ОСУЩЕСТВЛЕНИЕ МОНИТОРИНГА

DOI: 10.21513/0207-2564-2022-3-116-139

УДК504.3.054+551.586+551.588.74+57.045

К истории разработки дистанционных и экспрессных методов контроля загрязняющих веществ и парниковых газов в приземном слое атмосферы

B.M. Артёмов, E.M. Артёмов $^{l)}$, A.И. Нахутин $^{l)*}$, A.H. Николаев

Реферат. В работе представлен исторический обзор исследований в области разработки и применения дистанционных и экспрессных методов и аппаратуры контроля содержания загрязняющих и парниковых компонентов атмосферного воздуха в приземном слое атмосферы, проводившихся в 80-90х гг. ХХ в. в ИПГ и в начале 2000-х гг. в ИГКЭ. Приведены результаты применения трассовых лазерных систем, лидаров и локальных газоанализаторов для решения конкретных задач оперативного мониторинга качества атмосферного воздуха в г. Москве и в сельской местности. Представлены результаты применения пассивного корреляционного радиометра для контроля выбросов из труб тепловых электростанций и промышленных предприятий на обширных территориях с установкой радиометра на автомобиле или самолете. Приведены описания измерении выбросов промышленных предприятии в атмосферу с использованием средств пробоотбора, устанавливаемых на малоразмерных дистанционно пилотируемых летательных аппаратах, что позволяет устанавливать высотный профиль распределения переносимых от источников загрязнения примесей и дает возможность определять параметры выведения примесей из воздушных масс при их дальнем переносе.

Ключевые слова. Лазерный газоанализатор, лидар, автоматический газоанализатор, корреляционный радиометр, выбросы в атмосферу, оптикоакустический метод, малоразмерный дистанционно пилотируемый летательный аппарат, высотная станция, загрязнители атмосферы, парниковый газ, система мониторинга.

Development of remote and express methods and equipment for monitoring the content of atmospheric air components in the surface layer of the atmosphere

V.M. Artyomov, E.M. Artyomov¹⁾, A.I. Nakhutin^{1)*}, A.N. Nikolaev

¹⁾Yu. A. Izrael Institute of Global Climate and Ecology, 20B, Glebovskaya st., 107258, Moscow, Russian Federation

*Corresponding author: ainakh@rambler.ru

Институт глобального климата и экологии имени академика Ю.А. Израэля, Россия, 107258, Москва, Глебовская ул., 20Б

^{*} Адрес для переписки: ainakh@rambler.ru

Abstract. The paper presents a historical overview of the development and application of remote and express methods and equipment for monitoring the content of polluting and greenhouse components of atmospheric air in the surface layer of the atmosphere. This work was carried out in the 1980s and 1990s. in the Institute of Applied Geophysics (IPG), and in the early 2000s. in the Institute of Global Climate and Ecology (IGCE). The results of the application of trace laser systems, lidars and local gas analyzers for solving specific tasks of operational monitoring of atmospheric air quality in Moscow and in rural areas are presented. Examples of the use of a passive correlation radiometer installed on a car or airplane for monitoring emissions from pipes of thermal power plants and industrial enterprises in large areas are also presented. Examples are given for measurements of industrial enterprises' emissions to the atmosphere by using sampling devices installed on small remotely piloted aircraft which allows to measure altitude profiles of contaminants transferred from pollution sources and makes it possible to estimate the parameters of the pollutants removal from air masses during their long-distance transportation.

Keywords. Laser gas analyzer, lidar, automatic gas analyzer, correlation radiometer, optical-acoustic, small remotely piloted aircraft, altitude station, atmospheric pollutants, greenhouse gas, monitoring system.

Введение

К разработке методов контроля загрязнения приземной атмосферы с использованием лазерного источника излучения сотрудники Института прикладной геофизики имени академика Е.К. Федорова (ИПГ) приступили в 1971 г. Руководство этими работами осуществлял кандидат технических наук (впоследствии – доктор физ-мат. наук, профессор) Ш.Д. Фридман. Сразу же наметилась широта охвата проблемы в целом. Начался интенсивный сбор данных о спектрах основных атмосферных газов и малых примесей, включая расчет спектров поглощения молекул некоторых особенно важных компонентов, что по тем временам было непростым делом, учитывая уровень развития вычислительной техники в то время. Оценивались возможности различных вариантов измерительных устройств наземного, воздушного и космического базирования. Начата разработка оригинальных лазерных методов, основанных на использовании частотной и фазовой модуляции лазерного излучения и суливших достижение высокой чувствительности и избирательности измерений (Назаров и др., 1977; Назаров и др., 1983).

Впоследствии, на основании совокупности полученных в ходе этого цикла исследований и разработок результатов, была предложена схема функциональной структуры Общегосударственной службы наблюдения и контроля за уровнем загрязнения природной среды с использованием сочетания в этой структуре дистанционных и локальных средств измерения (Николаев и др., 1986; Николаев, Фридман, 1991).

Целью настоящей работы является исторический обзор проводившихся в ИПГ в 80-90-х гг. и в Институте глобального климата и экологии Росгидромета и РАН (в настоящее время — Институт глобального климата и экологии имени академика Ю.А. Израэля) в начале 2000-х гг. исследований по разработке дистанционных и экспрессных методов и экспериментальной аппаратуры для контроля содержания загрязняющих веществ и парниковых газов в приземном слое атмосферы, а также полученных в ходе этих исследований результатов, включая результаты практического применения методов и аппаратуры.

Разработка и применение трассовых газоанализаторов на основе CO₂-лазера

Первая разработка с конкретной целью определилась после переговоров с лабораторией контроля загрязнения окружающей среды в музееусадьбе Ясная Поляна (Артемов и др., 1993; Artyomov et al., 1993). Наиболее существенными загрязняющими газами для Ясной Поляны были названы сернистый газ и аммиак. Для их детектирования было решено разрабатывать систему на основе СО₂-лазера. С сернистым газом были, правда, проблемы и для его детектирования потом пришлось разрабатывать другую аппаратуру – на основе лазеров на красителе. Но система на аммиак, созданная Артемовым В.М. и Артемовым Е.М., оказалась очень эффективной не только при измерениях в Ясной Поляне. В дальнейшем она использовалась для измерений на территории мемориального комплекса «Горки Ленинские» и на опытных полях сельскохозяйственной академии.

При создании лазерной системы и ее дальнейшем совершенствовании были поставлены и решены принципиальные технические проблемы: активная стабилизация частоты и мощности излучения лазера, быстрая перестройка генерации излучения с одной длины волны на другую, формирование обратного сигнала с помощью зеркального уголкового отражателя и затем с помощью диффузного отражателя в виде грубо отшлифованной алюминиевой пластины. Порог обнаружения этого газоанализатора по аммиаку, этилену и озону составил соответственно 1, 2 и 6 млрд⁻¹км⁻¹. Расширенный набор детектируемых газов потенциально включал толуол, бензол, стирол, метанол, фреоны (-11, -12 и -113), этилацетат, перхлорэтилен, винилхлорид, фуран, силан, гидразин и другие газы и пары загрязняющих веществ. Все варианты конструкции трассовых газоанализаторов, разработанных в ИПГ, были рассчитаны на размещение в фургоне автомобиля ЗИЛ-131.

