгазовый, Москов-

ский нефтегазовый заводы, небольшая молочная ферма. Расположение источников выброса показано на рис. 3. Результаты измерений при северо-западных ветрах имеют четко выраженный циклический характер.

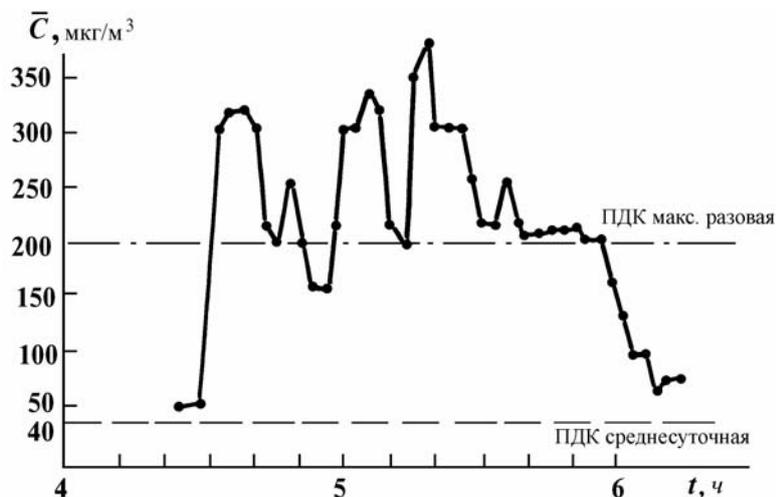


Рис. 2. Временная динамика концентрации аммиака в атмосферном воздухе по территории музея-усадьбы «Ясная Поляна»

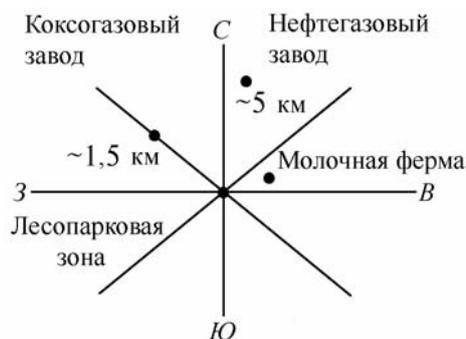


Рис. 3. Расположение источников выбросов в районе заповедника «Горки Ленинские»

На рис. 4 представлен временной ход концентрации аммиака 11.10.84 при С-З ветре 5–7 м/с. Единственным предприятием, имеющим подобную цикличность технологического процесса в этом районе, является Видненский коксогазовый завод, где с периодом 9–12 мин производится выгрузка готовой коксовой болванки, тушение кокса и очередная загрузка освободившейся камеры. Тот же период отмечается и ходом концентрации на рис. 4. Нарушение технологического цикла также отразилось на ходе концентрации на рис. 4 с учетом запаздывания на время перемещения газового облака от завода до места измерения (временной интервал $15^{25} \div 15^{55}$). Единичные выбросы по оценкам, проведенным на основании измерений, составляли около нескольких килограммов аммиака на выброс. По результатам измерений природоохранными органами были приняты меры, приведшие к изменению технологии и уменьшению выброса.

Приведенные примеры показывают, что стационарные посты на базе трассовых приборов могут быть эффективным средством непрерывного контроля уровня загрязнения атмосферного воздуха в особо опасных точках вблизи крупных источников выброса. Трассовые лазерные газоанализаторы на основе лазеров на красителе, CO_2 -лазеров и полупроводниковых диодных лазеров, а также нелазерные оптические трассовые газоанализаторы способны регистрировать гораздо более широкий, чем у традиционных автоматических газоанализаторов, спектр ингредиентов: диоксид серы, окислы азота, окись углерода, бензол, толуол, фенол, стирол, ксилолы, сероуглерод, формальдегид, фтористый и хлористый водород, аммиак и др.

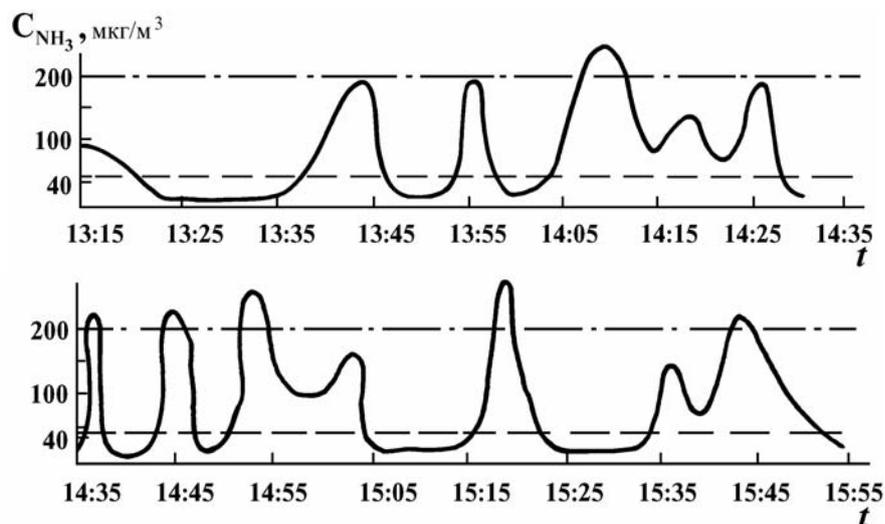


Рис. 4. Временная динамика концентрации аммиака (сплошная линия) в атмосферном воздухе, полученная в районе заповедника «Горки Ленинские». Штрих-пунктирная линия – ПДК максимальная разовая, штриховая – ПДК среднесуточная

Наблюдения за общим характером процессов, идущих в атмосфере крупных городов, должны проводиться в тех ее участках, где обеспечивается хорошее перемешивание основных выбрасываемых в городскую атмосферу примесей, определяющих ее химическую и фотохимическую эволюцию. Средством наблюдения должны быть комплексы, способные оперативно (с постоянной времени 1 мин) регистрировать интегральные содержания широкого набора ингредиентов в воздушных массах, не подверженных влиянию отдельных мелких источников выброса.

