

УДК 551.510.4

## НАБЛЮДЕНИЯ СОСТАВА АТМОСФЕРЫ НАД РОССИЕЙ: ЭКСПЕРИМЕНТЫ TROICA

© 2021 г. Н. Ф. Еланский<sup>а, \*</sup>, Г. С. Голицын<sup>а</sup>, П. Й. Крутцен<sup>б</sup>,  
И. Б. Беликов<sup>а</sup>, К. А. М. Бреннинкмайер<sup>б</sup>, А. И. Скороход<sup>а</sup>

<sup>а</sup>Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Пыжевский пер., 3, Москва, 109017 Россия

<sup>б</sup>Институт химии Макса Планка, Йоахим Бехер Вег, 27, Майнц, 55128 Германия

\*e-mail: n.f.elansky@mail.ru

Поступила в редакцию 30.05.2020 г.

После доработки 06.07.2020 г.

Принята к публикации 14.10.2020 г.

В статье подводятся итоги проведения уникальных экспериментов по наблюдениям состава и состояния атмосферы над Россией (эксперименты TROICA). В работах участвовали ученые и техники из разных стран. Основной частью экспериментов являлось проведение измерений содержания газовых примесей и аэрозолей в атмосфере, ее метеорологических и радиационных характеристик на передвижной лаборатории, которая была специально сконструирована и построена для проведения трансконтинентальных наблюдений на сети электрифицированных железных дорог России. В ходе экспедиционных работ с участием передвижной лаборатории, наблюдений на научных станциях и в полевых экспериментах был собран большой объем информации, который продолжает анализироваться. В статье обсуждаются опубликованные ранее наиболее важные результаты и новые, полученные в последнее время, что позволяет сформировать целостную картину пространственного распределения и временной изменчивости состава атмосферы над обширной территорией Северной Евразии.

**Ключевые слова:** TROICA, состав атмосферы над Северной Евразией, качество воздуха, трансграничный перенос загрязнений, газовые примеси, аэрозоли, летучие органические соединения, озоноразрушающие вещества, эмиссии загрязняющих примесей

DOI: 10.31857/S0002351521010041

### 1. ВВЕДЕНИЕ

В последние несколько десятилетий загрязнение окружающей среды превратилось в глобальную экологическую проблему. Величайшие научные открытия, уникальные технологии и инженерные проекты индустриальной эры определили, с одной стороны, новое качество жизни человека, а с другой стороны, поставили ее под угрозу существования из-за достигнутого критического уровня загрязнения окружающей среды.

Одной из наиболее серьезных проблем является загрязнение атмосферы. Как следствие, ухудшается качество воздуха (особенно в крупных городах), изменяются радиационный режим и климат Земли. Экономический рост в мире сопровождается увеличением выбросов в атмосферу парниковых газов, химически активных и токсичных соединений, стойких органических загрязнителей и аэрозолей. К сожалению, начавшиеся в мире в 90-е годы бурное развитие исследований в области химии атмосферы и организация глобальной системы мониторинга состава атмосферы под эгидой Всемир-

ной метеорологической организации практически не затронули Россию [1–3]. Более того, заметно ухудшилось состояние действующих с 60-х годов станций мониторинга загрязнения атмосферного воздуха в городах, уменьшилось количество станций, выполнявших наблюдения по Программе трансграничного переноса загрязнений, отложено участие России в программе глобального мониторинга атмосферы (GAW WMO). В это сложное для страны время П.Й. Крутцен – Нобелевский лауреат по химии (с М. Молиной и Ф.С. Роуландом), директор Института химии атмосферы Макса Планка (MPIAC) – и Г.С. Голицын – директор Института физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН – инициировали и поддержали средствами Института проведение в ноябре–декабре 1995 г. международной экспедиции по наблюдению состава и состояния атмосферы над территорией России на передвижной железнодорожной лаборатории по маршруту Москва–Хабаровск–Москва. ВНИИ железнодорожного транспорта Министерства путей сообщения РФ (ВНИИЖТ) предоставил вагон-лабораторию и обеспечил его движение



**Рис. 1.** Передвижная лаборатория TROICA в полном составе (из 2 вагонов) (вверху). Внутренний вид вагона-обсерватории с автоматизированным комплексом для измерения состава атмосферы (внизу).

по Транссибирской магистрали. Экспедиция в составе сотрудников ИФА им. А.М. Обухова РАН Н.Ф. Еланского, А.С. Елохова, И.Б. Беликова и Б.С. Денисова, проведенная в ноябре–декабре 1995 г. в сложных условиях (морозы до  $-35^{\circ}\text{C}$ ), показала, что наблюдения на передвижной лаборатории, расположенной непосредственно за электровозом, передвигающейся по электрифицированной железной дороге, дают достоверные данные о химическом составе и термодинамическом состоянии как загрязненной, так и фоновой атмосферы [4].

Впоследствии подобные экспедиции с участием иностранных ученых проводились ежегодно до 2001 г. на более комфортабельном вагоне-лаборатории [5, 6]. Экспедиционные исследования сочетались с наблюдениями на научных станциях и в полевых условиях. По предложению П.И. Крутца эти комплексные эксперименты получили название *Transcontinental Observations Into the Chemistry of the Atmosphere* (TROICA). Благодаря активному участию в работе сотрудников МРИАС, существенно увеличилось количество измеряемых газовых примесей, и начались измерения изотопного состава  $\text{CO}$  и  $\text{CH}_4$ . Сотрудничество с Научно-исследовательским физико-химическим институтом им. Л.Я. Карпова (НИФХИ) расширило возможности аэрозольных исследований. Позднее к работам подключились специалисты из лаборатории исследований земной системы (ESRL

NOAA), Университета Хельсинки (УН), Финского метеорологического института (FMI).

В 2003 г. на Торжокском вагоностроительном заводе по разработанной с участием ИФА им. А.М. Обухова РАН и ВНИИЖТ технической документации была построена специализированная передвижная лаборатория (рис. 1). Она состояла из двух вагонов: один из них был предназначен для непрерывных измерений концентрации газовых примесей и аэрозолей, радиационных и метеорологических параметров, дистанционного зондирования атмосферы, второй являлся лабораторией для контроля радиоактивного загрязнения, химического анализа проб воздуха, воды, почвы, растительности и обеспечения работ в экстремальных экологических ситуациях. Во втором вагоне также размещался специально оборудованный автомобиль для отбора проб и проведения измерений вдали от железной дороги [7].

С 1995 по 2010 гг. было проведено 15 экспериментов TROICA с участием ученых из российских и зарубежных научных центров (табл. 1). Большая часть наблюдений на передвижной лаборатории выполнена вдоль Транссиба (рис. 2). Несколько меридиональных разрезов сделано по маршруту Москва–Мурманск–Кисловодск (или Сочи)–Москва. В рамках эксперимента TROICA-6 в апреле–мае 2000 г. комплексные исследования состояния региональной атмосферы с участием вагона-лаборатории и автомобильной лаборатории

**Таблица 1.** Расписание и маршруты экспериментов TROICA (1995–2010 гг.)

| Экспедиция | Период работы    | Маршрут  |
|------------|------------------|--|
| TROICA-1   | 1995 17.11–2.12  | Н. Новгород–Хабаровск–Москва                       |
| TROICA-2   | 1996 26.07–13.08 | Н. Новгород–Владивосток–Москва                     |
| TROICA-3   | 1997 1.04–14.04  | Н. Новгород–Хабаровск–Москва                       |
| TROICA-4   | 1998 17.02–7.03  | Н. Новгород–Хабаровск–Н. Новгород                  |
| TROICA-5   | 1999 26.06–13.07 | Н. Новгород–Хабаровск–Москва                       |
| TROICA-6   | 2000 6.04–25.06  | Москва–Мурманск–Кисловодск–Мурманск–Москва         |
| TROICA-7   | 2001 27.06–10.07 | Москва–Хабаровск–Москва                            |
| TROICA-8   | 2004 19.03–1.04  | Москва–Хабаровск–Москва                            |
| TROICA-9   | 2005 04.10–18.10 | Москва–Владивосток–Москва                          |
| TROICA-10  | 2006 04.10–7.10  | Объезд вокруг Москвы                               |
| TROICA-11  | 2007 22.07–5.08  | Москва–Владивосток–Москва                          |
| TROICA-12  | 2008 21.07–4.08  | Москва–Владивосток–Москва                          |
| TROICA-13  | 2009 9.10–23.10  | Москва–Владивосток–Москва                          |
| TROICA-14  | 2010 26.05–24.06 | Москва–Мурманск–Адлер–Мурманск–Москва              |
| TROICA-15  | 2010 7.12–10.12  | Москва–Н. Новгород–С.-Петербург–Н. Новгород–Москва |

проводились на Северном Кавказе. При этом одновременно в районе г. Кисловодска на разных высотных уровнях в переходный период от зимы к лету велись стационарные измерения газовых примесей и аэрозоля. В подобный переходный период (на Севере – в мае–июне) исследования региональной атмосферы были проведены на Кольском полуострове. В октябре 2006 г. сделан 3-х кратный объезд по электрифицированной областной окружной железной дороге вокруг Москвы (средний радиус ~70 км) и двукратное пересечение города через его центр (TROICA-10). В ходе эксперимента TROICA-5 были проведены измерения с корабля, прошедшего 2000 км от Новосибирска вниз по реке Оби в район интенсивной добычи нефти и газа [7, 8].

В настоящей статье опубликованные ранее наиболее важные результаты дополнены новыми, полученными в последнее время, что позволяет сформировать подробную картину состояния атмосферы над значительной частью территории Северной Евразии.

## 2. ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС И КАЧЕСТВО ДАННЫХ

В течение первых четырех лет созданный для передвижной лаборатории измерительный комплекс постепенно модернизировался. В основном, его формирование было завершено к 1999 г. (TROICA-5), и позднее он только дополнялся отдельными измерительными приборами [5]. В состав штатного оборудования входили следующие приборы и устройства:

– приборы для непрерывных измерений приземной концентрации  $O_3$ , NO,  $NO_2$ , CO,  $CO_2$ ,  $CH_4$ ,  $SO_2$ ,  $NH_3$ , суммы неметановых углеводородов (NMHC),  $^{222}Rn$ , концентрации и микрофизи-

ческих свойств аэрозоля (включая сажевый и биологический аэрозоль); вертикального профиля температуры (0–600 м), потоков солнечной УФ, В и ИК радиации, метеорологических параметров;

– приборы для дистанционных измерений общего содержания и вертикальных профилей  $O_3$  и  $NO_2$ , повышенной концентрации  $NO_2$  в шлейфах промышленных предприятий, расположенных на некотором удалении от железной дороги;

– устройства для отбора проб воздуха, аэрозолей, почвы и растительности;

– приборы для трехмерной навигации, управления измерительным комплексом, сбора данных и передачи их в реальном времени в центр данных, видео регистрации состояния окружающей местности и условий наблюдений.

В каждой экспедиции использовались уникальные приборы, принадлежащие нашим коллегам из других организаций: многоканальный газовый хроматограф для измерения содержания озоноразрушающих и парниковых газов (ESRL NOAA, США), протонный масс-спектрометр для измерения летучих органических соединений (MPIAC), ионный хроматограф, измерители подвижности ионов и другие аэрозольные приборы (UH, FMI) и многие другие. Все данные наблюдений и навигационные параметры были собраны в базе данных. В этой базе содержится информация о всех объектах и условиях наблюдений, которая практически непрерывно в течение всех маршрутов заносилась операторами в электронный дневник. В ней также хранятся изображения окружающей местности, которые записывались каждые 5 с с видеокамер, расположенных по обеим сторонам вагона-лаборатории.