Вблизи Ясной Поляны природоохранными службами ранее 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 лазерной системой на трассе

длиной 500 м, идущей на высоте около 2 м, при различных направлениях ветра при его скорости более 1 м/с позволили выделить основной источник загрязнения — химкомбинат ЩПО «Азот». На рис. 1 показаны измеренные средние по трассе концентрации аммиака при различных направлениях ветра. Измерения проводились в 1981-1982 гг.

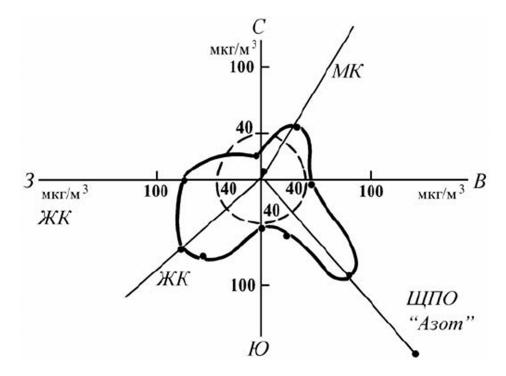


Рисунок 1. Распределение средних концентраций аммиака в атмосферном воздухе территории музея-усадьбы «Ясная Поляна» в зависимости от направления ветра и размещения источников выброса аммиака

ЖК – животноводческий комплекс; ЩПО «Азот» – химкомбинат; МК– Косогорский металлургический комбинат; штриховая кривая – среднесуточное значение ПДК (Артемов и др., 1993)

Figure 1. Distribution of average concentrations of ammonia in the atmospheric air of the museumestate «Yasnaya Polyana» depending on the direction of the wind and the location of ammonia emission sources

ЖК – livestock complex; ЩПО «A3om» – chemical plant; МК – Kosogorsky metallurgical plant; the dashed curve is the average daily MPC value

(Artyomov et al., 1993)

Источники выброса довольно легко идентифицировались по направлению ветра. Одна из таких ситуаций с существенным превышением уровня максимальной разовой предельно допустимой концентрации (ПДК) (200 мкг/ $\rm m^3 = 265 \rm mnpg^{-1}$) представлена на рис. 2. Расчет с использованием модели переноса загрязнения от источника выброса позволил оценить выброс аммиака в атмосферу за время этого эпизода величиной 0.5 т. Данные проведенных измерений послужили основой для принятия решений по перепрофилированию ЩПО «Азот». Его выброс был сокращен на порядок. Животноводческие

комплексы были убраны, была исключена опасность влияния удобряемых полей на растительность на территории музея-усадьбы.

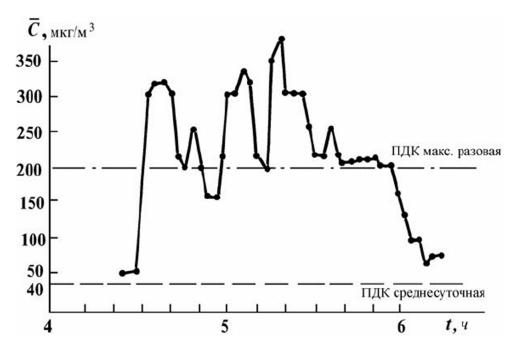


Рисунок 2. Временная динамика концентрации аммиака в атмосферном воздухе на территории музея-усадьбы «Ясная Поляна» (Артемов и др., 1993)

Figure 2. Temporal dynamics of ammonia concentration in the atmospheric air on the territory of the museum-estate «Yasnaya Polyana» (Artyomov et al., 1993)

На другом объекте – в музее-заповеднике «Горки Ленинские» – также отмечалось угнетение лесной растительности, связанное с повышенным уровнем концентрации аммиака в воздухе (Артемов и др., 1993; Artyomov et al., 1993). Потенциальными источниками предполагались Видненский коксогазовый, Московский нефтегазовый заводы, небольшая молочная ферма. В ходе измерений (1984 г.) при северо-западных ветрах был выявлен четко выраженный циклический характер изменения концентрации (рис. 3). Единственным предприятием, имеющим подобную цикличность технологического процесса в этом районе, являлся Видненский коксогазовый завод. 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.

Трассовый газоанализатор на основе CO_2 -лазера использовался также для измерений содержания озона в Москве во время Олимпиады 1980 г. (Артемов и др., 1993; Artyomov et al., 1993). Впервые было показано наличие озона в городе в летнее время на уровне, превышающем максимальную разовую ПДК. При измерениях в пос. Чимбулак — горном поселке вблизи Алма-Аты — был обнаружен вынос озона из города, где он образуется в смоговых ситуациях.

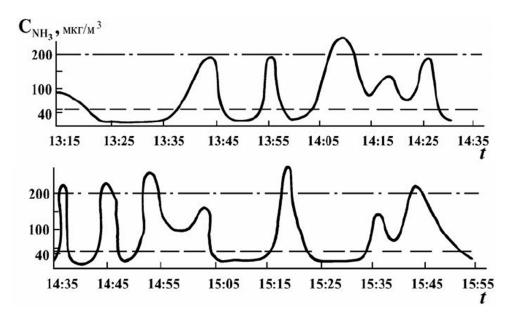


Рисунок 3. Временная динамика концентрации аммиака (сплошная линия) в атмосферном воздухе, полученная в районе заповедника «Горки Ленинские» Штрих-пунктирная линия – ПДК максимальная разовая, штриховая – ПДК среднесуточная (Артемов и др., 1993)

Figure 3. Temporal dynamics of ammonia concentration (solid line) in the atmospheric air in the area of the Gorki Leninskie nature reserve

The dashed-dotted line is the maximum one-time MPC, the dashed line is the average daily MPC

(Artyomov et al., 1993)

Высотная станция контроля загрязнения атмосферы в г. Москве

На опыте разработок и измерений, проведенных в ИПГ, а также по результатам анализа мирового опыта стало ясно, что стационарные посты на базе трассовых приборов могут быть эффективным средством непрерывного контроля уровня загрязнения атмосферного воздуха в городах. 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. Было решено искать место для комплексной лаборатории по разработке аппаратуры и методик и их практическому применению для наблюдений за динамикой загрязнения атмосферного воздуха в Москве.

Такое место было найдено А.А. Беккером (сотрудником Центральной высотной гидрометеорологической обсерватории при ИПГ), который на основании исследований в его лаборатории получил данные об ограниченности возможностей локальных средств измерений для организации оперативного мониторинга качества атмосферного воздуха в большом городе (Данилычев и др., 1987). В 1984 г. коллективом лаборатории Ш.Д. Фридмана была создана Высотная станция контроля загрязнения атмосферы (ВСКЗА) в Куйбышевском

районе г. Москвы. Станция была расположена в чердачном помещении жилого дома по адресу Б. Черкизовская, 20 на высоте 82 м (Беккер и др., 1987).

Первоначально предполагалось по инициативе А.А. Беккера расположить станцию в высотном здании на Котельнической набережной, но администрация здания категорически возражала против этого. И тогда А.А. Беккер нашел, как оказалось, идеальное помещение на Б. Черкизовской с возможностью почти кругового обзора из окон помещения станции дистанционными средствами измерений.

В составе станции в различные периоды времени функционировали (Артемов и др., 1993):

- лидарно-трассовая система на основе лазеров на красителе на диоксид серы;
 - трассовый газоанализатор на основе аргонового лазера на диоксид азота;
- два варианта трассового газоанализатора на основе полупроводникового диодного лазера (ПДЛ) на окись углерода;
 - трассово-кюветный газоанализатор на основе ПДЛ на диоксид углерода;
- одночастотный аэрозольный лидар в комплексе со счетчиком аэрозольных частиц;
 - трассовые корреляционные газоанализаторы на диоксиды серы и азота;
 - многокомпонентный трассовый газоанализатор на основе СО₂-лазера;
 - автоматические газоанализаторы на окислы азота, озон и окись углерода;
 - метеостанция.