В 1984 г. нашим коллективом была создана станция лазерно-оптического контроля загрязнения атмосферы (СЛКЗА) в Куйбышевском районе г. Москвы. Станция расположена в чердачном помещении жилого дома на высоте 82 м. Имеется возможность использовать трассы излучения в направлениях, пересекающих воздушные потоки от различных по характеру загрязнения районов города (рис. 5). Ветры западных румбов выносят загрязнения из центральных районов города. Северные ветры переносят относительно чистые воздушные массы со стороны Лосиног острова. Трассы проходят на высотах $82 \div 20$ м.

В составе станции в различные периоды времени функционировали:

- лидарно-трассовая система на основе лазеров на красителе на диоксид серы;
- трассовый газоанализатор на основе аргонового лазера на диоксид азота;
- несколько трассовых газоанализаторов на основе полупроводникового диодного лазера (ПДЛ) на окись углерода;
- трассовый газоанализатор на основе ПДЛ на диоксид углерода;
- одночастотный аэрозольный лидар в комплексе со счетчиком аэрозольных частиц;
- трассовые корреляционные газоанализаторы на диоксида серы и азота;
- многокомпонентный трассовый газоанализатор на основе CO_2 -лазера;
- автоматические газоанализаторы на окислы азота и окись углерода;
- метеостанция.

Основные рабочие параметры дистанционных газоанализаторов, задействованных на СЛКЗА, представлены в таблице.

За время работы станции получены дневные и суточные ходы средних по трассам концентраций диоксидов серы [7] и азота [8], окиси углерода [9], двуокиси углерода, аэрозоля [10], проведены пробные замеры концентраций озона, аммиака, этилена, бензола, фреонов, силана и других компонентов [11].

Для детектирования диоксида серы использовалась трасса длиной около 600 м направлением 3–В (рис. 5) с перепадом высот $82 \div 45$ м. Отражатель – стена здания. В дневном ходе концентрации диоксида серы (рис. 6) максимум приходится на середину дня при западном направлении ветра в солнечную погоду (приподнятая инверсия, развитая турбулентность). Такой результат можно объяснить влиянием приземных источников, главным образом – ав-

тотранспорта. В сезонном ходе средних за период дневных измерений концентраций диоксида серы (рис. 7) заметно повышение концентрации при начале отопительного сезона в октябре. Превышений ПДК не наблюдалось за исключением случая, когда концентрация 120 млрд^{-1} отмечена при попадании факела ТЭЦ-23 на измерительную трассу. Наблюдалось также вымывание диоксида серы дождем.

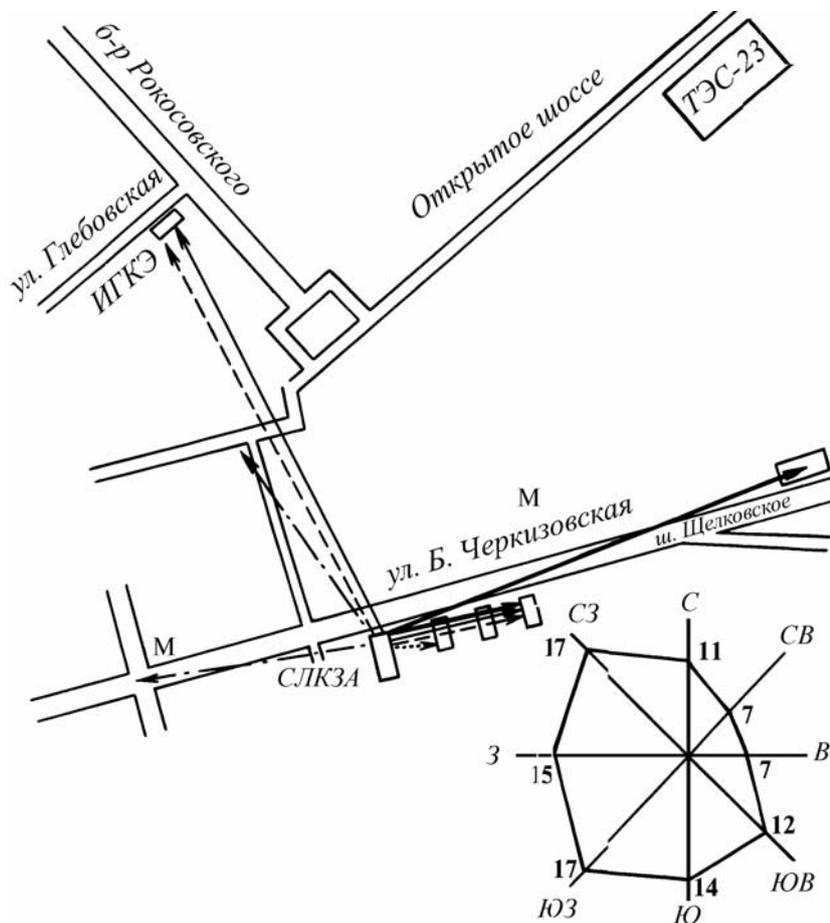


Рис. 5. Схема трасс дистанционного лазерного зондирования на станции лазерно-оптического контроля загрязнения атмосферы в Москве и усреднения розы ветров для этого района. —→ SO_2 ; — — — —→ O_3 , NH_3 , C_2H_4 и др.; - - - - - ↓ CO ; → NO_2 ; — • — — — → аэрозоль