Для облегчения работы с большими объемами данных был создан специальный интерфейс базы

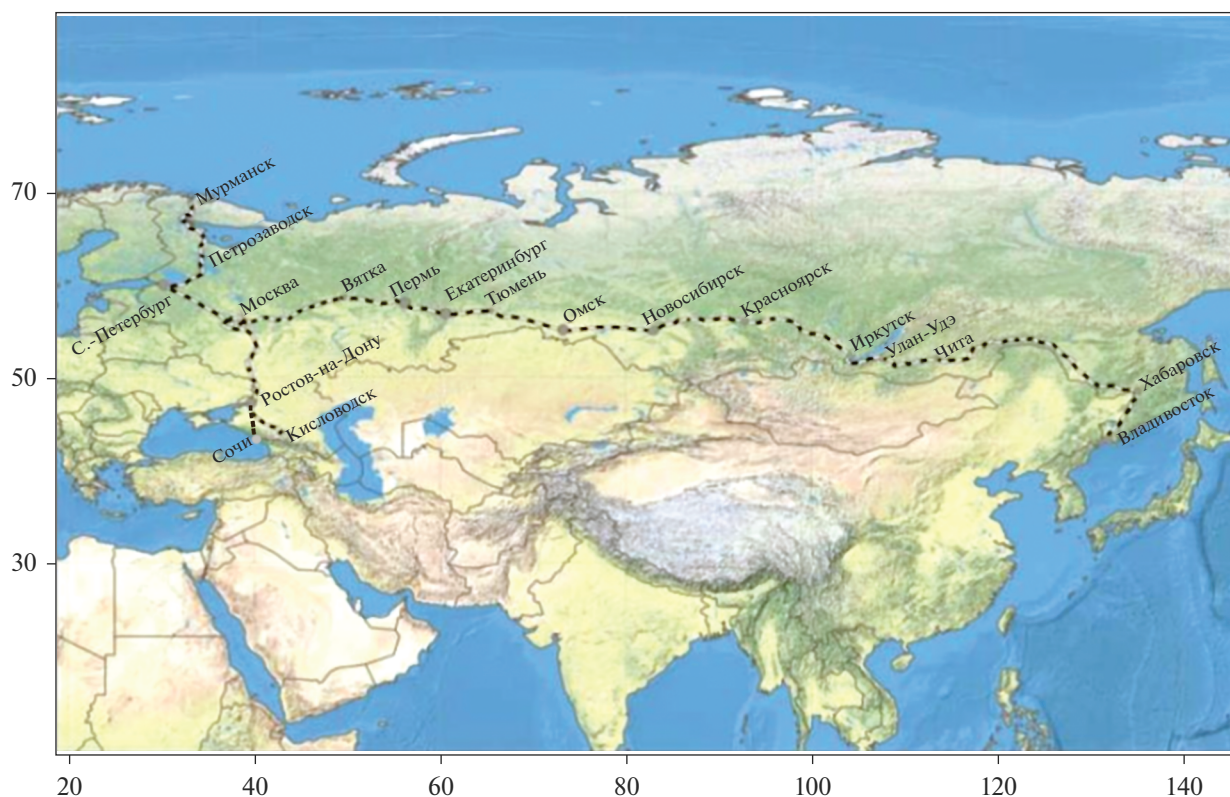


Рис. 2. Схема маршрутов экспедиций TROICA.

данных. Он позволял по соотношению концентраций различных примесей и метеоданным выделять участки маршрута, проходящие по загрязненной городской или промышленной территории, сельской местности и в чистых фоновых условиях. Проведенные детальные исследования качества данных [9, 10] показали незначительное влияние электровоза, непосредственно за которым располагалась лаборатория, и изменения скорости движения. Непродолжительное влияние встречных поездов на результаты измерений некоторых компонентов (в основном, грубодисперсного аэрозоля) легко исключалось с помощью специально разработанных процедур.

Поскольку большинство измерений проводилось с частотой 10 с, то наблюдения на передвижной лаборатории позволяют выявлять особенности состава и состояния атмосферы различных масштабов: от континентальных до нескольких десятков метров.

### 3. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПРИМЕСЕЙ НАД КОНТИНЕНТОМ

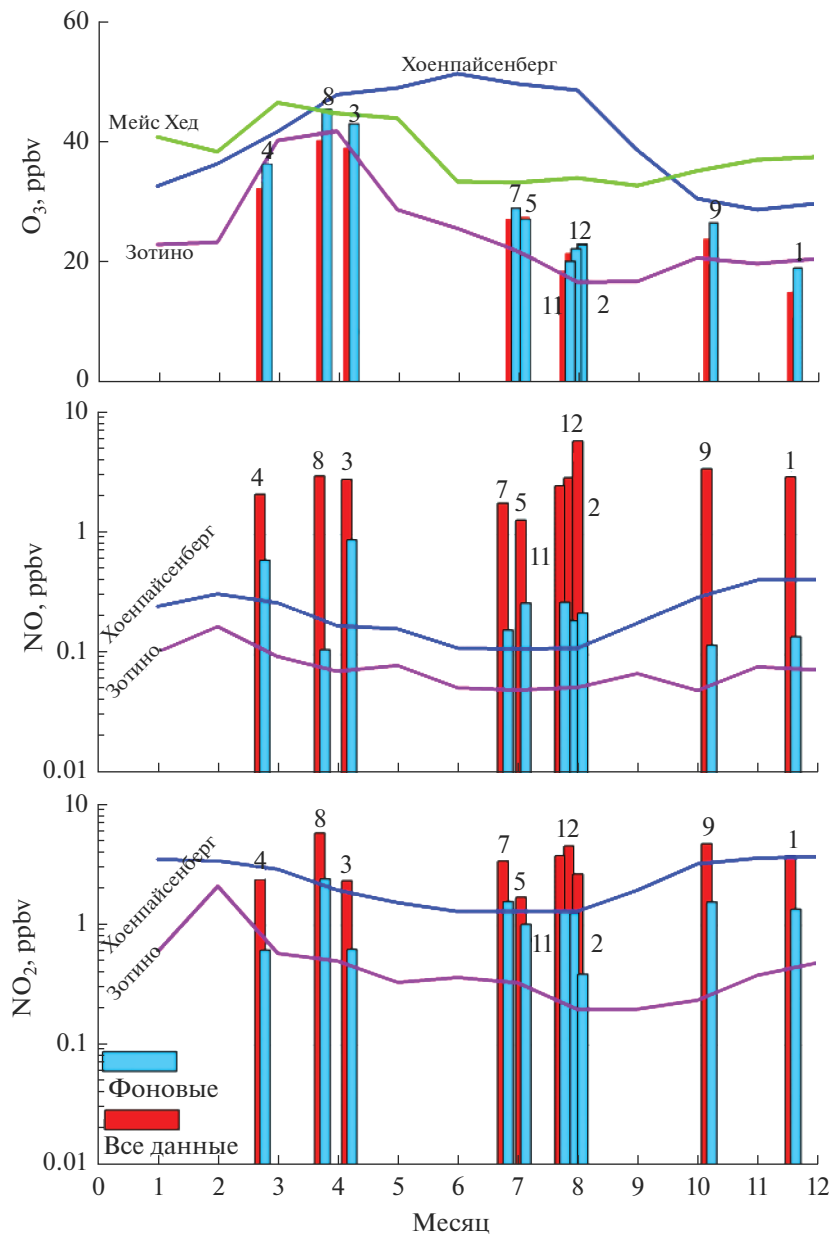
#### 3.1. Озон

Измерениям приземной концентрации озона уделялось особое внимание. Во всех 15 экспедициях с участием передвижной лаборатории, на

стационарных наблюдательных пунктах и в полевых условиях измерения  $O_3$  проводились одновременно двумя-тремя приборами. Большой объем собранных данных позволил выявить неизвестные ранее особенности пространственной и временной изменчивости озона над континентом. Подробные результаты этих исследований представлены в [11–15] и некоторых других публикациях.

Концентрация  $O_3$  между Москвой и Владивостоком, осредненная по всем данным и по данным, полученным в незагрязненных условиях, ниже, чем на фоновых станциях Европы, но несколько выше, чем на фоновой сибирской станции Зотино ( $60.75^\circ$  с.ш.,  $89.35^\circ$  в.д.), расположенной в удаленной местности значительно севернее Транссиба (рис. 3). В холодный период года распределение среднесуточных значений  $O_3$  вдоль всего маршрута близко к однородному. В теплый период отмечается рост его концентрации к востоку. Временные вариации  $O_3$  определяются адвекцией чистого воздуха из Арктики и температурными инверсиями, которые в центре континента особенно частые и интенсивные. Были проведены специальные исследования такой Сибирской аномалии озона с самолета-лаборатории Як-40 и продолжительные наблюдения озона и его предшественников на высотной (301 м) мачте





**Рис. 3.** Средние концентрации  $O_3$ ,  $NO$  и  $NO_2$  (цифрами обозначены номера экспедиций TROICA) в сравнении с содержанием этих газовых примесей на станциях Хоенпайсенберг, Мейс Хед и Зотино, рассчитанные по всем данным и для незагрязненных (фоновых) условий.

на станции Зотино [16]. Они показали, что борельные леса Сибири являются стоком для тропосферного озона. Этот результат подтвержден численным моделированием состояния атмосферы над Северной Евразией с помощью лагранжевой модели FLEXPART. Заметное воздействие на поле  $O_3$  оказывают фотохимические процессы в загрязненном воздухе и в шлейфах лесных и степных пожаров, а также стратосферные вторжения. Совокупным действием этих факторов объясняется увеличение концентрации озона при пересечении континента с Запада на восток [8, 14].

В экспериментах TROICA проводились измерения общего содержания и вертикального распределений  $O_3$  и  $NO_2$  до высоты 40–50 км над регионами, не охваченными стационарной глобальной сетью атмосферного мониторинга. Вертикальные профили  $O_3$  и  $NO_2$  рассчитывались по спектрам поглощения рассеянного в зените солнечного излучения, которые измерялись непрерывно по мере движения лаборатории. Вычислительный алгоритм основывался на разработанной в ИФА модели МСС++ [17, 18]. Полученные данные использовались для валидации результатов зондиро-

вания состава атмосферы с космических аппаратов OMI, SCIAMACH, GOMOS, GOME II.

### 3.2. Оксиды азота

Средние по экспедициям концентрации NO и NO<sub>2</sub> приведены на рис. 3. В незагрязненных условиях летом они примерно совпадают с концентрациями на высокогорной фоновой европейской станции Хоенпайсенберг, осенью и зимой — намного меньше. Осреднение по всем данным, включая полученные в городах и их шлейфах, показывает существенно более высокие концентрации, чем в чистых условиях. Характерной особенностью распределения NO и NO<sub>2</sub> вдоль Транссиба является наличие многочисленных, локализованных по пространству пиков их концентрации, которые вызваны эмиссиями от антропогенных источников [13, 19]. Наиболее протяженные области повышенного содержания NO и NO<sub>2</sub> наблюдаются при движении лаборатории вдоль шлейфов загрязненного воздуха от городов. Протяженность таких шлейфов в среднем составляет несколько десятков километров. В зимних условиях в устойчивом или нейтральном пограничном слое атмосферы шлейфы NO и NO<sub>2</sub> от крупных городов регистрировались на протяжении 300–400 км.

Превышение концентрации NO<sub>2</sub> в загрязненных условиях существенно меньше, чем аналогичное превышение NO, т.к. NO является преобладающим компонентом эмиссий NO<sub>x</sub> (NO<sub>x</sub> = NO + NO<sub>2</sub>), в то время как большая часть NO<sub>2</sub> образуется в атмосфере при взаимодействии NO с O<sub>3</sub>. Сезонный цикл NO<sub>x</sub>, осредненный по всему маршруту, не ярко выражен, суточный цикл NO<sub>x</sub> также ослаблен в данном широтном поясе. В то же время заметно проявляется суточный ход NO в малых и средних городах как результат дневного сжигания топлива для приготовления пищи и отопления в частных домовладениях. Заметным источником NO<sub>x</sub> весной и осенью являются горение сухой травы вблизи населенных пунктов и сжигание отходов сельскохозяйственного производства. Максимальные концентрации NO и NO<sub>2</sub> регистрировались в шлейфах лесных пожаров в окрестностях Транссиба. Данные наблюдений NO и NO<sub>2</sub> использовались также для верификации численных химико-транспортных моделей и изучения пространственно-временной изменчивости состава атмосферы над Евразией [20, 21].

### 3.3. Углеродсодержащие соединения CO, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>

Большая часть соединений углерода имеет природное происхождение. Чтобы выявить антропогенный вклад, в особенности в удаленных районах, необходимо, чтобы измерительные приборы имели высокую чувствительность. Поэтому в

экспериментах TROICA использовались приборы, измеряющие фоновые концентрации CO, CO<sub>2</sub> и CH<sub>4</sub> с погрешностью ±10 ppb, ±1 ppm и ±5 ppb соответственно. На рис. 4 показаны пространственные градиенты CO, CO<sub>2</sub> и CH<sub>4</sub> в холодное и теплое время года. Как видно на рисунке, распределение CO по континенту в холодные периоды практически равномерно [22–25]. Небольшое увеличение средних значений в данной широтной зоне наблюдается на тех участках маршрута, которые включают большие города и их шлейфы. Зональный градиент концентрации CO, равный 0.6 ppb/град в восточном направлении, четко выражен в Сибири в теплые периоды. Этот градиент связан с почти регулярным в это время горением биомассы в Восточной Сибири, Приморском крае и Северо-Восточном Китае. Средняя концентрация CO в холодный период составляет 0.21 ± 0.03 ppm, в теплый период — 0.12 ± 0.02 ppm. Сезонные изменения определяются стоком CO в реакции с OH, которого в средних широтах летом значительно больше, чем зимой. Пространственная изменчивость CO наибольшая зимой, что объясняется более высокой стабильностью атмосферного пограничного слоя (АПС) и неоднородным распределением антропогенных источников CO вдоль Транссиба.