Основные характеристики дистанционных газоанализаторов, работавших на ВСКЗА, представлены в табл. 1.

Таблица 1. Рабочие параметры дистанционных газоанализаторов на ВСКЗА

Table 1. Operating parameters of remote gas analyzers at the altitude station for monitoring atmospheric pollution

Приборы	Ингредиент	Длина волны	Длина трассы, м	Чувствитель- ность	Мощность (энергия импульса)
Лидарно-трассовая система на лазере на красителе с отраже- нием от стены здания	Диоксид серы	299.4 нм 300.01 нм	600	28 мкг/м ³ серия из 10 импульсов	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 Bt 0.2 Bt 0.9 Bt
Трассовая система на полупроводниковом диодном лазере с уголковым отражателем	Окись углерода	4.7 мкм	200	13 мкг/м ³	30 мкВт
Трассовая автоматизированная многокомпонентная система на CO_2 -лазере	10 ингредиентов одновременно NH ₃ , O_3 , C_2 H ₄ , C_6 H ₆ и др.	9.2-10.8 мкм	2000		0.05 мДж

Аэрозольный лидар двухча- стотный: горизонтальная и вер- тикальная трассы		0.53 мкм 1.06 мкм	1500		20 мДж 50 мДж
Трассовые корреляционные газоанализаторы	диоксид серы диоксид азота	0.3 мкм 0.45 мкм	до 1000	1 млн ⁻¹ •м	

Расположение станции давало возможность использовать трассы излучения в направлениях, пересекающих воздушные потоки от различных по характеру загрязнения районов города (рис. 4): ветры западных румбов переносили загрязнения из центральных районов города, северные ветры — относительно чистые воздушные массы со стороны Лосиного острова. Высоты наклонных трасс излучения относительно поверхности земли составляли 82-20 м.

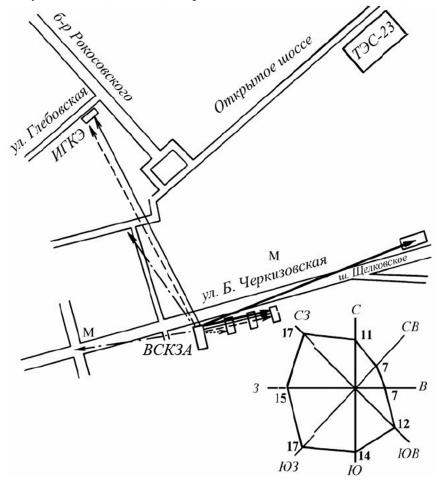


Рисунок 4. Схема трасс дистанционного лазерного зондирования на станции лазернооптического контроля загрязнения атмосферы в Москве и усреднения розы ветров для этого района:—> SO_2 ; —> O_3 , NH_3 , C_2H_4 и др.; ·····> CO; —> NO_2 ; —> аэрозоль (Артемов и др, 1993)

Figure 4. Scheme of remote laser sensing paths at the station for laser-optical monitoring of atmospheric pollution in Moscow and averaged wind rose for this area: \longrightarrow SO₂; \longrightarrow O₃, NH₃, C₂H₄, etc.; ······> CO; \longrightarrow NO₂; \longrightarrow aerosol (Artyomov et al., 1993)

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

Для детектирования диоксида серы использовалась лидарно-трассовая система на основе лазера на красителе с отражением лазерного сигнала от стены здания. Длина трассы длиной около 600 м, направление 3–В (рис. 4) с перепадом высот 82-45 м. Измерения проводил Новоселов А.Н. (Беккер и др., 1987). В дневном ходе концентрации диоксида серы (рис. 5) максимум отмечался в середине дня при западном направлении ветра в солнечную погоду (приподнятая инверсия, развитая турбулентность).

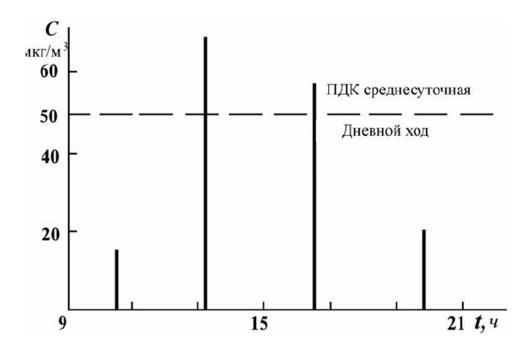


Рисунок 5. Дневной ход изменения концентрации диоксида серы в атмосферном воздухе на трассе 600 м вдоль улицы Б. Черкизовская (Беккер и др., 1987)

Figure 5. Daily course of the concentration of sulfur dioxide in the atmospheric air on the 600 m path along Bolshaya Cherkizovskaya street (Bekker et al., 1987)

Такой результат можно объяснить влиянием приземных источников выбросов, главным образом – автотранспорта.

В сезонном ходе средних за период дневных измерений концентраций диоксида серы (рис. 6) 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.

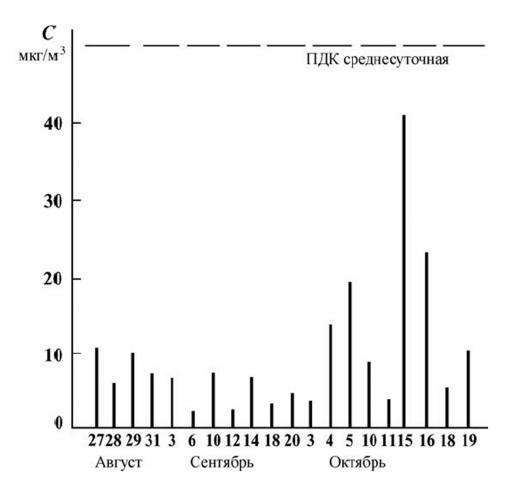


Рисунок 6. Сезонный ход изменений концентраций диоксида серы в атмосферном воздухе *Вертикальные линии* — *усредненные дневные измерения* (Беккер и др., 1987)

Figure 6. Seasonal changes in sulphur dioxide concentrations in atmospheric air Vertical lines – averaged daily measurements (Bekker et al., 1987)

Измерения концентрации диоксида азота проводились, начиная с 1985 г., Николаевым А.Н. с использованием трассовой системы на основе аргонового лазера на трассах с уголковым отражателем длиной около 600 м (направление 3–В, перепад высот 82-45 м), 1000 м (направление Ю–С, перепад высот 82-20 м) и 2000 м (направление Ю–С, перепад высот 82-45 м). Измерения на трассе длиной 600 м проводились в весенне-летний период 1986 г. при переменной облачности в сухую погоду при ветрах западного, северо-западного, южного и юго-восточного направлений. Измерения на трассах 1 и 2 км проводились зимой.

В суточных ходах (рис. 7) отмечалось наличие регулярно воспроизводящихся максимумов в 11, 13-14, 15 и 18 ч местного времени (Артемов и др., 1993; Artyomov et al., 1993), аналогичных тем, которые наблюдались также в г. Атланта (США) в сходных погодных условиях (O'Shea, Dodge, 1974) и в измерениях с помощью трассового корреляционного газоанализатора в г. Москве (Перевозский,

1988). Происхождение максимумов можно связать с интенсивностью движения автотранспорта и ходом фотохимических процессов в атмосфере.