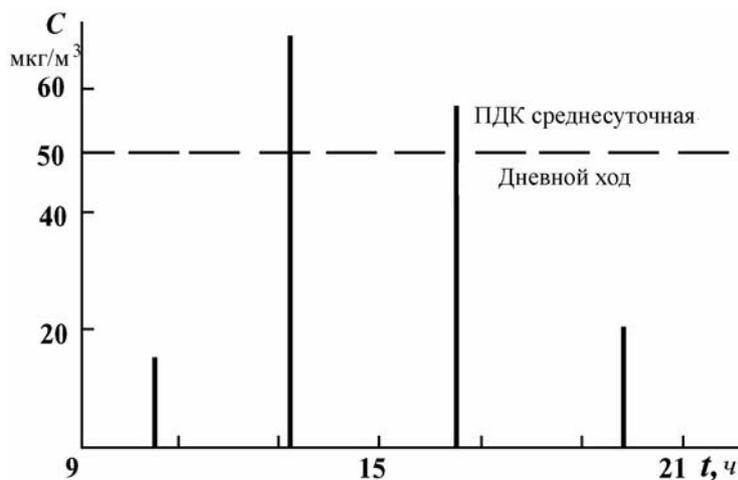


Рис. 6. Дневной ход изменения концентрации диоксида серы в атмосферном воздухе на трассе согласно рис. 5

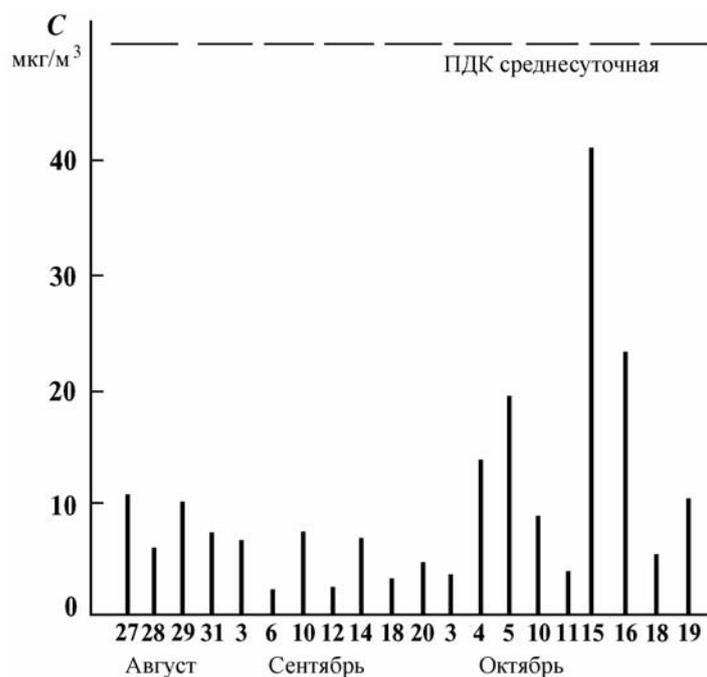


Рис. 7. Сезонный ход изменений концентраций диоксида серы в атмосферном воздухе. Вертикальные линии – усредненные дневные измерения

ЛАЗЕРНО-ОПТИЧЕСКАЯ СТАНЦИЯ

Приборы	Ингредиент	Длина волны	Трасса, м	Чувствительность	Мощность (энергия импульса)
Лидарно-трассовая система на лазере на красителе с отражением от стены здания	диоксид серы	299,4 нм 300,01 нм	600	28 мкг/м ³ Серия из 10 имп.	10 мДж
Трассовая система на аргоновом лазере с уголковым отражателем	диоксид азота	476,5 нм 496,5 нм 514,5 нм	2000	10 мкг/м ³ Трасса 600 м	0,4 Вт 0,2 Вт 0,9 Вт
Трассовая система на полупроводниковом диодном лазере с отражением от уголкового отражателя	окись углерода	4,7 мкм	200	13 мкг/м ³	30 мкВт
Трассовая система на CO ₂ -лазере с диффузным отражателем	аммиак, озон, этилен, бензол, фреоны, перхлорэтилен и др.	Линии генерации в спектральном диапазоне 9,2–10,8 мкм	500	по аммиаку 0,76 мкг/м ³ по озону 5 мкг/м ³	1 Вт
Трассовая автоматизированная многокомпонентная система на CO ₂ -лазере	10 ингредиентов одновременно NH ₃ , O ₃ , C ₂ H ₄ , C ₆ H ₈ и др.	9,2–10,8 мкм	2000		0,05 мДж
Аэрозольный лидар двухчастотный: горизонтальная и вертикальная трассы		0,53 мкм 1,06 мкм	1500	частота следования 10 Гц разрешение 20 м	20 мДж 50 мДж
Трассовые корреляционные газоанализаторы	диоксид серы диоксид азота	0,3 мкм 0,45 мкм	до 1000	1 млн ⁻¹ · м	