Пространственное распределение CO<sub>2</sub> (рис. 4) в холодные периоды также практически однородно [22, 25]. Зимой изменчивость CO<sub>2</sub> небольшая, значения концентрации в начале 2000-х годов (TROICA-3–8) находились в пределах 380–400 ppm. Летом активная биосфера вносит существенные изменения в пространственно-временную изменчивость CO<sub>2</sub>, особенно значительную при наличии приземных температурных инверсий. Средняя летняя концентрация CO<sub>2</sub> в данном широтном поясе по наблюдениям в период 1997–2004 гг. равна 376 ppm. Превышение зимних уровней CO<sub>2</sub> над летними показывает, что биосфера в России на этих широтах является стоком CO<sub>2</sub>. Тем не менее, летние пики в CO<sub>2</sub> (например, при ночных температурных инверсиях или в районах горения биомассы) часто превышают средний зимний уровень CO<sub>2</sub>. Анализ суточных изменений CO<sub>2</sub> показал, что наиболее высокие его концентрации наблюдаются в ночное время летом, когда эмиссии от растительности и почвы наиболее интенсивны, а перемешивание слабое, что приводит к накоплению CO<sub>2</sub> в АПС особенно значительному при ночных температурных инверсиях. В урбанизированных районах под инверсиями также происходит заметное накопление CO<sub>2</sub>, но антропогенного происхождения.

Наблюдаемые в холодное время года неоднородности распределения концентрации CH<sub>4</sub> (рис. 4) обусловлены, как и в случае CO, действием ан-

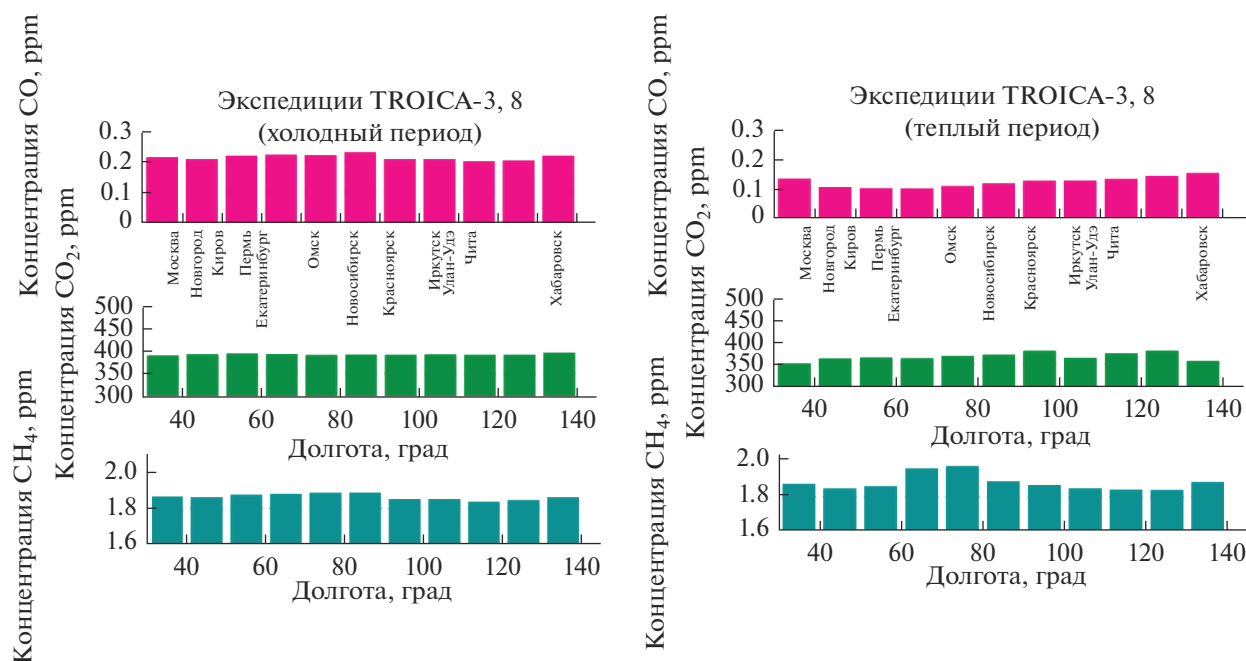


Рис. 4. Пространственное распределение концентраций CO, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> над континентом в холодный (слева) и теплый (справа) периоды.

тропических источников [26–28]. Повышение концентрации CH<sub>4</sub> в районе 70–90° в.д. обусловлено выбросами крупнейшего в России Кузнецкого угольного бассейна, который является одним из наиболее мощных антропогенных источников CH<sub>4</sub> в любое время года. Этот вывод был дополнительно подтвержден с помощью изотопного анализа метана. В теплые периоды в Западной Сибири наблюдается заметное увеличение концентрации CH<sub>4</sub> биогенного происхождения в увлажненных почвах и болотах.

### 3.4. Изотопный состав CH<sub>4</sub> и CO

Анализ изотопного состава CH<sub>4</sub> и CO в пробах воздуха, собранных в экспедициях TROICA, использовался для определения источников этих соединений и оценки их вклада в глобальный и региональный баланс углерода [29, 30]. Анализ проб воздуха на <sup>13</sup>C, <sup>14</sup>C, <sup>18</sup>O и D проводился в МРИАС. Эксперимент TROICA-5 включал также проведение научной экспедиции по р. Оби с использованием специально оборудованного для атмосферных измерений речного судна [24, 27].

Анализ изотопного состава метана (<sup>13</sup>C и D) вдоль Транссиба показал, что на всем протяжении пути от Москвы до Владивостока метан в приземном слое атмосферы имеет преимущественно биогенное происхождение [27–29]. Наиболее высокие концентрации CH<sub>4</sub> регистрировались в Западной Сибири на участке пути между Екатеринбург и Новосибирском и в среднем течении р. Оби, где

основным его источником являются болота. Утечки природного газа при добыче, переработке и транспортировке природного газа в этом регионе в целом вносят небольшой вклад в содержание метана в атмосфере. Однако по мере приближения по реке Оби к месту газодобычи в центральной части Западной Сибири изменение содержания в воздухе изотопа <sup>13</sup>C показывало рост вклада термогенного метана, а на расстояниях 0.5–1 км от места добычи природного газа соотношение биогенного и термогенного метана достигало 50%. В большинстве экспедиций по Транссибу значительное превышение CH<sub>4</sub> над фоном наблюдалось в Пермском крае, где лаборатория пересекала несколько газопроводов, соединяющих газовые месторождения Полярного Урала и Западной Сибири с Центральной Россией. При этом содержание в пробах изотопа <sup>13</sup>C ( $\delta^{13}C_{source} = -52.4\%$ ) говорило о присутствии в воздухе термогенного метана. Значительная доля термогенного метана наблюдалась также вблизи крупных городов, где локальные пики CH<sub>4</sub> были связаны с утечками газа из газораспределительных сетей низкого давления.

Анализ изотопов <sup>14</sup>C и <sup>18</sup>O в CO в сочетании с анализом траекторий переноса воздушных масс позволил идентифицировать источники CO в летних кампаниях как горение биомассы, в частности, лесные пожары и сжигание отходов сельского хозяйства в Китае [24, 29, 30]. Выявленные источники CO вдоль р. Оби в кампании TROICA-5 связаны как с окислением метана (содержание  $\delta^{13}C_{source} = -36.8 \pm 0.6\%$ ), так и с процессами го-

рения (содержание  $\delta^{18}\text{O}_{\text{source}} = 9.0 \pm 1.6\text{‰}$ ). Чрезвычайное истощение  $^{13}\text{C}$  и сопутствующее обогащение  $^{18}\text{O}$  однозначно указывают на выбросы  $\text{CO}$  в результате сжигания природного газа (предполагаемые значения  $\delta^{13}\text{C}_{\text{source}} = -40.3\text{‰}$  и  $\delta^{18}\text{O}_{\text{source}} = 17.5\text{‰}$ ). Влияние на содержание  $\text{CO}$  промышленного сжигания природного газа регулярно отмечалось в районе Пермь—Кунгур.

### 3.5. Изотопный состав $\text{CO}_2$

Уникальная информация о пространственном распределении концентрации  $\delta^{14}\text{CO}_2$  была получена в экспедиции TROICA-8 между Москвой и Хабаровском [31]. Было показано, что преимущественное влияние на пространственное распределение  $\delta^{14}\text{CO}_2$  оказывает сгорание ископаемого топлива. Не было замечено сколь-нибудь существенного влияния дальнего переноса продуктов деятельности атомных электростанций на содержание  $\delta^{14}\text{CO}_2$  на территории, по которой проходит Транссибирская магистраль. Небольшое увеличение  $\delta^{14}\text{CO}_2$  искусственного происхождения в ходе экспериментов TROICA отмечалось только в ближайших окрестностях АЭС [31].

На маршруте Москва—Хабаровск содержание  $\delta^{14}\text{CO}_2$  увеличивается в восточном направлении на  $5.0 \pm 1.0\%$  (уровень значимости 99%). Такое увеличение  $\delta^{14}\text{CO}_2$  соответствует снижению концентрации  $\text{CO}_2$  от сжигания ископаемого топлива на 1.8 ppm. Для удаленных фоновых районов Восточной Сибири величина  $\delta^{14}\text{CO}_2$  оказалась равной  $62.8 \pm 0.5\text{‰}$ . Содержание  $\delta^{14}\text{CO}_2$  в чистом воздухе свободной тропосферы равно  $66.8 \pm 1.3\text{‰}$  (данные станции Нивот Ридж, 3475 м над уровнем моря). Такое различие в изотопном составе привело к выводу, что, несмотря на заметное перемешивание загрязнений в АПС в ходе дальнего переноса, влияние Европейских эмиссий  $\text{CO}_2$  еще остается значительным вплоть до восточных границ Северной Евразии.

Данные наблюдений  $\delta^{14}\text{CO}_2$  в чистом воздухе сравнивались с результатами численного моделирования переноса  $\text{CO}_2$  над Северной Евразией (трехмерная транспортная модель ТМ-5). Расчеты подтвердили, что распределение  $\delta^{14}\text{CO}_2$  почти полностью определяется эмиссиями  $\text{CO}_2$  от сжигания ископаемого топлива [31]. При этом величина градиента существенно менее чувствительна к неопределенностям оценки эмиссий продуктов сгорания топлива, чем к параметрам вертикального перемешивания. Отсюда следует, что  $\delta^{14}\text{CO}_2$  является хорошим индикатором точности параметризации в транспортных моделях процессов перемешивания.

### 3.6. Летучие органические соединения

Многие ЛОС обладают токсичными, мутагенными и канцерогенными свойствами. Разрушаясь в атмосфере, они образуют активные радикалы, которые определяют систему химических взаимодействий в атмосфере и ее состав. В первых 7 экспедициях для определения концентрации ЛОС (40–50 соединений) использовались пробы воздуха, которые отбирались на сорбенты или закачивались в специальные канистры [32, 33]. Наиболее высокие концентрации ЛОС регистрировались в городах и их шлейфах, причем в жаркую летнюю погоду, когда испарение различных материалов наиболее интенсивное. В весенний период особенно ярко проявляется увеличение концентрации ЛОС антропогенного и биогенного происхождения при движении с севера на юг (маршруты Мурманск—Сочи/Кисловодск), что связано с высокой зависимостью ЛОС от температуры воздуха и солнечной освещенности [32, 33].

Впервые в России освоен и применен метод протонной масс-спектрометрии для измерения концентрации летучих органических соединений в приземном воздухе [34]. Измерения 15–20 соединений прибором PTR-MS проводились в непрерывном режиме (время реагирования прибора — несколько секунд) в экспериментах TROICA-6–15 и на стационарах. В частности, получены первые данные о содержании в разных климатических зонах таких важных для химии атмосферы соединений, как изопрен и монотерпены. Определены их характерные концентрации в приземном воздухе над территорией России, составляющие в летний период для изопрена  $0.31 \pm 0.06$ – $0.48 \pm 0.06$  ppb, а для монотерпенов —  $0.31 \pm 0.05$ – $0.43 \pm 0.06$  ppb (рис. 5). Обнаружено, что широколиственные леса на Дальнем Востоке являются мощными источниками изопрена (концентрация изопрена здесь достигала 4.0 ppb), а хвойные леса в южной части Восточной Сибири — мощными источниками монотерпенов. Рассчитаны средние дневные эмиссии изопрена в лесных зонах в летний период: в широколиственных лесах  $12.6 \text{ мг/м}^2 \text{ ч}$ , в хвойных лесах  $2.0 \text{ мг/м}^2 \text{ ч}$  и мелколиственных лесах  $0.7 \text{ мг/м}^2 \text{ ч}$ . Выявлена корреляция между содержанием изопрена и суммарным содержанием метилвинилкетона и метакролеина в анализируемом воздухе, что позволило сделать вывод о преобладании летом в средних широтах биогенных эмиссий метилвинилкетона и метакролеина над их антропогенными эмиссиями.