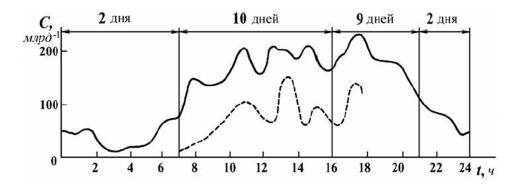


Рисунок 7. Усредненный по нескольким дням суточный ход концентрации диоксида азота при ветрах западного направления в весенне-летний период сплошная линия – Москва, май-июль 1986 г.; штриховая – Атланта, США, 27.10.72 г.

сплошная линия — Москва, май-июль 1986 г.; штриховая — Атланта, США, 27.10.72 г (Артемов и др., 1993)

Figure 7. Averaged over several days diurnal variation of nitrogen dioxide concentration in westerly winds in the spring-summer period

solid line - Moscow, May-July 1986; bar line - Atlanta, USA, 27.10.1972 (Artyomov et al., 1993)

Также наблюдалось 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 Института физики атмосферы (ИФА АН СССР) отмечена корреляция понижения концентрации диоксида азота с увеличением высоты слоя перемешивания около 12 ч дня.

C использованием трассовой автоматизированной многокомпонентной системы на основе CO_2 -лазера были проведены пробные замеры концентраций озона, аммиака, этилена, бензола, фреонов, силана и других компонентов (Ананьин и др., 1991).

В измерениях концентрации окиси углерода (проведены Нахутиным А.И; часть измерений выполнена совместно с сотрудником ИФА АН СССР Ракитиным В.С.) была обнаружена корреляция с интенсивностью движения автотранспорта, направлением ветра и стратификацией атмосферы, а также накопление окиси углерода вблизи основания слоя инверсии (рис. 8). Превышений ПДК не наблюдалось.

По обнаруженному росту дисперсии результатов с ростом концентрации предложен метод определения регионального фона, как такой концентрации, для которой дисперсия в отдельном измерении (серия из 120 импульсов) стремится к нулю. Для окиси углерода на северо-востоке Москвы это значение составило 0.2 млн⁻¹ (рис. 9). Возможности использования полученных результатов обсуждались в публикации (Fridman et al., 1993).

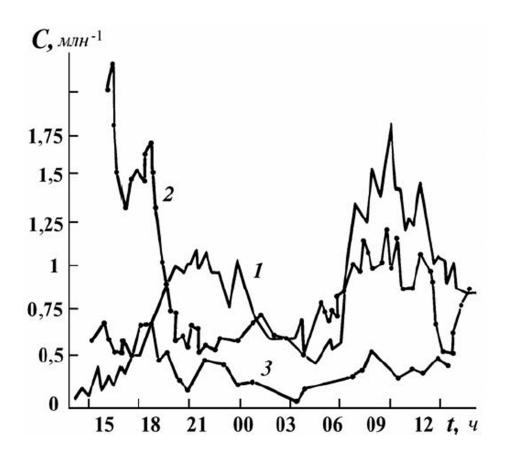


Рисунок 8. Суточный ход концентрации окиси углерода кривая 1 – приподнятая инверсия, западный и юго-западный ветер; 2 – приподнятая инверсия, итиль; 3 – северо-западный ветер (Нахутин, Ракитин, 1990)

Figure 8. Diurnal variation of carbon monoxide concentration curve 1 – elevated inversion, west and south-west wind, 2 – raised inversion, calm, 3 – north-west wind (Nakhutin, Rakitin, 1990)

Суточные ходы коэффициента экстинкции аэрозоля измерялись одночастотным аэрозольным лидаром на основе твердотельного Nd:YAG-лазера. Одновременно оптическим счетчиком числа частиц измерялась счетная концентрация аэрозоля, также проводилось синхронное измерение влажности. Измерения проведены Бернштейном П.Б., Бойченко В.Л., Рождественской В.И. (Бернштейн и др., 1991).

Кроме измерений с использованием лазерных систем на ВСКЗА проводились также регулярные измерения концентраций окиси углерода, окислов азота и озона с использованием локальных автоматических газоанализаторов.

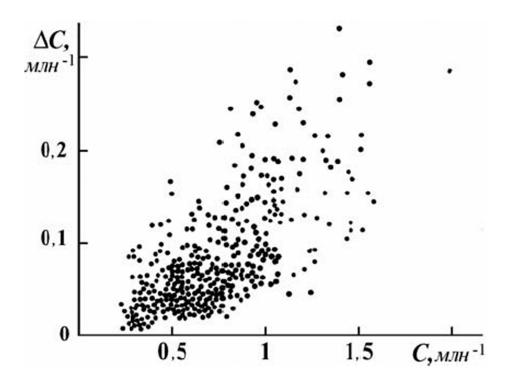


Рисунок 9. Зависимость дисперсии результатов измерения окиси углерода от средней концентрации (Нахутин, Ракитин, 1990)

Figure 9. Dependence between the carbon monoxide measurement dispersion and its average concentration (Nakhutin, Rakitin, 1990)

Окись азота является одним из основных загрязняющих компонентов атмосферы города Москвы. Источник выброса – автотранспорт. Содержание NO в воздухе Москвы во многих случаях значительно превышает предельно допустимую концентрацию. В атмосфере происходит быстрое доокисление NO до NO₂ при значительном влиянии присутствия в атмосферном воздухе озона. Хемилюминесцентные газоанализаторы (8840"Monitor Labs" и 14 В/Е "ThermoElectron") использовались для одновременных измерений NO, NO₂ и NO_х на высотах 3 м и 82 м над уровнем земли. Отношение концентраций $[NO_2]$: $[NO_x]$ на высоком уровне во всех случаях было больше, чем на низком уровне, за исключением дней с ветрами из лесопарковой зоны Москвы. Результаты позволили оценить скорость преобразования NO в NO2 при условии, что источники выбросов NO2 расположены на поверхности (автомобильный транспорт). Среднее значение скорости преобразования NO в NO₂ составило по результатам измерений 1.24±0.57 ч⁻¹. Она определялась через количественное изменение концентрации [NO2] за время переноса воздуха с нижнего уровня 3 м на верхний уровень 82 м вследствие турбулентной диффузии (Nikolayev et al., 1995).

Это значение может быть использовано для модельных расчетов содержания NO_2 в городском воздухе. Выявленные тенденции в степени конверсии NO в NO_2 в зависимости от сезонов и смены дня на ночь способствуют повышению достоверности оценки выбросов NO_2 в Москве и других городах.

При проведении круглосуточных измерений концентраций NO, NO₂, NO_X на высотах 82 и 3 м, а также концентрации CO, измеряемой электрохимическим газоанализатором на высоте 82 м (Nikolayev et al., 1995), было отмечено почти синхронное изменение концентраций NO_X и CO, что указывает на единство источников выбросов этих компонентов.

Содержание озона измерялось на ВСКЗА с использованием оптического анализатора озона модели 1008-АН DASIBI. Особые условия сложились в Москве летом 2002 г. Почти весь июль и начало августа 2002 г. в Москве держалась аномально высокая температура при малом количестве осадков. Такие условия способствуют образованию повышенных уровней приземного озона, иногда превышающих безопасные нормы, установленные нормативными документами. Наблюдения на ВСКЗА проводились одновременно с наблюдениями ИФА РАН на территории метеостанции МГУ (к юго-западу от центра Москвы и Центральной аэрологической обсерваторией (ЦАО) Росгидромета на станции Долгопрудный в лесопарковой зоне Москвы (около 20 км к северу от центра Москвы). Расстояния между пунктами наблюдений МГУ-ВСКЗА, МГУ-ЦАО и ВСКЗА-ЦАО составляют 16.5, 24 и 18 км, соответственно.