Измерения концентрации диоксида азота проводились на трассах длиной около 600 м (направление 3–В, перепад высот $82 \div 45$ м), 1000 м (направление Ю–С, перепад высот $82 \div 20$ м) и 2000 м (направление Ю–С, перепад высот $82 \div 45$ м). Измерения на трассе 600 м проводились в весенне-летний период в сходных погодных условиях (переменная облачность, сухо) при ветрах западного, северо-западного, южного и юго-восточного направлений. В суточных ходах (рис. 8) заметно наличие регулярно воспроизводящих максимумов в 11, 13 ÷ 14, 15 и 18 ч местного времени, которые наблюдались также в г. Атланте США [12] в сходных погодных условиях и в измерениях с помощью трассового корреляционного газоанализатора в г. Москве [13]. Происхождение максимумов можно связать с интенсивностью движения городского автотранспорта и ходом фотохимических процессов в атмосфере. Измерения на трассах 1 и 2 км проводились в различное время года. Зимой регулярных дневных максимумов не наблюдалось. Характерно общее постепенное повышение концентрации диоксида азота днем с максимумом около 16 ч и спадом ночью. Отмечено частое многократное превышение ПДК в любые сезоны года. В ряде случаев наблюдалось вымывание диоксида азота из атмосферного воздуха дождем и снегом. В совместных измерениях с содаром ИФА АН СССР отмечена корреляция понижения концентрации диоксида азота с увеличением высоты слоя перемешивания около 12 ч дня.

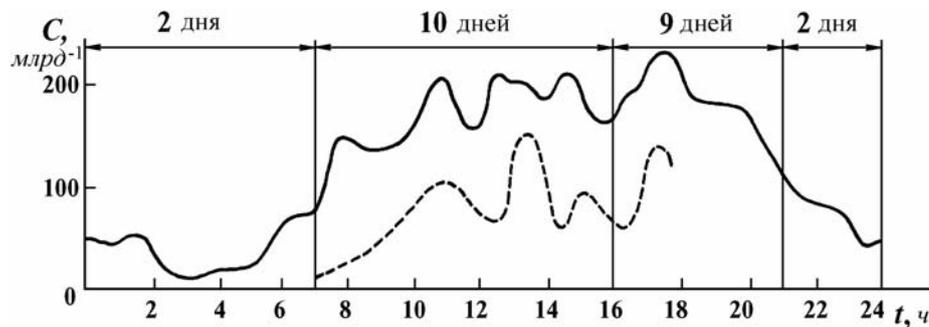


Рис. 8. Усредненный суточный ход концентрации диоксида азота при ветрах западного направления в весенне-летний период: сплошная линия – Москва, май–июль 1986 г.; штриховая – Атланта, США, 27.10.72 г. [12]

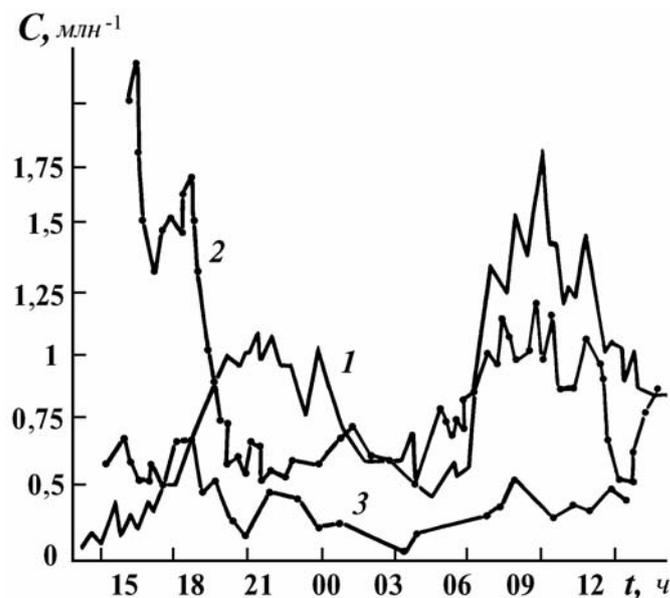


Рис. 9. Суточный ход концентрации окиси углерода: кривая 1 – приподнятая инверсия, западный и юго-западный ветер; 2 — приподнятая инверсия, штиль; 3 – северо-западный ветер

В измерениях окиси углерода, в частности с использованием газоанализатора АГЛ-02, обнаружена корреляция с интенсивностью движения автотранспорта, направлением ветра и стратификацией атмосферы, а также накопление окиси углерода вблизи основания слоя инверсии (рис. 9). Превышений ПДК не наблюдалось. По обнаруженному росту дисперсии результатов с ростом концентрации предложен метод определения регионального фона, т.е. такой концентрации, для которой дисперсии в отдельном измерении (серия из 120 импульсов) стремится к нулю. Для окиси углерода на северо-востоке Москвы это значение составило $0,2 \text{ млн}^{-1}$ (рис. 10).