Несмотря на относительно невысокий уровень загрязнения воздуха в России антропогенными ЛОС [35], часть из них (особенно ароматические углеводороды) вносят существенный вклад в образование приземного озона при условии высокого содержания оксидов азота [36]. Биогенные ЛОС (изопрен и монотерпены) могут быть глав-



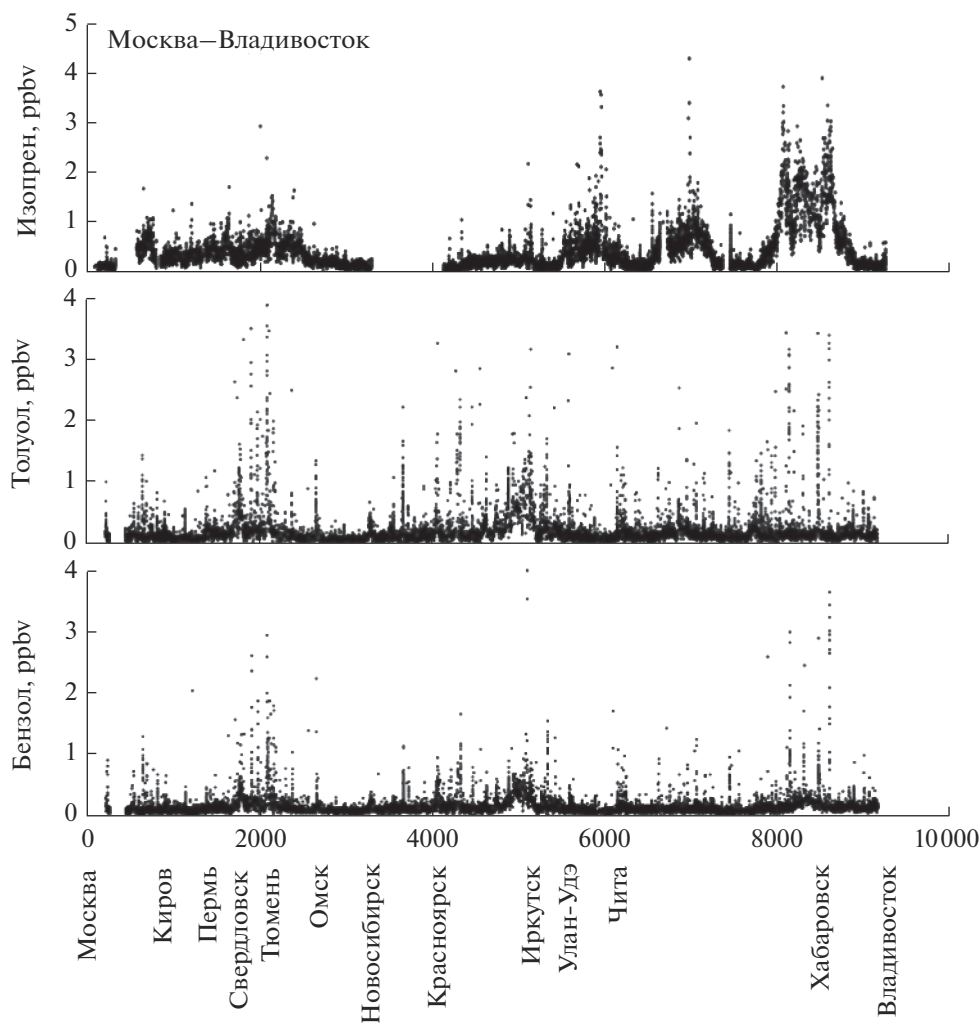


Рис. 5. Пространственное распределение концентрации изопрена, толуола и бензола при движении на восток по маршруту Москва–Владивосток (эксперимент TROICA-12, 2008 г.).

ным источником  $O_3$  в городах восточной Сибири и Дальнего Востока, обеспечивая дополнительную генерацию до 40 ppb [37].

### 3.7. Аэрозоль

В ходе экспериментов TROICA был собран обширный архив данных о концентрации, микрофизических свойствах и химическом составе аэрозоля на обширной территории России. В настоящее время значительная часть этого архива все еще продолжает обрабатываться и анализироваться. Городской, сельской и фоновой атмосфере свойственны большие различия параметров аэрозоля [38–41]. В городах и их шлейфах концентрации аэрозольных частиц достигают 100–120  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Для городов также характерен аэрозольный недельный цикл. В сельской местности недельный цикл слабо выражен – концентрация аэрозоля в течение недели в среднем не выходит за пределы

10–20  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Максимальные концентрации частиц – до 800  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  – регистрировались в шлейфах лесных пожаров. Сажевый аэрозоль (черный углерод или BC) составляет значительную долю общей массы частиц. Подробно анализ его распределения и изменений со временем представлен в работах [39, 40]. Средняя концентрация BC на маршруте Мурманск–Кисловодск зимой–весной, например, составляет 1–2  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . В тот же период средняя концентрация BC вдоль Транссиба в 2 раза выше.

Ценная информация о свойствах аэрозолей была получена в экспедиции TROICA-9 (октябрь 2005 г.), в которой участвовали ученые из Финляндии, России, Германии. Детальный анализ полученных результатов представлен в работах [41, 42]. Число частиц на маршруте Москва–Владивосток–Москва в этой экспедиции варьировало от 300 до 40000 в  $1\text{ см}^3$ , причем наименьшее

значение отмечено в Восточной Сибири. В то же время минимальная концентрация ионов наблюдалась в Центральной Сибири (от Красноярска до Читы). На общем фоне выделялись события резкого увеличения концентраций частиц разного размера, связанные с переносом загрязненного воздуха из Северо-Восточного Китая. Повышенное содержание в этих воздушных массах оксалата калия указывает на горение биомассы как основного источника аэрозолей.

Химический анализ собранных в октябре 2005 г. вдоль Транссиба проб аэрозолей показал, что субмикронные частицы содержат 15–48.7% (среднее значение 27.6%) сажи; 2.7–33.5% (13.0%)  $\text{SO}_4^{2-}$ ; 1.2–10.5% (4.1%)  $\text{NH}_4^+$  и 0.5–2.4% (1.4%)  $\text{NO}_3^-$  [41]. Содержание металлов в субмикронном аэрозоле составляло 0.4–9.8%. Доля ангидридов моносахаридов 0.4–1.6%. Во фракции  $\text{PM}_{2.5}$  массовая доля углерода была выше, чем в Западной Европе. Содержание  $\text{NO}_3^-$  и  $\text{NH}_4^+$ , наоборот, ниже, чем в Европе. Содержание  $\text{SO}_4^{2-}$  примерно одинаково над Россией и Западной Европой.

Подробно исследован ионный состав приземного воздуха [42]. Концентрация отрицательных ионов на большей части маршрута выше и меняется в более широких пределах, чем концентрация положительных ионов. Выявлена высокая корреляция концентрации ионов и радона-222. В лесной зоне Сибири были отмечены два уникальных события образования мелкодисперсных аэрозольных частиц. Самая высокая скорость роста этих частиц  $11.4 \pm 0.7$  нм/ч соответствовала образованию ионов в утренние часы (местное время) 10 октября 2005 г. с диаметрами от 4.1 до 9.8 нм. Рост ионов меньших и больших размеров происходил медленнее, со скоростями  $2.4 \pm 0.1$  и  $4.4 \pm 2.4$  нм/ч, соответственно. Аналогичное событие наблюдали 8 октября 2005 г. после полудня. Скорость роста отрицательных 10.2–25.6 нм ионов составляла  $4.2 \pm 0.3$  нм/ч. Эти и целый ряд других важных результатов наблюдений и анализа собранных аэрозольных проб дали подробную картину образования, переноса и химической трансформации аэрозолей на ранее слабо изученной территории России.

#### 4. СОСТАВ АТМОСФЕРЫ НАД УРБАНИЗИРОВАННЫМИ ТЕРРИТОРИЯМИ

##### 4.1. Качество воздуха в городах

Транссибирская магистраль Москва–Хабаровск (Владивосток) проходит через 110 городов и, как правило, через центральные районы. За период 1995–2008 гг. передвижная лаборатория пересекла каждый город 22 раза. Поскольку измерения велись непрерывно, в том числе на стоянках,

то была собрана уникальная база данных о временной и пространственной изменчивости приземной концентрации газовых примесей и аэрозолей на территории городов [10, 44–46]. В [46] приведены средние по сезонам концентрации основных загрязняющих веществ в 3 группах городов, состоящих из 10 крупных городов (более 500 тыс. жителей), 33 средних городов (50–500 тыс. жителей) и 47 малых городов (19–50 тыс. жителей), в сравнении со средними значениями в чистых фоновых условиях. Даже малые города являются значительным источником  $\text{NO}$  и  $\text{NO}_2$ , независимо от сезона. Антропогенные выбросы оказывают также существенное влияние на содержание  $\text{CO}$ ,  $\text{SO}_2$  и  $\text{NMHC}$ , в особенности в холодный период года, когда их интенсивность возрастает из-за работы систем отопления. Накоплению примесей в приземном воздухе зимой способствуют частые и мощные в это время температурные инверсии. Концентрации  $\text{CO}$  и  $\text{CH}_4$  наиболее высокие летом и осенью, когда антропогенные выбросы накладываются на повышенный фон биогенного происхождения. Суточные вариации концентрации примесей во многом зависят от совпадения или несовпадения по времени утренней и вечерней активности антропогенных источников (транспорт, жилищный сектор) с образованием и разрушением температурной инверсии. Зимой инверсия формируется рано до начала утреннего часа пик, а разрушается позже вечернего часа пик, что способствует накоплению примесей в устойчивом приземном слое атмосферы и приводит к формированию утреннего и вечернего максимумов в суточном изменении концентрации примесей. Летом, когда ночная инверсия существует короткое время, интенсивные утренние и вечерние выбросы происходят в условиях неустойчивого пограничного слоя атмосферы, и утренний и вечерний максимумы либо отсутствуют, либо сильно сглажены.

В распределении примесей на территории городов также выявлены характерные особенности [10, 46]. Максимальное превышение концентраций  $\text{NO}$  и  $\text{NO}_2$  над окружающей сельской местностью наблюдается в центре городов в течение всего года. Распределение  $\text{CO}$  и  $\text{NMHC}$  – примесей с большим временем жизни и преимущественно антропогенного происхождения – на территории городов более или менее равномерное. Впервые выявлены характерные особенности распределения  $\text{CO}_2$  на территории городов в разные сезоны. В частности, показано, что летом концентрация  $\text{CO}_2$  на большей части территории городов ниже, чем в окружающей сельской местности. Из-за высокой застройки в центральной части городов и запаздывания смены ночного режима на дневной режим концентрация  $\text{CO}_2$  в центре несколько выше, чем в среднем по городу. Также из-за превалиру-

ющих западных ветров на восточной окраине городов концентрация  $\text{CO}_2$  повышенная, причем даже выше, чем в среднем в окружающей город местности. Зимой концентрация  $\text{CO}_2$  в городах значительно превышает уровень за их пределами, а резкий максимум такого превышения приходится на городские центры.

#### 4.2. Влияние Москвы на региональную атмосферу

В ходе трансконтинентальных экспедиций передвижная лаборатория многократно пересекала территорию Московского мегаполиса по разным направлениям и в разное время года, что позволило получить уникальную информацию о тонкой структуре региональных полей метеоэлементов, химического состава приземного воздуха, радиационных и других характеристик атмосферы. Подробные результаты исследований антропогенного воздействия на состояние атмосферы в Московском регионе представлены в [47–49]. Средние значения превышения температуры и концентрации основных загрязняющих примесей на территории Московского мегаполиса относительно окружающей местности, а также параметры городского “острова тепла” (ОТ) для 10 крупных городов России приведены в [47]. ОТ распространяется на весь Московский мегаполис. Средняя по мегаполису его величина меняется от  $0.7^\circ\text{C}$  зимой в дневное время до  $1.7^\circ\text{C}$  летом в ночное время. В пределах МКАД наибольшее значение ОТ ( $2.0^\circ\text{C}$ ) достигается ночью в летний период. Примерно такое же изменение температуры для этого времени года и суток наблюдалось во многих крупных городах России [3]. Загрязнение воздушного бассейна Московского мегаполиса оксидами азота и углерода в среднем невелико. По этим показателям Москва является одним из самых чистых мегаполисов мира [50]. Сказывается хорошая проветриваемость города, расположенного на равнине. Пониженная концентрация озона говорит и об относительно малой активности фотохимических процессов в Московском мегаполисе – самом северном мегаполисе мира. Влияние Москвы на региональную атмосферу проявляется в повышении температуры воздуха и ухудшении его качества. Влияние города простирается в среднем за год на расстояние до 150–200 км и охватывает слой атмосферы до высоты 300–400 м.

С 3 по 7 октября 2006 г. был проведен уникальный эксперимент (TROICA-10) по наблюдению состава приземного воздуха в Московском мегаполисе [48, 49]. Передвижная лаборатория из 2 вагонов со специально выделенным электровозом совершила 3 круга по кольцевой железной дороге, охватывающей Московский мегаполис и его окрестности. Протяженность дороги 526 км, средняя удаленность от центра Москвы 70 км. В начале и конце эксперимента были проведены

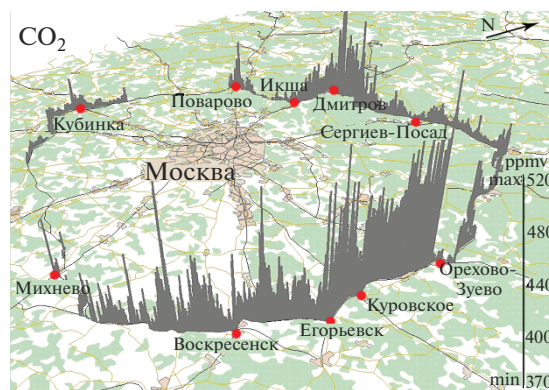


Рис. 6. Среднее за период наблюдений 3–7 октября 2006 г. распределение концентрации  $\text{CO}_2$  вокруг Московского мегаполиса (эксперимент TROICA-10).