Совместные измерения (Звягинцев и др., 2004) показали, что общий дневной ход изменения концентрации озона в атмосферном воздухе для всех трех пунктов, а также положения и значения максимумов в середине дня и минимумов утром и вечером в значительной степени совпадали. В условиях температуры около 30°C и безветрия или слабого ветра приземные концентрации озона достигали 140 млрд⁻¹ и более. Частично эта ситуация была обусловлена горением лесов и торфяников, вызвавших появление смога в Москве в период 30 июля – 2 августа; другая часть была обусловлена, по-видимому, неблагоприятными метеорологическими условиями и автомобильными выбросами. Было показано, что для эффективного прогнозирования высоких уровней приземного озона следует использовать аэрологические параметры, характеризующие процессы переноса в нижней тропосфере.

На рис. 10 представлены результаты совместных измерений на BCK3A содержания озона, оксида азота и диоксида азота в 2002 г.

В результатах измерений отчетливо проявляется изменение в противофазе содержаний озона и диоксида азота. Соответствующие кривые выглядят почти как зеркальные отражения одна другой.

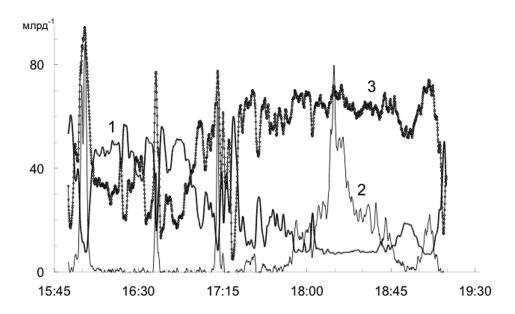


Рисунок 10. Временной ход приземного отношения смеси озона (1), оксида азота (2) и диоксида азота (3) в пункте наблюдений на ВСКЗА в 2002 г. (Звягинцев и др., 2004)

Figure 10. Temporal dynamics of near-surface mixing ratio of ozone (1), nitrogen oxide (2), and nitrogen dioxide (3) at the altitude station for monitoring atmospheric pollution observation point in 2002 (Zvyagincev et al., 2004)

Аппаратура и методики измерения концентраций компонентов вблизи источников их выброса и потоков выбрасываемых компонентов из этих источников

Интегральная информация, получаемая с помощью стационарных комплексов, может быть дополнена измерениями с передвижных постов, оснаприборами щенных пассивными корреляционными основе монохроматора с маской, интерференционно-поляризационного или газового фильтра). Начиная с 1979 г., в ИПГ использовался пассивный корреляционный газофильтровый прибор модели RAMS (Radiometrea modulation selective) производства французской фирмы Есороl, регистрирующий рассеянное небом солнечное излучение и предназначенный для измерения интегрального содержания сернистого газа вдоль линии визирования прибора (Николаев и др., 1981). Интегрирование по пути сканирования (за счет поворота прибора или проезда с ним под областью загрязнения) дает интегральное содержание детектируемого компонента в поперечном сечении факела выброса. При умножении на среднюю по сечению факела скорость ветра получаем 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.

Данным методом были измерены выбросы диоксида серы крупными ГРЭС на территории Европейской части СССР, а также ТЭС Москвы и Еревана (Николаев, Фридман, 1986; Артемов, и др.1993; Artyomov et al., 1993). Результаты представлены на рис. 11.

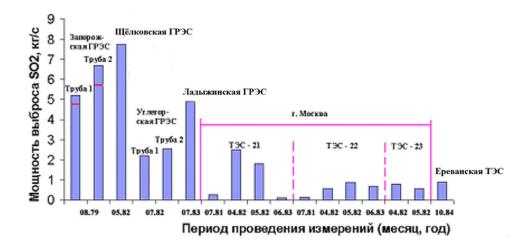


Рисунок 11. Сравнение выбросов сернистого газа некоторыми ГРЭС и ТЭС по результатам измерений фильтровым радиометром RAMS (Артемов и др., 1993)

Figure 11. Comparison of sulfur dioxide emissions by some state district power plants and thermal power plants based on the results of measurements with a RAMS filter radiometer (Artyomov et al., 1993)

Точность единичного измерения — около 30%. Повышение точности измерений достигалась путем увеличения числа сканирований. Время одного сканирования на расстоянии 1 км от труб составляет примерно 1 мин. Измерения выброса сернистого газа радиометром RAMS проводились также в ГДР на тепловых электростанциях вблизи г. Виттенберг. Немецкие специалисты были потрясены совпадением результатов измерений выброса с результатами их расчетных оценок с разницей в десятые доли процента и готовы были начать совместную разработку новой модели прибора с предлагаемыми нами улучшениями. RAMS устанавливался также на самолете Ил-14. Был измерен выброс Балхашского металлургического комбината, составивший по данным измерений 7.5 кг/с (по данным Ежегодника загрязнения воздуха – 9.1 кг/с).

Значительно расширить диапазон детектируемых ингредиентов с определением их потоков от источников можно за счет совмещения измерений корреляционным прибором с отбором проб в факеле с использованием малоразмерного дистанционно пилотируемого летательного аппарата (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. Разработчиками метода отбора проб с МДПЛА являлись Балясный Н.Д., Василенко В.Н. и

Горохов А.А. (Балясный и др., 1986). МДПЛА изготавливал А.А. Горохов. Позже к этой работе подключились сотрудники Московского авиационного института.

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. Участие в проведении замеров передвижной лаборатории с лазерным оптико-акустическим газоанализатором (Артемов и др. 1993; Artyomov et al., 1993) давало возможность оперативно проводить анализ отобранных проб, что существенно для анализа нестабильных веществ. Пределы обнаружения: по аммиаку – 0.5 млрд⁻¹, по этилену – 1 млрд⁻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 пробы – 1 с, число транспортируемых пробоотборников – девять. Для взлета и посадки достаточно было свободного пространства в пределах 100 м и ровной полосы 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 (Артемов и др., 1991). Высотные профили концентраций аммиака определялись на шести уровнях в диапазоне высот от $40\,\mathrm{m}$ до $1\mathrm{km}$ при ясной погоде или до нижней кромки облаков ($300\text{-}400\,\mathrm{m}$) в пасмурную погоду. Было обнаружено, что внутри слоя перемешивания (высотой H до $1\text{-}1.5\,\mathrm{km}$) имелся слой толщиной примерно $200\,\mathrm{m}$ на высоте около 1/2H, в котором происходил перенос аммиака от ближних источников. Путем ручного отбора проб исследовалось также распределение концентраций аммиака вдоль стеблестоя различных сельскохозяйственных культур и получены количественные оценки поглощения аммиака растениями из почвы и воздуха. Таким же способом измерялись высотные профили концентраций метана над свалками отходов.

Выявленный характер поглощения аммиака растениями (линейность поглощения по отношению к физиологически активной радиации, практическое отсутствие зависимости скорости поглощения от концентрации и т. д.), а также использование результатов работ по распространению примесей воздуха в растительном покрове позволили вывести получившее международное признание аналитическое выражение для оценки скорости сухого выпадения аммиака из воздуха на растения, связывающее с коэффициентом турбулентного перемешивания на верхней границе растительного покрова, плотностью вегетативных органов (отношение площади листьев к объему, занимаемому растениями) и значением физиологически активной радиации (Артемов и др. 1993; Artyomov et al., 1993).