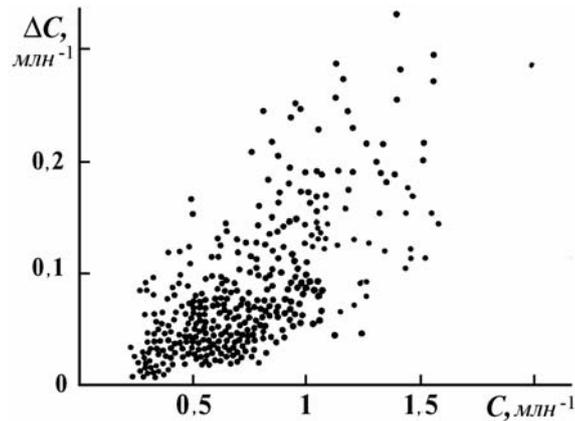


Рис. 10. Зависимость дисперсии результатов измерения окиси углерода в зависимости от средней концентрации

В целом, измерениями на высотах $10 \div 100 \text{ м}$ на трассах, идущих выше границы застройки, определяются главным образом уровни загрязнения воздушных масс, переносимых в подконтрольный район извне, а также вклад от высоких местных источников и от накопления примеси под инверсионным слоем. Длительные регулярные измерения позволяют оценить экологический резерв подконтрольной территории, определяя его как разность между значениями ПДК и региональным фоном загрязнения территории. Последний оценивается по минимальным значениям концентраций в длительных сериях для фиксированных направлений ветра. Например, для случая окиси углерода экологический резерв подконтрольной для СЛКЗА территории не исчерпан при любых направлениях ветра (рис. 11), а для диоксида азота экологического резерва нет.

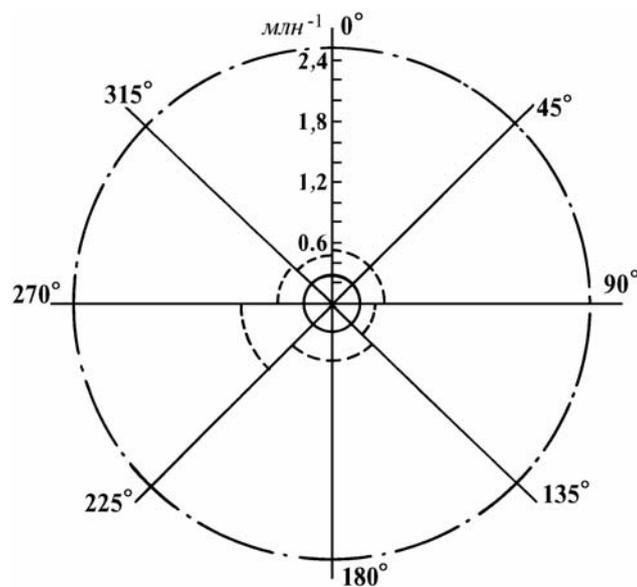


Рис. 11. Экологический резерв атмосферного бассейна региона по окиси углерода: сплошная линия – региональный фон; штриховая – средняя концентрация окиси углерода по направлению ветра, млн^{-1} ; штрихпунктирная – среднесуточные значения ПДК

Интегральная информация, получаемая с помощью стационарных комплексов, может быть дополнена измерениями с передвижных постов, оснащенных пассивными корреляционными приборами (на основе монохроматора с маской, интерференционно-поляризационного или газового фильтра), автоматическими газоанализаторами традиционных типов, средствами пробоотбора и простым средством транспортировки портативных пробоотборников на различную высоту (например, малоразмерным дистанционно пилотируемым летательным аппаратом – МДПЛА), а также в некоторых случаях лидарами различного типа.

Применение пассивных корреляционных приборов, регистрирующих поглощение загрязненным воздухом рассеянного небом солнечного излучения, позволяет при наличии соответствующих метеоусловий наиболее надежно (по сравнению с любыми другими современными средствами) измерять потоки загрязняющих веществ через поверхности, образованные сканированием линии визирования такого прибора. Измерение при фиксированном направлении линии визирования дает интегральное содержание загрязняющих веществ вдоль этой линии. Интегрирование по пути сканирования (за счет поворота прибора или проезда с ним под областью загрязнения) дает интегральное содержание детектируемого компонента в получающейся от перемещения линии визирования поверхности. Если эта поверхность – плоскость, перпендикулярная оси шлейфа из источника выброса, то умножение на среднюю по сечению шлейфа скорость ветра дает поток загрязняющего ингредиента из источника или его выброс. Вертикальное зондирование при объезде загрязненной территории по замкнутому контуру позволяет определить поток с этой территории за ее пределы. Поток можно определить также облетом сечения потока радиоуправляемым МДПЛА с пробоотборниками на борту или сканированием сечения с помощью лидара.

У нас имеется опыт зондирования факелов электростанций и промышленных предприятий установленным на автомобиле корреляционным пассивным газочувствительным радиометром на диоксид серы [14], аэрозольным лидаром [15] и с помощью МДПЛА (диоксиды серы и азота, сульфиты и сульфаты, нитриты и нитраты) с отбором проб на бумажные фильтры [16]. Измерялись также высотные профили аммиака [17] и метана путем отбора проб в шприцы с МДПЛА и последующего их анализа лазерным оптико-акустическим методом.