два радиальных пересечения Москвы. В каждом проезде по кольцу концентрации всех атмосферных составляющих антропогенного происхождения существенно возрастали на востоке области при пересечении шлейфа загрязненного воздуха от г. Москвы (на рис. 6 в качестве примера показано распределение концентрации  $\text{CO}_2$  вдоль кольцевого маршрута). Минимальные концентрации загрязняющих примесей и максимальные концентрации озона отмечались в натекающем на город воздушном потоке. На общем более или менее однородном фоне отмечались кратковременные пики концентрации загрязняющих веществ от небольших городов, промышленных предприятий и крупных автомагистралей. Интересной особенностью состава атмосферы в регионе является более высокая концентрация ароматических углеводородов в вытекающем из мегаполиса воздушном потоке по сравнению с центром г. Москвы. Это связано с преимущественным положением промышленных предприятий в восточном секторе Московской области, которые вносили значительный вклад в загрязнение атмосферы. Изменения состава приземного воздуха отмечены вблизи крупных свалок и мест складирования промышленных отходов. Некоторые из них, например отходы завода минеральных удобрений под Воскресенском (гипсовая белая гора), являются мощными загрязнителями и заметно влияют на качество воздуха.

## 5. ТРАНСГРАНИЧНЫЙ ПЕРЕНОС И СТРАТОСФЕРНЫЕ ВТОРЖЕНИЯ

### 5.1. Трансграничный перенос примесей

Способность мобильной лаборатории отслеживать тонкую пространственную структуру химического состава воздуха, метеорологических и радиационных характеристик приземного слоя атмосферы позволяет оценивать эмиссии приме-

сей при пересечении шлейфов загрязнений от удаленных источников и исследовать процессы химической трансформации газов и аэрозолей при движении вдоль шлейфов. Особое значение такие наблюдения имеют для изучения трансграничных потоков загрязняющих веществ и их влияния на качество воздуха в России. Выше уже говорилось о влиянии Европейских стран на содержание  $\text{CO}_2$  в Сибири вплоть до ее восточного побережья [31]. Одним из важнейших результатов проведенных работ явилось обоснование влияния трансграничного переноса загрязнений на образование в городах Хабаровского и Приморского краев экстремальных экологических ситуаций, способных оказывать воздействие на здоровье людей [51]. В период Тихоокеанского муссона (июль–сентябрь) на территорию региона поступает загрязненный воздух из Японии, Кореи и Северо-Восточного Китая. Во время движения воздушной массы происходит активное окисление первичных летучих органических соединений и образование вторичных ЛОС. Из-за малого количества радикалов в чистом воздухе над океаном и тайгой генерация  $\text{O}_3$  в этой воздушной массе ослаблена. Но когда с территории городов в эту недоокисленную воздушную массу поступает большое количество  $\text{NO}_x$ , которые вступают в реакцию с пероксирадикалами, происходит быстрый рост  $\text{O}_3$ . Практически во всех городах, которые охватила такая воздушная масса, наблюдались высокие концентрации озона, часто превышающие ПДК. Например, 3 июля 1999 г. концентрация  $\text{O}_3$  в городах Хабаровского края, расположенных на Транссибе на протяжении 600 км, в среднем выросла не менее чем на 8 ppb, а в Биробиджане достигла 230 ppb (ПДК равна 76 ppb). Численное химико-транспортное моделирование, выполненное для подобных условий, показало, что высокие концентрации  $\text{O}_3$  формируются в течение нескольких часов в дневное время в малоподвижной воздушной массе, охватывая территорию городов и их ближайших окрестностей [51]. Такие экстремальные ситуации очень опасны для здоровья местных жителей и требуют тщательного изучения.

Более часто, практически в течение всего года, регистрировались выносы продуктов сжигания угля и остатков сельскохозяйственных отходов в Северо-Восточном Китае. Для моделирования переноса продуктов горения и решения обратных задач с целью определения источников и величины эмиссий использовалось несколько Лагранжевых химико-транспортных моделей [7, 8]. В целом они давали близкие результаты, но отличия в описании процессов переноса приводили к наилучшему совпадению с данными наблюдений (в разных метеорологических ситуациях) результатов расчетов по модели MM5 v3/NOAA hysplit.

Проведенные численные эксперименты показали высокую значимость данных наблюдений на

передвижной лаборатории, пересекающей шлейфы загрязненного воздуха от удаленных источников, для верификации химико-транспортных моделей.

## 5.2. Стратосферные вторжения

Протяженные маршруты экспедиций позволили зарегистрировать и детально исследовать несколько стратосферных вторжений, сопровождавшихся увеличением приземной концентрации озона на 10–15 ppb на протяжении пути от 10 до 100 км [52]. На основе результатов наблюдений и данных оперативного объективного анализа рассчитывались поля эквивалентной температуры, потенциального вихря, максимального ветра и другие параметры, характеризующие состояние атмосферы. Вторжения в основном наблюдались в тылу бароклинической зоны холодного фронта. Также были замечены случаи поступления стратосферного воздуха в областях интенсивного конвективного перемешивания при низкой тропопаузе. Впервые зарегистрированы разнообразные проявления стратосферных вторжений и тонкая структура области вторжения, которая оказалась резко неоднородной.

## 6. ЛОКАЛЬНЫЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ

### 6.1. Линии электропередач

Во время движения вагона-лаборатории сменные операторы непрерывно заносили в электронный дневник информацию о метеорологических условиях, состоянии растительности и всех замеченных объектах, которые могли бы оказать влияние на состав атмосферы. Операторы располагались на втором этаже вагона лаборатории, имели обзор в  $360^\circ$  и подключение к центральному компьютеру, что позволяло непрерывно следить за показаниями основных приборов. Две видеокмеры записывали изображение местности по обеим сторонам железной дороги. Полученная информация была использована для анализа быстрых изменений показаний приборов и определения характера и степени воздействия на состав атмосферы таких объектов, как автомагистрали, промышленные предприятия, состав встречных поездов и многое другое. Так, в экспериментах TROICA были впервые собраны данные об изменчивости концентрации озона при пересечении высоковольтных линий электропередач [53, 54]. Прохождение ЛЭП 110 кВ не вызывало изменения концентрации озона. При пересечении ЛЭП напряжением 220 и 500 кВ (обработано около 1000 таких пересечений, сделанных в разные сезоны и время суток) увеличение озона составило  $2.1 \pm 0.5$  и  $2.9 \pm 0.6$  ppb соответственно (рис. 7). В целом, эти вариации невелики и лежат в пределах естественной изменчивости озона. Однако, во-



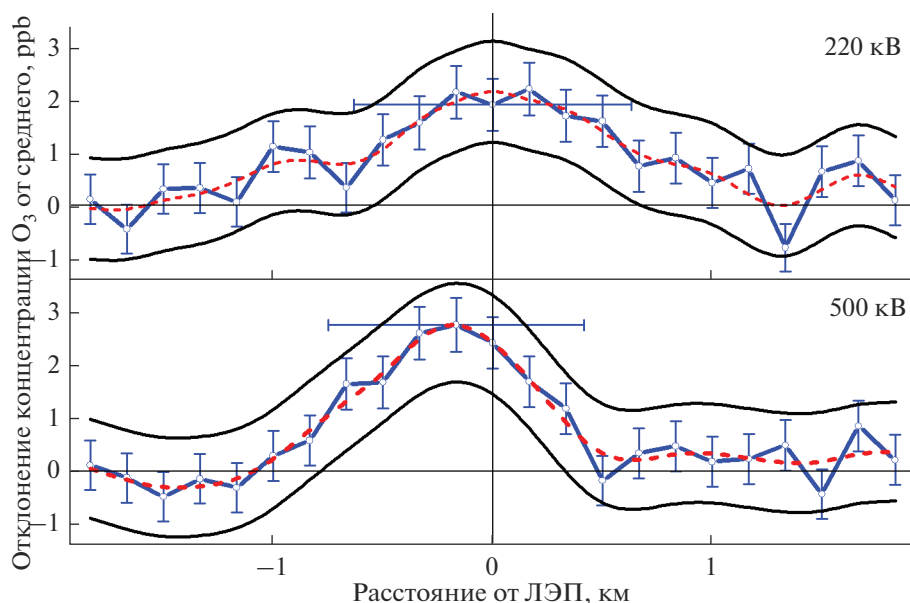


Рис. 7. Осредненные отклонения концентрации озона в районе ЛЭП 220 и 500 кВ (вертикальные и горизонтальные линии – стандартные отклонения).

первых, в условиях существования ночных температурных инверсий увеличение концентрации озона существенно превышает средние значения, а во вторых, это увеличение существует постоянно. Поэтому ЛЭП могут заметно влиять на концентрацию озона (и других примесей) в регионах с большой плотностью электрических сетей, например, в Западной и Центральной Европе.

Результаты наблюдений были проверены экспериментально и с помощью численной фотохимической модели [54]. Эксперименты проводились в Московской области в разные сезоны и в разных метеоусловиях на специально оборудованном автомобиле, многократно пересекавшем ЛЭП-500. Измерялись  $O_3$ ,  $NO$  и  $NO_2$ . Среднее увеличение  $O_3$  составило  $2.5 \pm 0.5$  ppb, что совпало с измерениями на вагоне-лаборатории. Численные расчеты позволили оценить интенсивность образования радикала  $OH$  в области коронного разряда и пероксирадикалов в зоне влияния ЛЭП. Было показано, что в загрязненном воздухе ЛЭП повышают окислительные свойства атмосферы и поэтому могут служить своеобразными очистными сооружениями.

### 6.2. Объекты железнодорожного транспорта

Основное загрязнение атмосферы железнодорожным транспортом вызвано эмиссиями в атмосферу аэрозолей при перевозке насыпных грузов и органических соединений при перевозке нефтепродуктов и других жидкостей [7, 8]. Аэрозольные наблюдения показали, что основные насыпные

грузы – уголь, руда, щебень и т.д. – сопровождаются выбросом в атмосферу крупных частиц размером более 5 мкм. В среднем, 90% их массы оседает на поверхности земли в течение 20 мин. Концентрация мелких частиц с временем жизни несколько часов и более в полосе отвода железной дороги с частотой движения поездов более 20 мин практически не отличается от фоновой. Но на участках с интенсивным движением, при наличии приземной температурной инверсии и отсутствии ветра, концентрация субмикронных частиц может возрасти на порядок и более.

Повышенные концентрации  $CH_4$  и  $NMHC$ , регистрировались при прохождении встречных поездов и разъездов со стоящими грузовыми поездами, в составе которых были нефтеналивные цистерны [7, 8]. Концентрация  $NMHC$  сильно варьирует в зависимости от количества цистерн, температуры воздуха, направления ветра и других факторов. Тем не менее собранная подробная информация о более чем 200 встречных поездах с нефтеналивными цистернами на Сибирском участке Транссиба, где в восточном направлении передвигаются в основном заполненные цистерны, а в обратном направлении – порожние, позволила установить некоторые закономерности. В частности, в шлейфах поездов, состоящих на 30, 50 и 100% из нефтеналивных цистерн, превышение концентрации  $NMHC$  над фоновой составило в среднем 0.1, 0.2 и 0.5 ppb соответственно (экспедиции TROICA-7–9 и 11–13 в теплый сезон с марта по октябрь). Для поездов с открытыми люками у цистерн превышение достигало 1.3 ppb.

Значимое повышение концентрации NMHC регистрировалось в среднем в течение 3 мин от момента встречи электровоза встречного поезда.

Активное накопление примесей происходит в протяженных двухпутных тоннелях [7, 8]. Так, при прохождении тоннелей на участке Транссиба Бурей-Биробиджан в марте 1998 г. (TROICA-8) отмечался рост концентраций всех основных загрязняющих примесей. При этом концентрации аэрозолей и диоксида азота превышали ПДК.

### 6.3. Утечки из газотранспортной системы

Транссиб пересекает около 10 крупных магистральных газопроводов. На некоторых участках газопроводы проходят вдоль железной дороги в непосредственной близости к ней (например, между Тюменью и Новосибирском). В первых экспедициях TROICA-2–5 неоднократно регистрировались скачки концентраций  $\text{CH}_4$  и NMHC вблизи газопроводов [27–29]. Пробы  $^{14}\text{CH}_4$ , взятые в этих районах, показали присутствие метана термогенного происхождения. Наличие утечек природного газа из газопроводов подтверждает и отсутствие подобных скачков концентрации  $^{14}\text{CH}_4$  в тех же местах в экспедициях после 2002 г., т.е. после приведения газотранспортной системы в порядок. Значительные утечки природного газа регулярно наблюдались в городах, в частности, от компрессорных станций. В [7] приведен пример расчета параметров шлейфа метана от компрессорной станции, где проводился ремонт, расположенной на участке газопровода Омск-Павлодар. Оценка величины выброса в этом случае дала  $2.1 \times 10^{10}$  мкг/ч, или 0.5 т/сут, а протяженность шлейфа составила примерно 550 км.