Установка для трассово-кюветного анализа содержания диоксида углерода в атмосферном воздухе была разработана Нахутиным А.И. в сотрудничестве со специалистами Физического института им. П.Н. Лебедева (Ю.В. Ко-

сичкин, А.Н. Перов, А.И. Надеждинский, Н.Ю. Окунцев), полупроводниковые диодные лазеры для нее были созданы в Институте общей физики АН СССР под руководством И.И. Засавицкого. Установка могла быть использована на атмосферных микротрассах длиной порядка первых десятков сантиметров и в кюветном варианте для анализа предварительно отобранных проб воздуха (Засавицкий и др., 1985; Нахутин и др., 1986). Основные характеристики: рабочая длина волны 4.18-4.23 мкм, мощность излучения 50 мкВт, оптическая длина кюветы 11 см, диапазон измеряемых концентраций 0.2- 5×10^3 млн⁻¹. На практике установка применялась в кюветном варианте для исследования содержания СО2 в городском воздухе и его накопления при различных состояниях атмосферы (Засавицкий и др., 1988; Нахутин, Фридман и др., 1986; Nakhutin et al., 1987). Наземный пробоотбор осуществлялся методом автомобильной маршрутной съемки в Москве и Московской области (с пересечением шлейфа выбросов города с подветренной стороны), авиационный – при облете г. Москвы на высоте 150 м над Московской кольцевой автодорогой. Анализировались также пробы, отобранные на Московской и Ташкентской телебашнях. Был впервые измерен суточный ход концентрации двуокиси углерода на одной из крупных автомагистралей Москвы и установлена его связь с интенсивностью транспортного потока.

С 1991 г. исследования по данной тематике перешли во вновь образованный Институт глобального климата и экологии Росгидромета и РАН (ИГКЭ). Однако в связи с известными происходившими в России событиями их финансирование Росгидрометом иссякло. Попытки заинтересовать другие ведомства или организации, в том числе Государственный комитет по чрезвычайным ситуациям – предшественника нынешнего МЧС России – также не увенчались успехом. Участвовавшие в работах сотрудники переходили на другую тематику или в другие организации, и постепенно исследования были свернуты. Дальнейшего развития в ИГКЭ они не получили. Не были также реализованы перспективы разработки и внедрения в системы мониторинга серийных образцов аппаратуры на основе разработанных в ходе данной работы экспериментальных образцов приборов и установок. В последующие годы дистанционные и экспрессные методы мониторинга содержания примесей в атмосферном воздухе и соответствующая аппаратура разрабатывались и применялись уже другими организациями в России и за рубежом. Особенно следует отметить интенсивное развитие аэрокосмических методов мониторинга.

Заключение

В ходе проведенных исследований были получены существенные результаты и накоплен значительный опыт разработки дистанционных и экспрессных методов и экспериментальной аппаратуры для контроля содержания загрязняющих веществ и парниковых газов в приземном слое атмосферы. В стационарных и полевых условиях выполнялись натурные измерения концентраций загрязняющих веществ, их временного хода, величины выбросов из источников. Полученные данные не только представляли научный интерес,

но и находили практическое применение в природоохранной деятельности. Была впервые создана и успешно работала высотная станция контроля загрязнения атмосферы в г. Москве, на которой лазерными и оптическими методами проводились наблюдения таких приоритетных веществ как SO₂, NO₂, CO, атмосферных аэрозолей и др. Разработан и успешно применялся на практике передвижной лазерно-трассовый анализатор NH₃ и O₃ и другие экспериментальные образцы аппаратуры. Полученные в ходе исследования результаты позволили сделать вывод о том, что комплексирование стационарных специализированных постов вблизи особо опасных источников выброса, стационарных комплексов для наблюдения за интегральными содержаниями широкого набора компонентов, передвижных систем для определения потоков и пространственных распределений, в частности, высотных профилей концентраций и локальных автоматических газоанализаторов в единой структуре создает возможность эффективно решать ряд задач мониторинга загрязнения атмосферы урбанизированных территорий.

Список литературы

Ананьин, А.А., Березовский, В.В., Тимашов, С.С. (1991) Трассовый дистанционный многокомпонентный газоанализатор на основе CO_2 -лазера, Первый Международный семинар "Экология и спектроскопия. Мониторинг окружающей среды". Тезисы докладов, Петрозаводск, с. 3-4.

Артемов, В.М., Артёмов, Е.М., Фридман, Ш.Д. (1991) Опыт применения лазерного газоанализа для контроля источников аммиака, в сельском хозяйстве и промышленности, *Труды ИПГ*, вып. 78, с. 40-46.

Артемов, В.М., Николаев, А.Н., Фридман, Ш.Д. (1993) Дистанционный мониторинг загрязнения атмосферы и выбросов на урбанизированных территориях, *Оптика атмосферы и океана*, т. 6, № 2, с. 130-143.

Балясный, Н.Д., Василенко, В.Н., Вебра, Э.Ю., Фридман, Ш.Д. (1986) Исследование промышленных выбросов с помощью радиоуправляемых моделей, *Труды ИПГ*, вып. 67, с. 61-68.

Беккер, А.А., Назаров, И.М., Фридман, Ш.Д., Николаев, А.Н., Чёрненький, В.И., Гафаров, Р.Г., Новосёлов, А.Н., Янушевский, А.С. (1987) Исследования загрязнения атмосферы в Москве с помощью лазеров, *Метеорология и гидрология*, № 9, с. 47-55.

Бернштейн, П.Б., Бойченко, В.Л., Рождественская, В.И., Фридман, Ш.Д. (1991) Опыт измерений аэрозольных загрязнений в г. Москве с помощью одночастотного лидара, $Tpy\partial \omega \ U\Pi\Gamma$, вып. 78, с. 109-123.

Данилычев, И.А., Беккер, А.А., Смекалова, Е.Д. (1987) Некоторые результаты статистического анализа данных измерений концентраций сернистого ангидрида и окиси углерода на стационарных постах наблюдений. Москва, *Тр. ЦВГМО*, вып. 19 (2), с. 97-104.

Засавицкий, И.И., Косичкин, Ю.В., Нахутин, А.И., Окунцев, Н.Ю., Перов, А.Н., Шотов, А.П. (1985) Применение диодных лазеров для измерения содержания двуокиси углерода в атмосфере, *Препринт ИОФАН*, № 14, 30 с.

Засавицкий, И.И., Нахутин, А.И., Фридман, Ш.Д., Шотов, А.П. (1988) Исследование антропогенной составляющей потоков углекислого газа в городах с помощью лазерного газоанализатора, *Труды ИПГ*, вып. 71, с. 162-169.

Звягинцев, А.М., Беликов, И.Б., Егоров, В.И., Еланский, Н.Ф., Крученицкий, Г.М., Кузнецова, И.Н., Николаев, А.Н., Обухова, З.В., Скороход, А.И. (2004) Положительные аномалии приземного озона в июле-августе 2002 г. в Москве и ее окрестностях, Изв. РАН. Физика атмосферы и океана, т. 40, № 1, с. 75-86.

Назаров, И.М., Николаев, А.Н., Фридман, Ш.Д. (1977) Дистанционные и экспрессные методы определения загрязнения окружающей среды, М., Гидрометеоиздат, 194 с.