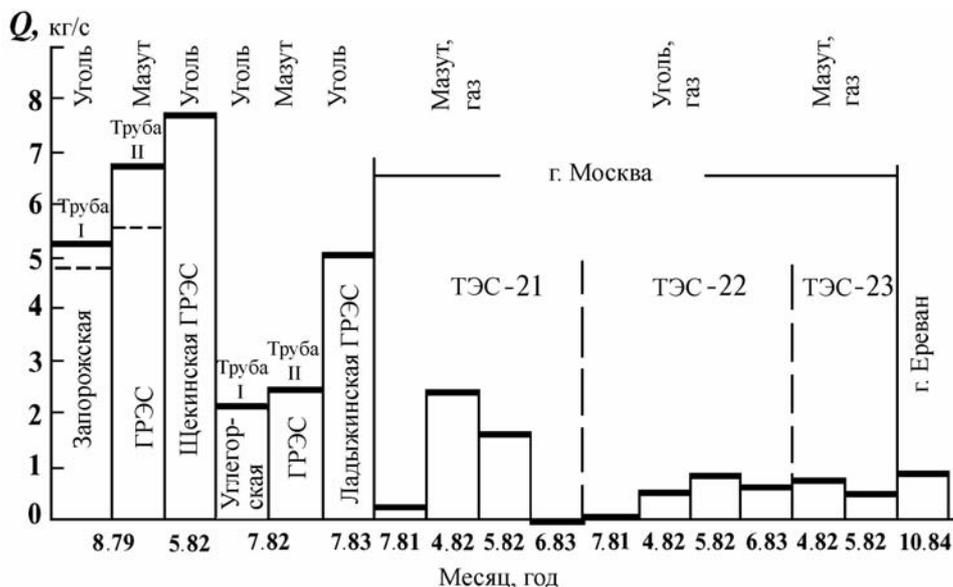


Рис. 12. Результаты инвентаризации выброса сернистого газа различными ТЭС и ГРЭС корреляционным радиометром

С помощью газочувствительного корреляционного радиометра были измерены выбросы диоксида серы крупными ГРЭС на территории Европейской части СССР, а также ТЭС Москвы и Еревана (рис. 12). Очевидно существенное различие выбросов в зависимости от мощности источника и вида топлива (уголь, мазут, газ). Точность единичного измерения – около 30%. Повысить точность можно путем увеличения числа сканирований. Время одного сканирова-

ния на расстоянии 1 км от труб составляет примерно 1 мин. К главным недостаткам пассивных корреляционных приборов, работающих по описанной выше методике, относятся ограниченность времени суток и сезона, пригодных для проведения измерений, и ограниченность числа детектируемых компонентов. Основное ограничение по времени использования – высота Солнца над горизонтом, при которой обеспечивается достаточный уровень интенсивности рассеянного небом излучения. На рис. 13 представлены временные границы использования пассивного прибора, для работы которого необходима угловая высота Солнца над горизонтом 30° . Расчет времени в часах, отсчитываемого от местного полудня, проведен для различных широт (40, 50, 60, 70 и 80°). Например, для широты 50° в день 1 июня можно работать в интервале $\pm 4,6$ ч от местного полудня (точка *A*), а рабочий сезон для широты 50° продолжается с 23.02 по 10.10. Кривая *G* дает даты границ рабочего сезона для различных широт. На границах сезона возможна только кратковременная работа около полудня. Ограничения на работу пассивных приборов накладывает также сплошная плотная облачность или прохождение кучевых облаков через поле зрения прибора.

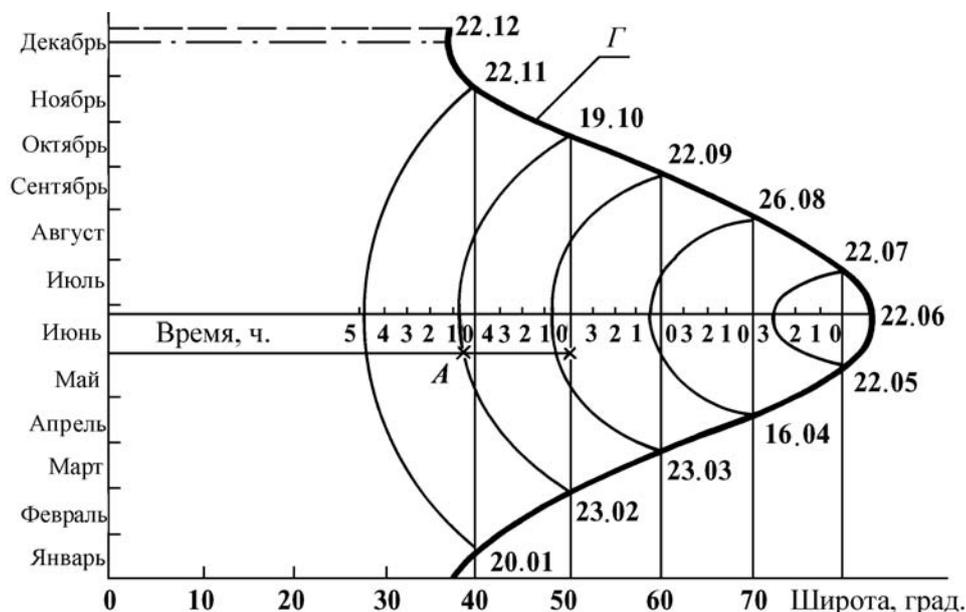


Рис. 13. Временные границы использования корреляционного недисперсионного радиометра на сернистый газ на различных широтах

До настоящего времени известно применение пассивных корреляционных приборов только для детектирования диоксидов серы и азота. Возможно детектирование и других компонентов, имеющих полосы поглощения в диапазоне 0,3–1,0 мкм, например, формальдегида и сероуглерода. Значительно расширить диапазон детектируемых ингредиентов с определением их потоков от источников можно за счет совмещения измерений корреляционным прибором с отбором проб в факеле с помощью МДПЛА. Путем лабораторного анализа отобранных проб достаточно установить отношение содержаний в факеле одного из детектируемых корреляционным прибором газов и других ингредиентов факела и затем использовать пропорциональность между потоками и содержаниями.