Высокий уровень концентрации метана на севере Европейской территории России и в Западной Сибири первоначально связывался с утечками природного газа при его добыче, обработке и транспортировке. Полученные на этой основе интегральные оценки эмиссий метана в СССР и Российской Федерации дали, соответственно, значения 31–45 и 25–35 Мгт/год [55, 56]. Эти опубликованные эмиссии в последствии учитывались при инвентаризации антропогенных источников и создания баз данных для численного моделирования. Изотопный анализ  $^{14}\text{CH}_4$ , выполненный на передвижной лаборатории и на борту корабля, прошедшего по Оби, показал, что большая часть метана в приземной атмосфере Западной Сибири имеет биогенное происхождение. Доля антропогенного метана составляет всего 2% на юге и востоке Западной Сибири и 30–50% вблизи областей добычи природного газа [27]. Рассчитанные эмиссии природных утечек метана в России составили 8–10 Мгт/год, что сопоставимо с утечками природного газа в США и на Ближнем Востоке [7].

## 7. ЭМИССИИ ПРИМЕСЕЙ В АТМОСФЕРЕ

### 7.1. Эмиссии радона-222 из почвы

Радиоактивный газ радон ( $^{222}\text{Rn}$ ) является одним из продуктов распада изотопа  $^{238}\text{U}$ , в атмосферу попадает из почвы.  $^{222}\text{Rn}$  представляет собой химически нейтральный газ с периодом полураспада 3.82 дня. Поэтому  $^{222}\text{Rn}$  служит удобным трассером процессов переноса в атмосфере и часто используется для оценки эмиссий газов биогенного происхождения [57, 58]. При этом обычно предполагается, что потоки  $^{222}\text{Rn}$  в атмосферу распределены более или менее равномерно по континенту и равны нулю на морской поверхности. Однако необходимость знания точных значений эмиссий парниковых и химически активных газов, определяющих состояние климатической системы, требует адекватного отношения к оценкам эмиссий  $^{222}\text{Rn}$ . В экспериментах TROICA (1999–2009 гг.) измерения концентрации  $^{222}\text{Rn}$  сопровождалась измерениями вертикальных профилей температуры до высоты 600 м, что позволило с помощью диффузионной модели с достаточно высокой точностью рассчитать потоки  $^{222}\text{Rn}$  в атмосферу в ночное время при наличии приземной температурной инверсии [57]. Осредненные по регионам эмиссии  $^{222}\text{Rn}$  меняются от  $29 \pm 8$  мБк/м<sup>2</sup> с на Европейской территории России до  $95 \pm 51$  мБк/м<sup>2</sup> в Южной Сибири. Наибольшие значения эмиссий зарегистрированы в районах с высокой тектонической активностью Центральной и Восточной Сибири и на Дальнем Востоке. Повышенное увлажнение почвы летом 1999 г. (повсеместно выпали обильные осадки) явилось причиной в 2–4 раза меньших эмиссий  $^{222}\text{Rn}$ , чем осенью 2005 г., отличавшейся очень малым количеством осадков и низким уровнем грунтовых вод. В целом, значительные изменения эмиссий  $^{222}\text{Rn}$  являются следствием изменения состояния почвы и метеорологической ситуации, что проявляется, в частности, в их сезонных вариациях.

### 7.2. Эмиссии озоноразрушающих веществ

В соответствии с Монреальским протоколом 1987 г. о защите озонового слоя развитые страны обязаны были прекратить, а развивающиеся страны – резко сократить к 1.01.1996 г. производство основных озоноразрушающих веществ (ОРВ): хлорфторуглеродов (ХФУ), галонов, четыреххлористого углерода и метилхлороформа. Проведенные в конце 90-х годов измерения содержания ОРВ в атмосфере и модельные расчеты показали явное несоответствие между заявленными странами и отдельными компаниями снижением производства ОРВ и реальными выбросами их в атмосферу. Поскольку Советский Союз являлся одним из лидеров в мировом производстве ХФУ и

**Таблица 2.** Концентрация озоноразрушающих веществ (ОРВ) и оценка российских и глобальных эмиссий (Гг/год)

| ОРВ                              | Среднее значение (ppt) | Российские эмиссии | Глобальные эмиссии |
|----------------------------------|------------------------|--------------------|--------------------|
| Фреон-12                         | 573.0                  | 32–129             | 122                |
| Галон-1211                       | 4.66                   | 0.6–2.3            | 8.67               |
| Фреон-113                        | 82.3                   | 0.4–1.5            | 8.0                |
| Фреон-11                         | 262.9                  | 0.6–2.3            | 78.2               |
| CCl <sub>4</sub>                 | 102.7                  | 0.3–1.1            | 63.6               |
| CH <sub>3</sub> CCl <sub>3</sub> | 39.0                   | –                  | 41.4               |

**Таблица 3.** Интегральные эмиссии NO<sub>x</sub>, CO, CH<sub>4</sub> в городах России, рассчитанные по данным экспериментов TROICA (Гг/год)

| №   | Название города                     | NO <sub>x</sub> | CO  | CH <sub>4</sub> |
|-----|-------------------------------------|-----------------|-----|-----------------|
| 1.  | Новосибирск                         | 6.6             | 96  | 43              |
| 2.  | Екатеринбург                        | 6.3             | 133 | 40              |
| 3.  | Нижний Новгород                     | 4.3             | 87  | 37              |
| 4.  | Омск                                | 4.2             | 105 | 40              |
| 5.  | Пермь                               | 4.3             | 74  | 44              |
| 6.  | Красноярск                          | 4.8             | 90  | 25              |
| 7.  | Агломерация Иркутск–Ангарск–Шелехов | 4.6             | 93  | 22              |
| 8.  | Ярославль                           | 3.3             | 50  | 38              |
| 9.  | Тюмень                              | 4.0             | 58  | 25              |
| 10. | Иркутск                             | 3.8             | 73  | 17              |

галонов (10 и 14% соответственно), то высказывались подозрения в нарушении Россией требований Монреальского протокола. В этой связи измерения эмиссий ОРВ в экспериментах TROICA, проведенные совместно специалистами ESRL (США) и ИФА РАН, представляли особый интерес [59]. В ходе экспедиции TROICA-7 в июне-июле 2001 г. были проведены оценки российских эмиссий хлорфторуглеродов (CFC-11, CFC-12, CFC-113), четыреххлористого углерода, метилхлороформа и галона-1211 с помощью нескольких тысяч измерений их концентрации в приземном воздухе вдоль Транссибирской магистрали (табл. 2). Для оценки эмиссий ОРВ от расположенных вдоль Транссиба городов и промышленных предприятий использовались результаты измерений скорости накопления <sup>222</sup>Rn в ночном подинверсионном слое атмосферы. По методу о скорости адвективного переноса ОРВ определялся размер коридора, из которого в места наблюдений поступают ОРВ. Проведенные расчеты эмиссий <sup>222</sup>Rn и ОРВ позволили оценить суммарные выбросы ОРВ в данном коридоре, охватывающем густонаселенную территорию страны вдоль Транссиба от Москвы до Владивостока. Пользуясь данными наблюдений ОРВ, картами эманации <sup>222</sup>Rn на территории России и распределением по территории страны населения и промышленных предприятий, были сделаны оценки

выбросов ОРВ на всей территории России. Оценки эмиссий приведены в табл. 2. Расчеты показали, что российские эмиссии ОРВ в целом вносят несущественный вклад в глобальные эмиссии, и что заявленное властями страны сокращение выбросов ОРВ полностью соответствует результатам измерений. Эти выводы сняли все спекулятивные обвинения России в нарушении обязательств по исполнению Монреальского протокола. Статья [59], опубликованная в ведущем журнале *Journal of Geophysical Research*, была признана редакцией журнала лучшей статьей за 2004 г.

### 7.3. Эмиссии загрязняющих веществ от городов

Многочисленные пересечения городов, выполненные в период с 1995 по 2009 гг. в разные сезоны и разное время суток, позволили собрать информацию о составе и состоянии атмосферы, характерную для крупных городов и достаточную для оценки средних за период измерений эмиссий основных загрязняющих веществ: CO, NO, NO<sub>2</sub> и CH<sub>4</sub>. Оценки эмиссий были выполнены для 9 самых больших городов, расположенных вдоль Транссиба, и Иркутской агломерации, включающей города Иркутск, Ангарск, Шелехов и промышленных предприятия в их окрестностях [10] (табл. 3). Для расчетов использовался метод, основанный на применении бокс-модели [47, 57]. Рассчитанные по данным измерений интегральные

городские эмиссии  $\text{CO}$ ,  $\text{NO}_x$  и  $\text{CH}_4$  тесно связаны с количеством населения и размером урбанизированной территории, т.к. их основным источником являются автомобильный транспорт и промышленные предприятия [10]. Города, расположенные в Европейской части России, имеют высокий уровень газификации и практически завершили к началу 2000-х годов перевод устаревшего автомобильного парка на современные автомобили с высокотемпературным сжиганием топлива и каталитическими конвертерами. Эта группа городов, к которой может быть отнесена и быстро развивающаяся Тюмень, сильно отличается от сибирских городов, где преимущественно в качестве топлива используется уголь и велика доля частного сектора с индивидуальным отоплением. Для западной группы городов характерны высокое значение отношения  $Q(\text{CH}_4)/Q(\text{CO})$  и более интенсивные эмиссии метана. Наиболее низкие значения этого отношения соответствуют Иркутской агломерации и Красноярску, где крупные энергетические предприятия работают на угле и где низок уровень газификации частного домовладения. Многократные пересечения Московского мегаполиса также использовались для расчетов эмиссий загрязняющих примесей от Москвы. Полученные значения стали основой для прогнозирования качества воздуха в городе с помощью химико-транспортной модели SILAM.

Рассчитанные городские эмиссии по некоторым параметрам заметно отличаются от антропогенных эмиссий, которые содержатся в базе данных широко используемой в моделировании инвентаризации EDGAR v.4.2. Если значения эмиссий  $\text{CO}$  довольно близки, то эмиссии  $\text{NO}_x$  и  $\text{CH}_4$  сильно различаются. Резко завышенными в EDGAR v.4.2 и необъяснимо меняющимися от города к городу представляются эмиссии  $\text{NO}_x$ . Эмиссии  $\text{CH}_4$  из базы данных EDGAR v.4.2 для этих городов больше, чем полученные из экспериментов TROICA, в 4–8 раз. Подобные расхождения эмиссий  $\text{NO}_x$  и  $\text{CH}_4$  между рассчитанными по данным измерений и EDGAR v.4.2 имеют место и для Москвы, что демонстрирует большую неопределенность инвентаризационных оценок, которые делаются в основном по косвенным сведениям о количестве и мощности источников примесей [50, 60]. Как отмечалось выше, инвентаризационные оценки утечек  $\text{CH}_4$  в газотранспортной системе России, выполненные по косвенным данным (отчеты, газетные публикации, частные сообщения и др.), приведенные в [7], дали абсолютно нереальные значения. Однако эти оценки, видимо, вошли в базы данных многих инвентаризаций и, в частности, в базу EDGAR v.4.2 и v.4.3, которые до сих пор используются, внося большую долю неопределенности в результаты моделирования.

## 8. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В 2020 г. исполнилось 25 лет со времени возникновения замысла о наблюдении озона в купе пассажирского поезда (февраль 1995 г.) и проведения первой экспедиции (ноябрь 1995 г.) по Транссибу на вагоне-лаборатории, расположенном в голове пассажирского поезда Москва–Хабаровск–Москва. С этой экспедиции начались международные эксперименты TROICA, в которых принимали участие многие ученые, инженеры и техники из разных стран. Благодаря научному сотрудничеству и объединению технических возможностей, была получена уникальная информация о состоянии атмосферы над Северной Евразией и ее взаимодействии с континентальными экосистемами. Эта информация лежит в основе многочисленных научных исследований, открывших не известные ранее закономерности в области экологии, физики и химии атмосферы и давшие им объяснения. Основой для проведения таких широкомасштабных экспериментов стала передвижная железнодорожная лаборатория, которая была оборудована по типу Глобальной станции мониторинга атмосферы (Global station of the GAW WMO [58]). Лаборатория способна действовать на всей сети электрифицированных дорог России и соседних стран. Ее основное преимущество перед всеми другими передвижными лабораториями состоит в способности проводить измерения структуры фонового состава приземного слоя атмосферы с высоким пространственным и временным разрешением, что практически невозможно выполнить, используя автомобильные платформы и речные суда. Наиболее приоритетным направлением работы лаборатории являлось наблюдение химического состава атмосферы и сопутствующих радиационных и метеорологических параметров. Именно в этой области сосредоточены основные экологические проблемы, являющиеся предметом Национального проекта “Экология” и целого ряда крупных международных соглашений о защите озонового слоя, изменения климата, трансграничном переносе загрязнений, устойчивых органических загрязнений и др.