Назаров, И.М., Николаев, А.Н., Фридман, Ш.Д. (1983) *Основы дистан- ционных методов мониторинга загрязнения природной среды*, Л., Гидрометеоиздат, 280 с.

Нахутин, А.И., Окунцев, Н.Ю., Перов, А.Н. (1986) Установка для анализа углекислого газа на перестраиваемых полупроводниковых лазерах, в кн: Вопросы гелиогеофизики и контроля природной среды, М., Гидрометеоиздат, с. 114-119.

Нахутин, А.И., Ракитин, В.С. (1990) Некоторые результаты лазерных измерений окиси углерода на высотной атмосферной трассе в г. Москве, в кн: Диодная лазерная спектроскопия, М., АН СССР. Отд. Общей физики и астрономии. Научн. совет по спектроскопии, с.222-228.

Нахутин, А.И., Фридман, Ш.Д., Засавицкий, И.И., Косичкин, Ю.В. (1986) Использование анализатора атмосферного CO_2 на основе диодных лазеров для определения потоков от крупных антропогенных источников, *Проблемы фонового мониторинга состояния природной среды*, вып. 4, Л., Гидрометеоиздат, с. 131-140.

Николаев, А.Н., Пегоев, А.Н., Фетисова, Е.И., Фридман, Ш.Д. (1981) Дистанционные измерения содержания сернистого газа в выбросах труб тепловых электростанций с помощью радиометра корреляционного типа, в кн.: Вопросы контроля загрязнения природной среды, Л., Гидрометеоиздат, с. 174-180.

Николаев, А.Н., Рождественская, И.И., Фридман, Ш.Д. (1986) Дистанционные методы контроля загрязнения атмосферного воздуха в системе ОГСНК, *Труды ИПГ*, вып. 67, с. 5-15.

Николаев, А.Н., Фридман, Ш.Д. (1986) Наблюдения факелов с помощью корреляционного радиометра, *Труды ИПГ*, вып. 67, с. 16-30.

Николаев, А.Н., Фридман, Ш.Д. (1991) Применение дистанционных средств измерения на стационарных и передвижных постах городской сети контроля атмосферных загрязнений, *Труды ИПГ*, вып. 78, с. 3-11.

Перевозский, И.А. (1988) Измерение содержания диоксида азота в атмосфере города корреляционным спектрометром, *Труды I Всесоюз. конф.* "Методы и средства контроля промышленных выбросов и загрязнения атмосферы и их применение", 19-21 марта 1984 г., М., с. 197-201.

Artyomov, V.M., Artyomov, E.M., Gorokhov, A.A., Koval, A.K., Nakhutin, A.I., Nikolayev, A.N., Novosyolov, A.N., Friedman, Sh.D. (1993) A complex of laser measurement devices for the ecological monitoring of the atmospheric air in the urban territory, SPIE vol. 2107, *Optical monitoring of the Environment*, pp. 420-436.

Nakhutin, A.I., Fridman, Sh.D., Zasavitskym, I.I., Shotovm, A.P., Klinovm, F.Ya. (1987) Weather conditions and vertical distributions of carbon dioxide in towns, *Proc. of the WMO conference on air pollution modelling and its applications: Techn. Document WMO/TD № 187*, vol. III, pp. 244-248.

Nikolayev, A.N., Abramovsky, B.P., Fridman, S.D., Krasa, A.N. (1995) Nitrogen oxides contents in the city of Moscow at different height levels, *European Symposium on Optics for Environmental and Public Safety. 19-23 June 1995*, Munich. Proc., no. 2506.

O'Shea, D.C., Dodge, L.G. (1974) NO₂ concentration measurements in an urban atmosphere using differential absorption technique, *Appl. Opt.*, vol.13, no. 6, pp.1481-1486.

Fridman, S.D., Volkov, L.O., Nakhutin, A.I., Nikolayev, A.N. (1993) Methodological aspects and some results of urban pollution monitoring by remote and local sensing, *International Symposium on Environmental Sensing*. 22-26 June 1992, Berlin, Proc. of the SPIE, vol. 1716, pp. 148-156.

References

Anan'in, A.A., Berezovskij, V.V., Timashov, S.S. (1991) Trassovyj distancionnyj mnogokomponentnyj gazoanalizator na osnove SO2-lazera [A trace remote multicomponent gas analyzer based on a CO2 laser], *Pervyj Mezhdunarodnyj seminar "Ekologiya i spektroskopiya. Monitoring okruzhayushchej sredy"*, Tezisy dokladov, Petrozavodsk, Russia, pp. 3-4.

Artyomov, V.M., Artyomov, E.M., Fridman, Sh.D. (1991) Opyt primeneniya lazernogo gazoanaliza dlya kontrolya istochnikov ammiaka vsel'skom hozyajstve i promyshlennosti [Experience in the application of laser gas analysis for the control of ammonia sources in agriculture and industry], *Trudy IPG*, issue 78, pp. 40-46.

Artyomov, V.M., Nikolaev, A.N., Fridman, Sh.D. (1993) Distancionnyj monitoring zagryazneniya atmosfery i vybrosov na urbanizirovannyh territoriyah

[Remote monitoring of atmospheric pollution and emissions in urbanized areas], *Optika atmosfery i okeana*, vol. 6, no. 2, pp. 130-143.

Balyasnyj, N.D., Vasilenko, V.N., Vebra, E.Yu., Fridman, Sh.D. (1986) Issledovanie promyshlennyh vybrosov s pomoshch'yu radio upravlyaemyh modelej [Research of industrial emissions using radio-controlled models], *Trudy IPG, i*ssue 67, pp. 61-68.

Bekker, A.A., Nazarov, I.M., Fridman, Sh.D., Nikolaev, A.N., Chyornen'kij, V.I., Gafarov, R.G., Novosyolov, A.N., Yanushevskij, A.S. (1987) Issledovaniya zagryazneniya atmosfery v Moskve s pomoshch'yu lazerov [Studies of atmospheric pollution in Moscow using lasers], *Meteorologiya i gidrologiya*, no. 9, pp. 47-55.

Bernshtejn, P.B., Bojchenko, V.L., Rozhdestvenskaya, V.I., Fridman, Sh.D. (1991) Opyt izmerenij a erozol'nyh zagryaznenij v g. Moskve s pomoshch'yu odnochastotnogo lidara [The experience of measuring aerosol pollution in Moscow using a single-frequency lidar], *Trudy IPG, issue* 78, pp. 109-123.

Danilychev, I.A., Bekker, A.A., Smekalova, E.D. (1987) Nekotorye rezul'taty statisticheskogo analiza dannyh izmerenij koncentracij sernistogo angidrida i okisi ugleroda na stacionarnyh postah nablyudenij [Some results of statistical analysis of measurement data of concentrations of sulfur dioxide and carbon monoxide at stationary observation posts], *Tr. CVGMO*, issue 19(2), pp. 97-104.

Zasavitskiy, I.I., Kosichkin, Yu.V., Nakhutin, A.I., Okuntsev, N.Yu., Perov, A.N., Shotov, A.P. (1985) Primenenie diodnykh l azerov dlya izmerenia soderzhaniya dvuokisi ugleroda v atmosphere. [Application of diode lasers for measurement the content of carbon dioxide in the atmosphere], *Preprint, IOFAN*, no. 14, 30 c.