Отбор проб с МДПЛА на различной высоте позволяет устанавливать высотный профиль переносимых от источников загрязнения примесей, что дает возможность определять выведение примесей из воздушных масс при их дальнем переносе. Диапазон высот, на которых можно производить отбор проб днем, – до 2, ночью – до 0,5 км. Наличие в передвижной лаборатории лазерного оптико-акустического газоанализатора позволяет оперативно проводить анализ отобранных в шприцы проб па высоте пробоотбора, что существенно для нестабильных веществ. Необходимый для анализа объем пробы – 8 см³. При использовании в качестве источника излучения CO₂-лазера мощностью 0,5 ÷ 1 Вт обеспечивается чувствительность анализа $(2 \div 5) \cdot 10^{-8} \text{ см}^{-1} \cdot \text{Вт}$. Минимально обнаруживаемые концентрации: по аммиаку – 0,5, по этилену – 1, по озону – 3 млрд⁻¹. Время анализа – 4 мин. Время подготовки МДПЛА к полету,

включая установку пробоотборника, сборку и заправку топлива – не более 20 мин. Время отбора в шприц – 1 с, число транспортируемых шприцев – девять. Для взлета и посадки необходимо свободное пространство в пределах 100 м и ровная полоса длиной 20 ÷ 25 м на любой поверхности, за исключением водной.

Передвижной комплекс с МДПЛА и оптико-акустическим газоанализатором использовался для исследования переноса аммиака от сельскохозяйственных источников (животноводческих комплексов, удобряемых полей) и поглощения аммиака сельскохозяйственными культурами. Высотные профили концентраций аммиака определялись на шести уровнях в диапазоне высот от 40 м до 1 км при ясной погоде или до нижней кромки облаков (300 ÷ 400 м) в пасмурную погоду. Было обнаружено, что внутри слоя перемешивания (высотой H до 1 ÷ 1,5 км) имелся слой толщиной примерно 200 м на высоте около $1/2 H$, в котором происходил перенос аммиака от ближних источников. Путем ручного отбора пробы в шприцы исследовалось также распределение концентраций аммиака вдоль стеблестоя различных сельскохозяйственных культур и получены количественные оценки поглощения аммиака растениями из почвы и воздуха.

Выявленный в наших работах [18] характер поглощения аммиака растениями (линейность поглощения по отношению к физиологически активной радиации (ФАР), практическое отсутствие зависимости скорости поглощения от концентрации и т.д.), а также использование результатов работ по распространению примесей воздуха в растительном покрове [19] позволили нам получить аналитическое выражение для оценки скорости сухого выпадения аммиака из воздуха на растения [20]

$$V_d = \sqrt{K_H s} \cdot (A + BP),$$

где K_H [$\text{см}^2 \cdot \text{с}^{-1}$] – коэффициент турбулентного перемешивания на верхней границе растительного покрова; s [см^{-1}] – плотность вегетативных органов (отношение площади листьев к объему, занимаемому растениями); величина P – значение ФАР [$\text{Дж} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{час}^{-1}$].

Выражение $(A + BP)$ имеет размерность [$\text{см}^{1/2} \cdot \text{с}^{-1/2}$], значение коэффициентов варьируют в зависимости от видового состава растений. Используя это выражение для определения V_d , можно оценить величину нагрузки аммиачного азота на данное растительное сообщество, измерив концентрации аммиака над растительным покровом трассовым газоанализатором. Этот же подход, по-видимому, можно использовать и для других физиологически активных газов (NO_2 , SO_2 и т.д.).

Совместное использование стационарного и передвижного комплексов в городе позволит оперативно обнаруживать опасные уровни загрязнения атмосферного воздуха как интегрально на больших площадях масштаба городского района в толще с диапазоном высот 10 ÷ 100 м, так и дифференциально вблизи источников выброса с выделением приповерхностных уровней и интегральных количеств, переносимых потоками воздушных масс, а также определять высотные профили концентраций с помощью МДПЛА и лидаров. Оперативная регистрация повышенного уровня загрязнения в городе с помощью стационарных комплексов позволит отслеживать с помощью передвижных постов распространение загрязненных воздушных масс в сельскую местность и их эволюцию в процессе переноса.