Созданный для передвижной лаборатории измерительный комплекс включал высокочувствительные приборы, рекомендованные GAW WMO, для непрерывных измерений приземной концентрации газов, физико-химических свойств аэрозолей, метеорологических и радиационных параметров. Все приборы проходили регулярные калибровки и поверки. В состав измерительного комплекса входили также новые уникальные приборы для непрерывных измерений летучих органических соединений, химических и микрофизических свойств аэрозолей, естественной и искусственной радиоактивности, дистанционного зондирования  $\text{O}_3$  и  $\text{NO}_2$ . В вагоне-лаборатории



были предусмотрены технические средства для отбора проб воздуха, аэрозолей, воды, почвы и растительности для последующего химического, биологического и изотопного анализов. Измерительный комплекс может быть установлен на других платформах [7] или использоваться как стационарная станция (с 2002 по 2014 г. действовал на Московской экологической станции [47]). Включение автоматизированной измерительной системы, базирующейся на железнодорожной платформе, и созданных в России высокотехнологических измерительных систем на базе автомобиля и самолета [62, 63] в состав российской системы мониторинга атмосферы, модернизация которой предусмотрена Национальным проектом “Экология” и Федеральным проектом “Чистый воздух”, может существенно повысить ее эффективность.

Эксперименты TROICA велись 15 лет, вплоть до 2010 г. Собрана уникальная по объему и высокому качеству информация о состоянии атмосферы и ее взаимодействии с наземными экосистемами на обширной территории Северной Евразии. Анализ этой информации продолжается, и, очевидно, она будет служить основой еще многих научных исследований.

#### БЛАГОДАРНОСТИ

Проведение измерений на передвижной лаборатории в составе поездов и создание новой лаборатории стало возможным благодаря финансовой, организационной и технической поддержке Министерства путей сообщения и ВНИИЖТ и заинтересованного личного участия в проведении экспериментов TROICA их руководителей и ведущих специалистов: А.Л. Лисицына, И.С. Беседина, А.Е. Семечкина, В.В. Севостьянова, К.П. Шенфельда, А.М. Грисенко, О.В. Лавровой, И.В. Богородской. На разных этапах экспериментов в создании измерительной системы и проведении измерений участвовали сотрудники ИФА РАН: Г.И. Горчаков, И.Г. Гранберг, А.С. Елохов, А.И. Игаев, А.А. Козлова, В.М. Копейкин, Б.С. Денисов, Л.В. Лисицына, Р.А. Шумский, Н.В. Панкратова, Е.В. Березина; сотрудники НИФХИ им. Л.Я. Карпова: А.В. Андропова, М.А. Иорданский, В.М. Минашкин, И.А. Невский, Ю.И. Обвинцев.

В экспериментах TROICA принимали участие несколько зарубежных организаций. Особое значение имело сотрудничество с Институтом Химии Макса Планка (Германия) – активным и надежным партнером российских организаций на протяжении всей многолетней работы. Директор МПИАС П. Крутцен является одним из идеологов и инициаторов проведения экспериментов TROICA. Его постоянная поддержка и активное участие в работах сотрудников МПИАС Й. Левильеда, Е. Оберландер, Д. Шарффе обеспечили успешное проведение первых экспериментов TROICA и заложили основу их последующего развития. Большую помощь в оборудовании новой лаборатории оказали

сотрудники ESRL NOAA (США) Дж. Элкинс, Д. Хёрст, П. Ромашкин. Тесное сотрудничество между ESRL и ИФА РАН проявилось в присуждении NOAA профессору Н.Ф. Еланскому Почетного звания “Герой окружающей среды (Environmental Hero Award)” в 2004 г. Участники экспериментов выражают глубокую благодарность руководителям и менеджерам фирм: АТТЕХ – Е.Н. Кадыгрову, HORIBA – Л. Бётлеру, Kipp and Zonen – Б.А.Х. Дитеринку, MLU – Т. Килгусу и Й. Килгусу за предоставленные для проведения измерений приборы. Успешной работе над проектами МНТЦ способствовало доброжелательное и заинтересованное отношение коллег-коллекторов: В.-М. Керминена, М. Кулмаля, М. Хайманна.

Подготовка и проведение экспериментов требовали значительного финансирования. Большое значение имела финансовая поддержка Международного научно-технического центра, Российского фонда фундаментальных исследований, Российской академии наук, а также международных программ INCO-COPERNICUS и INTAS.

При подготовке данной статьи были использованы результаты, полученные в рамках выполнения проектов РФФИ № 19-05-00352 (раздел 3.7), 17-29-05102 (разделы 4.1 и 5.1), 18-35-20031 (раздел 3.6) и РФФИ № 16-17-10275 (раздел 7.3).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Еланский Н.Ф.* Международные конвенции по атмосфере и климату и интересы России // Региональное развитие и сотрудничество. 1998. № 1–2. С. 7–69.
2. The Global Atmospheric Watch (GAW). Strategic Plan 2001–2007 // WMO, Geneva, 2000. 61 p.
3. *Безуглая Э.Ю., Смирнова И.В.* Воздух городов и его изменения // СПб.: Астерион, 2008. 254 с.
4. *Крутцен П.Й., Голицын Г.С., Еланский Н.Ф., Бренникмайер К.А.М., Шарффе Д., Беликов И.Б., Елохов А.С.* Наблюдения малых примесей в атмосфере над территорией России с использованием железнодорожного вагона-лаборатории // ДАН. 1996. Т. 350. № 6. С. 819–823.
5. *Elansky N.F.* Observations of the atmospheric composition over Russia using a mobile laboratory: the TROICA experiments // International Global Atmospheric Chemistry. Newsletter. 2007. № 37. P. 31–36.
6. *Crutzen P.J., Elansky N.F., Hahn M., Golitsyn G.S., Brenninkmeijer C.A.M., Scharffe D., Belikov I.B., Maiss M., Bergamaschi P., Rockmann T., Grisenko A.M., Sevastyanov V.V.* Trace gas measurements between Moscow and Vladivostok using the Trans-Siberian Railroad // J. Atmos. Chem. 1998. № 29. P. 179–194.
7. *Elansky N.F., Belikov I.B., Berezina E.V., Brenninkmeijer C.A.M., Buklikova N.N., Crutzen P.J., Elansky S.N., Elkins J.V., Elokho A.S., Golitsyn G.S., Gorchakov G.I., Granberg I.G., Grisenko A.M., Holzinger R., Hurst D.F., Igaev A.I., Kozlova A.A., Kopeikin V.M., Kuokka S., Lavrova O.V., Lisitsyna L.V., Moeseenko K.B., Oberlander E.A., Obvintsev Yu.I., Pankratova N.V., Postylyanina*

- kov O.V., Putz E., Romashkin P.A., Safronov A.N., Shenfeld K.P., Skorokhod A.I., Shumsky R.A., Tarasova O.A., Turnbull J.C., Vartiainen E., Weissflog L., Zhernikov K.V.* Atmospheric Composition Observations over Northern Eurasia using the Mobile Laboratory: TROICA Experiments // Moscow: ISTC Publ., 2009. 73 p. <http://www.ifaran.ru/troica/index.html>.
8. *Elansky N.F., Belikov I.B., Lavrova O.V., Skorokhod A.I., Shumsky R.A., Brenninkmeijer C.A.M., Tarasova O.A.* Chapter 8. Train-Based Platform for Observations of the Atmosphere Composition (TROICA Project). P. 175–196 // In “Air Pollution-Monitoring, Modelling and Health”. Ed. *Mukesh Khare*. Publisher: In Tech. 2012. 386 p. <https://doi.org/10.5772/1801>.
  9. *Panin L.V., Elansky N.F., Belikov I.B., Granberg I.G., Andronova A.V., Obvintsev Yu.I., Bogdanov V.M., Grisenko A.M., Mozgrin V.S.* Estimation of Reliability of the Data on Pollutant Content Measured in the Atmospheric Surface Layer in the TROICA Experiments // *Izv., Atmos. Oceanic Phys.* 2001. V. 37. Suppl. 1. P. S81–S91.
  10. *Elansky N.F., Lavrova O.V., Skorokhod A.I., Belikov I.B.* Trace gases in the atmosphere over Russian cities // *Atmos. Environ.* 2016. V. 143. P. 108–119. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.08.046>
  11. *Elansky N.F., Markova T.A., Belikov I.B., Oberlander E.A.* Transcontinental Observations of Surface Ozone Concentration in the TROICA Experiments: 1. Space and Time Variability. *Izv., Atmos. Oceanic Phys.* 2001. V. 37. Suppl. 1. P. S24–S38.
  12. *Golitsyn G.S., Elansky N.F., Markova T.A., Panin L.V.* Surface Ozone behavior over Continental Russia. *Izv., Atmos. Oceanic Phys.* 2002. V. 38. Suppl. 1. P. S116–S126.
  13. *Markova T.A., Elansky N.F.* Transcontinental Observations of the Surface Ozone and Nitrogen Oxide concentrations by using the Carriage-Laboratory // Ed. *I. Barnes*. *Global Atmospheric Change and its Impact on Regional Air Quality* / Kluwer Academic Publishers, Netherlands, 2002. P. 249–254.
  14. *Панкратова Н.В., Еланский Н.Ф., Беликов И.Б., Постыляков О.В., Скороход А.И., Шумский Р.А.* Озон и окислы азота в приземном воздухе Северной Евразии по наблюдениям в экспериментах TROICA // *Иzv. РАН. Физика атмосферы и океана*. 2011. Т. 47. № 3. С. 343–358.
  15. *Еланский Н.Ф.* Исследования атмосферного озона в России в 2007–2010 гг. // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*. 2012. Т. 48. № 3. С. 314–333.
  16. *Engvall Stjernberg A.-C., Skorokhod A., Paris J.D., Elansky N., Stohl A.* Low concentrations of near-surface ozone in Siberia // *Tellus. Series B-Chemical and Physical Meteorology*. 2012. V. 64. № 11607. P. 1–13.
  17. *Wagner T., Burrows J.P., Deutschmann T., Dix B., von Friedeburg C., Frieß U., Hendrick F., Heue K.-P., Irie H., Iwabuchi H., Kanaya Y., Keller J., McLinden C.A., Oetjen H., Palazzi E., Petritoli A., Platt U., Postlyakov O., Pukite J., Richter A., van Roozendaal M., Rozanov A., Rozanov V., Sinreich R., Sanghavi S., Wittrock F.* Comparison of box-air-mass factors and radiances for Multiple-Axis Differential Optical Absorption Spectroscopy (MAX-DOAS) geometries calculated from different UV/visible radiative transfer models // *Atmos. Chem. Phys.* 2007. V. 7. P. 1809–1833.
  18. *Postlyakov O.V., Belikov I.B., Elansky N.F., Elovkov A.S.* Observations of the ozone and nitrogen dioxide profiles in the TROICA-4 experiment // *Advances in Space Research*. 2006. V. 37. P. 2231–2237.
  19. *Маркова Т.А., Еланский Н.Ф., Беликов И.Б., Грисенко А.М., Севастьянов В.В.* Распределение окислов азота в приземном слое атмосферы над континентальными районами России // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*. 2004. Т. 40. № 6. С. 811–813.
  20. *Konovalov I.B., Beekmann M., Vautard R., Burrows J.P., Richter A., Nub H., Elansky N.* Composition and evaluation of modeled and GOME measurement derived troposphere NO<sub>2</sub> columns over Western and Eastern Europe // *Atmos. Chem. Phys.* 2005. V. 5. P. 169–190.
  21. *Konovalov I.B., Elansky N.F., Zvyagintsev A.M., Belikov I.B., Beekmann M.* Validation of a chemistry transport model of the lower atmosphere over central European Russia using the data of ground-based and satellite measurements // *Meteorology and Gidrology*. 2009. № 4. P. 65–74.
  22. *Oberlander E.A., Brenninkmeijer C.A.M., Crutzen P.J., Elansky N.F., Golitsyn G.S., Granberg I.G., Scharffe D.H., Hofmann R., Belikov I.B., Paretzke H.G., van Velthoven P.F.J.* Trace gas measurements along the Trans-Siberian railroad: The TROICA-5 expedition // *J. Geophys. Res.* 2002. V. 107. № D14. <https://doi.org/10.1029/2001JD000953>
  23. *Тарасова О.А., Бренникмайер К.А.М., Еланский Н.Ф., Кузнецов Г.И.* Исследование изменчивости концентрации СО над Россией по данным экспедиций TROICA // *Оптика атмосферы и океана*. 2005. Т. 18. № 5–6. P. 511–516.
  24. *Tarasova O.A., Brenninkmeijer C.A.M., Assonov S.S., Elansky N.F., Röckmann T., Sofiev M.A.* Atmospheric CO along the Trans-Siberian Railroad and River Ob: Source Identification using Isotope Analysis // *J. Atmos. Chem.* 2007. V. 57. № 2. P. 135–152.
  25. *Беликов И.Б., Бренникмайер К.А.М., Еланский Н.Ф., Ралько А.А.* Приповерхностная концентрация метана и оксидов углерода над континентальной территорией России по результатам экспериментов TROICA // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*. 2006. Т. 42. № 1. С. 50–63.
  26. *Tarasova O.A., Brenninkmeijer C.A.M., Assonov S.S., Elansky N.F., Hurst D.F.* Methane variability measured across Russia during TROICA expeditions // *Environmental Sciences*. 2005. V. 2(2–3). P. 241–251.
  27. *Tarasova O.A., Brenninkmeijer C. A. M., Assonov S.S., Elansky N. F., Röckmann T., Brass, M.* Atmospheric CH<sub>4</sub> along the Trans-Siberian Railroad (TROICA) and River Ob: Source Identification using Stable Isotope Analysis // *Atmospheric Environment*. 2006. V. 40. № 29. P. 5617–5628.
  28. *Tarasova O.A., Houweling S., Elansky N., Brenninkmeijer C.A.M.* Application of stable isotope analysis for improved understanding of the methane budget: comparison of TROICA measurements with TM3 model simulations // *J. Atmos. Chem.* 2009. V. 63. № 1. P. 49–71.
  29. *Bergamaschi P., Brenninkmeijer C.A.M., Hahn M., Rockmann T., Schaffe D., Crutzen P.J., Elansky N.F.,*