Zasavitskiy, I.I., Nakhutin, A.I., Fridman, Sh.D., Shotov, A.P. (1988) Issledovaniye antropogennoy sostavlyaushei potokov uglekislogo gaza v gorodah s pomoshyu lazernogo gazoanalizatora. [Study of the anthropogenic component of carbon dioxide flows in cities using a laser gas analyzer], *Trudy IPG*, vol. 71, pp. 162-169.

Zvyagincev, A.M., Belikov, I.B., Egorov, V.I., Elanskij, N.F., Kruchenickij, G.M., Kuznecova, I.N., Nikolaev, A.N., Obuhova, Z.V., Skorohod, A.I. (2004) Polozhitel'nye anomalii prizemnogo ozona v iyule-avguste 2002 g. v Moskve i ee okrestnostyah [Positive anomalies in the surface ozone concentration in July-August 2002 over Moscow and its suburbs], *Izv. RAN. Fizika atmosfery i okeana*, vol. 40, no. 1, pp. 75-86.

Nazarov, I.M., Nikolaev, A.N., Fridman, Sh.D. (1977) *Distancionnye i ekspressnye metody opredeleniya zagryazneniya okruzhayushchej sredy* [Remote and express methods for determining environmental pollution], Moscow, Russia, 194 p.

Nazarov, I.M., Nikolaev, A.N., Fridman, Sh.D. (1983) *Osnovy distancionnyh metodov monitoringa zagryazneniya prirodnoj sredy* [Fundamentals of remote methods for monitoring environmental pollution], Leningrad, Russia, 280 p.

Nakhutin, A.I., Okuntsev, N.Yu., Perov, A.N. (1986) *Ustanovka dly aanaliza uglekislogo gaza na perestraivaemyh diodnyh lazerah* [Installation for the analysis of carbon dioxide on tunable semiconductor lasers], Questions of heliogeophysics and control of the natural environment, Gidrometeoizdat, Moscow, Russia, p. 114-119.

Nakhutin, A.I., Rakitin, V.S. (1990) *Nekotoryere zultaty lazernykh izmereniy okisi ugleroda na vysotno iatmosphernoi trasse v g. Moskve* [Some results of the carbon monoxide laser measurements obtained at the altitude atmospheric path in Moscow], Diodnaya lazernaya spectroscopiya, AN SSSR. Otd. obsheyfiziki I astronomii Nauchn Sovet po pectroskopii, Moscow, Russia, pp. 222-228.

Nakhutin, A.I., Fridman, Sh.D., Zasavitskiy, I.I., Kosichkin, Yu.V. (1986) Ispol'zovaniye analizatora atmosfernogo CO_2 na osnove diodnykh lazerov dlya opredeleniya potokov ot krupnyh antropogennyh istochnikov [Use of an atmospheric CO_2 analyzer based on diode lasers to determine fluxes from large anthropogenic sources], Problemy fonovogo monitoringa sostoyaniya prirodnojs redy, issue 4, Gidrometeoizdat, Leningrad, Russia, p. 131-140.

Nikolaev, A.N., Pegoev, A.N., Fetisova, E.I., Fridman, Sh.D. (1981) Distancionnye izmereniya soderzhaniya sernistogo gaza v vybrosah trubteplovyh elektrostancij s pomoshch'yu radiometra korrelyacionnogo tipa [Remote measurements of the sulfur dioxide content in the emissions of pipes of thermal power plants using a correlation-type radiometer], Voprosy kontrolya zagryazneniya prirodnoj sredy, Leningrad, Russia, pp. 174-180.

Nikolaev, A.N., Rozhdestvenskaya, I.I., Fridman, Sh.D. (1986) Distancionnye metody kontrolya zagryazneniya atmosfernogo vozduha v sisteme OGSNK [Remote methods of monitoring atmospheric air pollution in the system of the National Service for Monitoring and Controlling the level of environmental pollution], *Trudy IPG*, issue 67, pp. 5-15.

Nikolaev, A.N., Fridman, Sh.D. (1986) Nablyudeniya fakelov s pomoshch'yu korrelyacionnogo radiometra [Observations of torches using a correlation radiometer], *Trudy IPG*, issue 67, pp. 16-30.

Nikolaev, A.N., Fridman, Sh.D. (1991) Primenenie distancionnyh sredstv izmereniya na stacionarnyh i peredvizhnyh postah gorodskoj seti kontrolya atmosfernyh zagryaznenij [The use of remote measuring instruments at stationary and mobile posts of the urban network for monitoring atmospheric pollution], *Trudy IPG*, issue 78, pp. 3-11.

Perevozskij, I.A. (1988) Izmerenie soderzhaniya dioksida azota v atmosphere goroda korrelyacionnym spektrometrom [Measurement of the nitrogen dioxide content in the city's atmosphere with a correlation spectrometer], *Trudy I Vsesoyuz. konf.* "Metody i sredstva kontrolya promyshlennyh vybrosov i zagryazneniya atmosfery i ih primenenie". 19-21 marta 1984 g., pp. 197-201.

Artyomov, V.M., Artyomov, E.M., Gorokhov, A.A., Koval, A.K., Nakhutin, A.I., Nikolayev, A.N., Novosyolov, A.N., Friedman, Sh.D. (1993) A complex of

laser measurement devices for the ecological monitoring of the atmospheric air in the urban territory, SPIE vol. 2107, *Optical monitoring of the Environment*, pp. 420-436.

Nakhutin, A.I., Fridman, Sh.D., Zasavitskym, I.I., Shotovm, A.P., Klinovm, F.Ya. (1987) Weather conditions and vertical distributions of carbon dioxide in towns, *Proc. of the WMO conference on air pollution modelling and its applications: Techn. Document WMO/TD № 187*, vol. III, pp. 244-248.

Nikolayev, A.N., Abramovsky, B.P., Fridman, S.D., Krasa, A.N. (1995) Nitrogen oxides contents in the city of Moscow at different height levels, *European Symposium on Optics for Environmental and Public Safety. 19-23 June 1995*, Munich. Proc., no. 2506.

O'Shea, D.C., Dodge, L.G. (1974) NO₂ concentration measurements in an urban atmosphere using differential absorption technique, *Appl. Opt.*, vol.13, no. 6, pp. 1481-1486.

Fridman, S.D., Volkov, L.O., Nakhutin, A.I., Nikolayev, A.N. (1993) Methodological aspects and some results of urban pollution monitoring by remote and local sensing, *International Symposium on Environmental Sensing*. 22-26 June 1992, Berlin, Proc. of the SPIE, vol. 1716, pp. 148-156.

Статья поступила в редакцию (Received): 20.12.2021. Статья доработана после рецензирования (Revised): 24.10.2022.

Для цитирования / For citation

Артёмов, В.М., Артёмов, Е.М., Нахутин, А.И., Николаев, А.Н., (2022) К истории разработки дистанционных и экспрессных методов контроля загрязняющих веществ и парниковых газов в приземном слое атмосферы, Экологический мониторинг и моделирование экосистем, т. XXXIII, № 3-4, с. 116-139, DOI: 10.21513/0207-2564-2022-3-4-116-139.

Artyomov, V.M., Artyomov, E.M., Nakhutin, A.I., Nikolaev, A.N. (2022) The interrelated ness of best available techniques and best environmental practices: a case of municipal wastewater treatment plant, *Ecological monitoring and ecosystem modelling*, т. XXXIII, № 3-4, pp. 116-139, DOI:10.21513/0207-2564-2022-3-4-116-139.