Таким образом, структура из 3-х элементов: 1) стационарных специализированных постов вблизи особо опасных источников выброса; 2) стационарных комплексов для наблюдения за интегральными содержаниями широкого набора компонентов и 3) передвижных комплексов для определения потоков и пространственных распределений, в частности высотных профилей концентраций, – позволяет решать в перспективе следующие задачи мониторинга загрязнения атмосферы урбанизированных территорий:

- обнаружение превышения предельно допустимых норм для концентраций примесей и идентификация источников выброса загрязняющих веществ;
- отслеживание динамики состава атмосферы города и отдельных их районов с целью выявления физико-химической и фотохимической природы процессов, определяющих ее эволюцию при различных метеоусловиях для выбора оптимальной стратегии природоохранных мероприятий, контроля их эффективности и обеспечения краткосрочного прогноза загрязнения воздуха;

– определение потока загрязняющих веществ от источников выброса отдельных районов города и города в целом с целью определения вкладов источников выброса в общее загрязнение городской атмосферы, а также определения доли выбросов, вовлекаемой в дальний перенос;

– измерение высотных профилей примесей в воздушных массах, выносимых за пределы мегаполисов, с целью определения коэффициентов выведения примесей в ходе их дальнего переноса, нагрузок загрязняющих примесей, уточнения моделей физико-химической эволюции городской атмосферы.

Совокупность получаемых данных позволит решить также научные задачи по уточнению баланса углерода, азота, серы и других элементов в глобальных циклах с учетом их выноса с урбанизированных территорий и по определению антропогенного влияния на глобальные содержания в атмосфере парниковых газов.

1. Innes W. B. // *Envir. Sci. Technol.* 1981. V. 15. № 8. P. 904–912.
2. Nakamori Y., Savaragi Y. // *Atm. Environ.* 1984. V. 18. № 4. P. 793–799.
3. Langstaif J. et al. // *Atm. Environ.* 1987. V. 21. № 6. P. 1393–1410.
4. Shindo J., Oi K., Matsumoto J. // *Atm. Environ.* 1990. V. 24 B. № 2. P. 335–342.
5. Артёмов В. М. и др. // *Труды ИПГ имени акад. Е. К. Федорова.* 1986. Вып. 67. С. 80–86.
6. Артёмов В. М., Артёмов Е. М., Фридман Ш. Д. // *Труды ИПГ имени акад. Е. К. Федорова.* 1991. Вып. 78. С. 26–30.
7. Беккер Л. А. и др. // *Метеорология и гидрология.* 1987. № 9. С. 45–47.
8. Артёмов В. М., Николаев А. Н., Фридман Ш. Д. // *Первый международный семинар «Экология и спектроскопия» (10–15 июня 1991 г.). (Тезисы докл.).* Петрозаводск, 1991. С. 21–22.
9. Nakhutin A. I., Rakitin V. S. Some results of altitude open path carbon monoxide laser measurements in Moscow. – *Diode laser spectroscopy.* USSR Academy of Sciences. 1990. P. 222–229.
10. Бернштейн П. Б., Бойченко В. Л., Рождественская В. И., Фридман Ш. Д. // *Труды ИПГ имени акад. Е. К. Федорова.* Вып. 78. 1991. С. 109–123.
11. Ананьин А. А., Березовский В. В., Тимашов С. С. // *Первый международный семинар «Экология и спектроскопия» (10–15 июня 1991 г.). (Тезисы докл.).* Петрозаводск, 1991. С. 3–4.
12. O'Shea D. C., Dodge L. G. // *Appl. Opt.* 1974. V. 13. № 6. P. 1481–1486.
13. Перевозский И. А. // *Труды I Всесоюзной конференции «Методы и средства контроля промышленных выбросов и загрязнения атмосферы и их применение».* (19–21 марта 1984 г.). М: Гидрометеоздат, 1988. С. 197–200.
14. Николаев А. Н., Фридман Ш. Д. // *Труды ИПГ имени акад. Е. К. Федорова.* 1986. Вып. 67. С. 16–30.
15. Дедов В. А., Журавлева Н. Г., Легович Ю. С., Рождественская В. И. // *Труды ИПГ имени акад. Е. К. Федорова.* 1986. Вып. 67. С. 86–97.
16. Балясный Н. Д., Василенко В. Н., Вебра Э. Ю., Фридман Ш. Д. // *Труды ИПГ имени акад. Е. К. Федорова.* 1986. Вып. 67. С. 61–68.
17. Артёмов В. М., Артёмов Е. М., Фридман Ш. Д. // *Труды ИПГ имени акад. Е. К. Федорова,* 1991. Вып. 78. С. 40–46.
18. Artemov E. M., Artemov V. M., Fridman Sh. D. Investigation into ammonia dry depositions. *Special environmental report № 17.* WMO, № 724. 1989. P. 158–161.
19. Сиротенко О. Д., Бойко А. Р. // *Труды ИЭМ.* 1976. № 8 (67). С. 13–35.
20. Артёмов В. М., Артёмов Е. М., Фридман Ш. Д. Отчет по теме < Изучить дальний и трансграничный перенос загрязняющих воздух веществ и усовершенствовать методы их мониторинга>. М, 1990. ВИНТИ. № Гос. регистрации 0189, 002599-0. Инв. № 029, 10 048942.

Институт глобального климата и экологии РАН,
Москва

Поступила в редакцию
29 сентября 1992 г.

V. M. Artyomov, A. N. Nikolaev, Sh. D. Fridman. Remote Monitoring of Atmospheric Pollution and Plumes at Urban Territories.

The paper considers the peculiarities and difficulties of solving the specific problems of monitoring of pollution of atmospheric air of urban territories under conditions of limitedness of instrumental base of local measurements. The paper presents the examples of measurement of time behavior of pollution levels of atmospheric air in the cities and the suburbs as well as those of plumes of industrial centers with the use of airborne optical means including laser means of measurements and remote sampling.