- Belikov I.B., Trivett N.B.A., Worthy D.E.J.* Isotope analysis based on source identification for atmospheric CH<sub>4</sub> and CO sampled across Russia using the Trans-Siberian railroad // *J. Geophys. Res.* 1998. V. 103. № D7. P. 8227–8235.
30. *Rockmann T., Brenninkmeijer C.A.M., Hahn M., Elansky N.* CO mixing and isotope ratios across Russia; trans-Siberian railroad expedition TROICA-3, April 1997 // *Chemosphere: Global Change Science.* 1999. № 1. P. 219–231.
31. *Turnbull J.C., Miller J.B., Lehman S.J., Hurst D., Peters W., Tans P.P., Southon J., Montzka S., Elkins J., Mondeel D.J., Romashkin P.A., Elansky N., Skorokhod A.* Spatial distribution of  $\Delta^{14}\text{CO}_2$  across Eurasia: measurements from the TROICA-8 expedition // *Atmos. Chem. Phys.* 2009. V. 9. P. 175–187.
32. *Еланский Н.Ф., Голицын Г.С., Власенко Т.С., Волох А.А.* Летучие органические соединения в приземном воздухе по наблюдениям вдоль Транссибирской железнодорожной магистрали // *ДАН.* 2000. Т. 373. № 6. С. 816–821.
33. *Elansky N.F., Golitsyn G.S., Vlasenko T.S., Volokh A.A.* Concentrations of Volatile Organic Compounds in Surface Air along the Trans-Siberian Railroad // *Izv., Atmos. Oceanic Phys.* 2001. V. 37. Suppl. 1. P. S10–S2.
34. *Тимковский И.И., Еланский Н.Ф., Скороход А.И., Шумский Р.А.* Исследование биогенных летучих органических соединений над территорией России // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана.* 2010. Т. 46. № 3. С. 347–356.
35. *Skorokhod A.I., Berezina E.V., Moiseenko K.B., Elansky N.F., Belikov I.B.* Benzene and Toluene in the surface air of North Eurasia from TROICA-12 campaign along the Trans-Siberian railway // *Atmos. Chem. Phys.* 2017. V. 17. P. 5501–5514. <https://doi.org/10.5194/acp-17-5501-2017>
36. *Березина Е.В., Моисеенко К.Б., Скороход А.И., Беликов И.Б., Еланский Н.Ф.* Ароматические летучие органические соединения и их роль в формировании озона на территории северной Евразии // *ДАН.* 2017. Т. 474. № 3. С. 356–360.
37. *Berezina E., Moiseenko K., Skorokhod A., Elansky N., Belikov I., Pankratova N.* Isoprene and monoterpenes over Russia and their impacts in tropospheric ozone formation // *Geography, Environment, Sustainability.* 2019. № 12(1). <https://doi.org/10.24057/2071-9388-2017-24>
38. *Andronova A.V., Granberg I.G., Iordansky M.A., Kopeikin V.M., Minashkin M.A., Nevsky I.A., Obvintsev Yu.I.* Studies of the Spatial and Temporal Distribution of Surface Aerosol along the Trans-Siberian Railroad. *Izv., Atmos. Oceanic Phys.* 2003. V. 39. Suppl. 1. P. S27–S34.
39. *Копейкин В.М.* Наблюдение сажевого аэрозоля в атмосфере над Россией в международных экспедициях TROICA // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана.* 2007. Т. 20. № 7. С. 641–646.
40. *Копейкин В.М.* Наблюдение содержания субмикронного аэрозоля в атмосфере над Россией в международных экспедициях TROICA // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана.* 2008. Т. 21. № 11. С. 970–976.
41. *Kuokka S., Teinilä K., Saarnio K., Aurela M., Sillanpää M., Hillamo R., Kerminen V.-M., Pyy K., Vartiainen E., Kulmala M., Skorokhod A.I., Elansky N.F., Belikov I.B.* Using a moving measurement platform for determining the chemical composition of atmospheric aerosols between Moscow and Vladivostok. *Atmos. Chem. Phys.* 2007. V. 7. № 18. P. 4793–4805.
42. *Vartiainen E., Kulmala M., Ehn M., Hirsikko A., Junninen H., Petäjä T., Sogacheva L., Kuokka S., Hillamo R., Skorokhod A., Belikov I., Elansky N., Kerminen V.-M.* Ion and particle number concentrations and size distributions along the Trans-Siberian railroad. *Boreal. Env. Res.* 2007. V. 12. № 3. P. 375–396.
43. *Еланский С.Н., Леконцева С.Н.* Распределение концентраций грибных спор различных таксономических групп в приземном воздухе в умеренных широтах России // *Микология и фитопатология.* 1998. Т. 32. № 1. С. 37–43.
44. *Еланский Н.Ф.* Исследования атмосферного озона в России в 2007–2010 гг. // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана.* 2012. Т. 48. № 3. С. 314–333.
45. *Еланский Н.Ф., Лаврова О.В., Мохов И.И., Ракин А.А.* Структура острова тепла над городами России по наблюдениям с передвижной лаборатории // *ДАН.* 2012. Т. 443. № 3. С. 366–371.
46. *Еланский Н.Ф., Лаврова О.В.* Малые газовые примеси в атмосфере российских городов по наблюдениям с мобильной лаборатории (Эксперименты TROICA) // *ДАН.* 2014. Т. 459. С. 1603–1608.
47. *Еланский Н.Ф., Локощенко М.А., Беликов И.Б., Скороход А.И., Шумский Р.А.* Изменчивость газовых примесей в приземном слое атмосферы Москвы // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана.* 2007. Т. 43. № 2. С. 246–259.
48. *Еланский Н.Ф., Лаврова О.В., Ракин А.А., Скороход А.И.* Антропогенные возмущения состояния атмосферы в Московском регионе // *ДАН.* 2014. Т. 454. № 4. С. 456–460.
49. *Еланский Н.Ф., Беликов И.Б., Голицын Г.С., Грисенко А.М., Лаврова О.В., Панкратова Н.В., Сафронов А.Н., Скороход А.И., Шумский Р.А.* Наблюдения состава атмосферы в Московском мегаполисе с мобильной лаборатории // *ДАН.* 2010. Т. 432. № 1. С. 649–655.
50. *Elansky N.F., Ponomarev N.A., Verevkin Y.M.* Air quality and pollutant emissions in the Moscow megacity in 2005–2014 // *Atmos. Environ.* 2018. V. 175(2). P. 54–64.
51. *Еланский Н.Ф., Моисеенко К.Б., Панкратова Н.В.* Фотохимическая генерация озона в шлейфах антропогенных выбросов над Хабаровским краем // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана.* 2005. Т. 41. № 4. С. 511–519.
52. *Shakina N.P., Ivanova A.R., Elansky N.F., Markova T.A.* Transcontinental Observations of Surface Ozone Concentration in the TROICA Experiments: 2. The Effect of the Stratosphere-Troposphere Exchange. *Izv., Atmos. Oceanic Phys.* 2001. V. 37. Suppl. 1. P. 39–48.
53. *Еланский Н.Ф., Невраев А.Н.* Высоковольтные линии электропередач как возможный источник озона в атмосфере // *ДАН.* 1999. Т. 365. № 4. С. 533–536.

54. *Elansky N.F., Panin L.V., Belikov I.B.* Influence of High-Voltage Transmission Lines on Surface Ozone Concentration. *Izv., Atmos. Oceanic Phys.* 2001. V. 37. Suppl. 1. P. S92–S101.
55. *Reshetnikov A.I., Paramonova N.N., Shashkov A.A.* An evaluation of historical methane emissions from the Soviet gas industry // *J. Geophys. Res.* 2000. V. 105. D3. P. 3517–3529.
56. *Dedikov J.V., Akopova G.S., Gladkaja N.G., Piotrovsky A.S., Markellov V.A., Salikhov S.S., Kaesler H., Ramm A., Mueller von Blumencron A., Lelieveld J.* Estimating methane releases from natural gas production and transmission in Russia // *Atmos. Environ.* 1999. V. 33. P. 3291–3299.
57. *Berezina E.V., Elansky N.F., Moiseenko K.B., Belikov I.B., Shumsky R.A., Safronov A.N., Brenninkmeijer C.A.M.* Estimation of nocturnal  $^{222}\text{Rn}$  soil fluxes over Russia from TROICA measurements // *Atmos. Chem. Phys.* 2013. № 13. P. 11695–11708. <https://doi.org/10/5194/acp-13-11695-2013>
58. *Березина Е.В., Еланский Н.Ф., Моисеенко К.Б., Сафронов А.Н., Скороход А.И., Беликов И.Б., Шумский Р.А.* Оценка биогенных эмиссий  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}_2$  и сухого осаждения  $\text{O}_3$  по одновременным измерениям  $^{222}\text{Rn}$  в экспедициях TROICA // *ФАО.* 2014. Т 50. № 6. С. 663–674.
59. *Hurst D.F., Romashkin P.A., Elkins J.W., Oberlander E.A., Elansky N.F., Belikov I.B., Granberg I.G., Golitsyn G.S., Grisenko A.M., Brenninkmeijer C.A.M., Crutzen P.J.* Emissions of ozone-depleting substances in Russia during 2001 // *J. Geophys. Res.*, 2004. V. 109. № D14303. <https://doi.org/10.1029/2004JD004633>
60. *Elansky N.F.* Air quality and CO emissions in the Moscow megacity // *Urban Climate.* 2014. Vol. 8. P. 42–56. <https://doi.org/10.1016/juclim.2014.01.007>
61. WMO Global Atmosphere Watch Strategic Plan: 2008–2015 // GAW Report № 172. 2007. 104 p.
62. *Белан Б.Д., Ивлев Г.А., Козлов А.С., Маринайте И.И., Пененко В.В., Покровский Е.В., Симоненков Д.В., Фофанов А.В., Ходжер Т.В.* Сравнительная оценка состава воздуха промышленных городов Сибири // *Оптика атмосферы и океана.* 2007. Т. 20. № 5. С. 428–437.
63. *Антохина О.Ю., Антохин П.Н., Аршинова В.Г., Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Белан С.Б., Давыдов Д.К., Дудорова Н.В., Ивлев Г.А., Козлов А.В., Краснов О.А., Максюттов Ш.Ш., Machida T., Панченко М.В., Петстунов Д.А., Рассказчикова Т.М., Савкин Д.Е., Sasakawa Motoki., Симоненков Д.В., Складнева Т.К., Толмачев Г.Н., Фофанов А.В.* Исследование динамики концентрации парниковых газов на территории Западной Сибири // *Оптика атмосферы и океана.* 2019. Т. 32. № 9. С. 777–785.

## Observations of the Atmosphere Composition over Russia: TROICA Experiments

N. F. Elansky<sup>1, \*</sup>, G. S. Golitsyn<sup>1</sup>, P. J. Crutzen<sup>2</sup>, I. B. Belikov<sup>1</sup>,  
C. A. M. Brenninkmeijer<sup>2</sup>, and A. I. Skorokhod<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Obukhov Institute of Atmospheric Physics, RAS, Pyzhevskii per., 3, Moscow, 119017 Russia*

<sup>2</sup>*Max Planck Institute of Chemistry, Joh.-Jochim Becher-Weg, 27, Mainz, 55128 Germany*

\**e-mail: n.f.elansky@mail.ru*

The article summarizes results of unique experiments on observing the composition and state of the atmosphere over Russia (TROICA experiments). Scientists and technicians from different countries participated in these works. The main part of the experiments was the measurement of the content of trace gases and aerosols in the atmosphere, its meteorological and radiation characteristics on a mobile laboratory, which was specially designed and built for transcontinental observations on the network of electrified railways of Russia. During the TROICA experiments, a large amount of information which continues to be analyzed has been collected. The article discusses previously published most important results and newer ones, which allows us to form an integral picture of the spatial distribution and temporal variability of the atmospheric composition over the vast territory of Northern Eurasia.

**Keywords:** TROICA, atmospheric composition over the Northern Eurasia, air quality, air pollution, long-range transport, trace gases, aerosols, volatile organic compounds, ozone-depleting substances, emissions of pollutants