

На правах рукописи



Панкратова Наталья Владимировна

**РЕГИОНАЛЬНЫЕ ОСОБЕННОСТИ СОСТАВА
АТМОСФЕРЫ НАД ТЕРРИТОРИЕЙ РОССИИ**

25.00.29 – Физика атмосферы и гидросферы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

Москва – 2014

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте физики атмосферы им. А.М. Обухова Российской академии наук

Научный руководитель:

Член-корреспондент РАН, доктор физико-математических наук,
профессор
Еланский Николай Филиппович

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, профессор,
заведующий лабораторией, Федеральное государственное
бюджетное учреждение науки Институт энергетических проблем
химической физики им. В.Л. Тальрозе РАН
Ларин Игорь Константинович

кандидат физико-математических наук, старший научный
сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение
науки Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН
Кропоткина Елена Петровна

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт
прикладной физики Российской академии наук.

Защита диссертации состоится "22" мая 2014 г. в 11 часов на заседании
диссертационного совета Д 002.096.01 в Федеральном государственном
бюджетном учреждении науки Институте физики атмосферы им. А.М. Обухова
Российской академии наук (119017, г. Москва, Пыжевский пер., д. 3).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИФА им. А.М. Обухова
РАН.

Автореферат разослан " 21 " апреля 2014 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 002.096.01
кандидат географических наук

Л.Д. Краснокутская

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы.

Атмосфера представляет собой химически сложную систему, находящуюся во взаимодействии с земной поверхностью, океаном и биосферой. Ее состав непрерывно меняется. В последнее столетие эти изменения резко ускорились в результате человеческой деятельности. Промышленностью, транспортом, коммунальными службами в атмосферу выбрасываются опасные для человека и живой природы химически активные и токсичные соединения. Некоторые из них формируются непосредственно в воздушной среде из относительно нейтральных химических предшественников. Такие вещества как углеводороды, окислы азота, углерода и серы меняют окислительные свойства атмосферы, т.е. способность атмосферы трансформировать загрязняющие примеси в нейтральные формы и выводить их из воздушной среды. Они также способствуют фотохимическому образованию озона в тропосфере, высокие концентрации которого сильно снижают биологическую продуктивность растений, в том числе и сельскохозяйственных культур, и негативно влияют на здоровье человека. Растворяясь в дождевых каплях, окислы азота и серы приводят к выпадению кислотных осадков, которые наносят большой ущерб природной среде в индустриальных регионах.

В последние десятилетия выявилось и другая тенденция – увеличение содержания в атмосфере аэрозолей и парниковых газов - окиси и двуокиси углерода, метана и некоторых других. Вследствие этого изменилось состояние климатической системы и наблюдается рост средней глобальной температуры. Потепление сопровождается рядом неблагоприятных явлений, в частности, увеличением повторяемости экстремальных метеорологических и экологических ситуаций (ливневых осадков, наводнений, ураганов, оползней и т.п.) и опустыниванием южных территорий.

Для наблюдения состава атмосферы и заблаговременного определения его резких изменений создана глобальная служба атмосферы, действующая под эгидой ВМО (Всемирной метеорологической организации). Она включает 26 глобальных станций (обсерваторий) и около 350 региональных станций и дает информацию о фоновом состоянии атмосферы. Эта служба дополняет национальные системы мониторинга, основной целью которых является контроль загрязнения атмосферного воздуха в городах.

Эксперименты по наблюдению состава атмосферы над континентальной Россией с передвижной железнодорожной лаборатории TROICA (TRAnscontinental Observations Into the Chemistry of the Atmosphere), проводимые с 1995 по 2010 г., в

существенной степени ликвидировали недостаток, а для некоторых регионов - полное отсутствие информации о составе атмосферы. Впервые были получены данные, которые позволили выявить пространственные и временные особенности распределения большого числа газовых составляющих атмосферы и аэрозолей над значительной частью территории России, причем особенности различного масштаба от локального (несколько сотен метров) до континентального.

Цель работы .

Целью работы являлся анализ и систематизация данных наблюдений озона, оксидов азота и других газовых примесей в приземном слое атмосферы, полученных в экспериментах TROICA и на научных станциях ИФА РАН; исследование пространственных и временных особенностей их распределения и влияния на их формирование динамических и фотохимических процессов; анализ пространственной и временной изменчивости аэрозольных характеристик атмосферы.

Основные задачи исследования:

- Систематизировать и архивировать данные наблюдений, полученные в экспедициях TROICA и на московской станции ИФА РАН.
- Получить пространственное распределение ключевых газовых примесей в приземном слое атмосферы над территорией России в разные сезоны по данным экспедиций TROICA. Выявить характерные особенности пространственно-временной изменчивости полученных структур.
- Исследовать механизмы формирования экстремальных изменений состава приземного слоя атмосферы, используя транспортную фотохимическую модель RADM-2.
- Провести сравнения состава приземного воздуха в фоновых и городских условиях, выявить характерные отличия на примере Московского мегаполиса.
- Диагностировать экстремальные экологические ситуации, связанные с резкими изменениями качества воздуха.
- Провести анализ временных и пространственных характеристик аэрозольной оптической толщины над территорией России, определить ее экстремальные и фоновые уровни, дать объяснения возможным изменениям.

Методы исследования.

Для наблюдений использовались приборы, удовлетворяющие требованиям Глобальной службы атмосферы (GAW WMO). Их калибровка проводилась регулярно с использованием эталонных смесей Института химии Макса Планка (Германия) и ВНИИМ им. Д.И.Менделеева (Россия). Измерения физико-

химических свойств аэрозолей и сажевого аэрозоля проводились с использованием приборов ИФА РАН и НИФХИ им. Л.Я.Карпова. Все данные были систематизированы и внесены в единую базу TROICA-DB. Для анализа данных в экспедициях TROICA и на научных станциях использовались современная геоинформационная система ArcView, материалы наблюдений со спутников и базы данных о лесных, степных и торфяных пожарах. Анализ данных проводился с использованием статистических методов и фотохимических транспортных моделей NOAA-hysplit 4.8 и RADM-2.

Для определения характеристик прозрачности атмосферы использовалась база данных наблюдений на актинометрической сети Росгидромета “Прозрачность атмосферы”. Проанализированы данные с 53 станций, для которых по измеренным значениям потока прямой солнечной радиации у поверхности Земли выполнялись оценки аэрозольной оптической толщины вертикального столба атмосферы (АОТ) для длины волны 0.55 мкм. Рассматриваемые станции охватывают большую часть российской территории и расположены вне зон непосредственного влияния антропогенных источников атмосферного аэрозоля.

Научная новизна и основные результаты работы

Передвижная железнодорожная лаборатория является уникальным инструментом для изучения пространственных структур распределения примесей в атмосфере, ее радиационных и термодинамических свойств. Разработанные для оценки качества данных и их архивации процедуры позволили эффективно провести систематизацию и анализ полученной объемной информации.

Впервые были проанализированы и систематизированы данные измерений пространственного распределения озона, оксидов азота и др. составляющих атмосферы над обширными континентальными районами России, в том числе там, где ранее измерения не проводились. Определены суточные и сезонные вариации концентрации примесей, характеризующие их временную изменчивость над континентальными районами России.

По данным многолетних наблюдений концентрации ключевых примесей в атмосфере г. Москвы существенно уточнены характеристики качества городского воздуха и его окислительные свойства.

С помощью траекторной фотохимической модели был проведен анализ условий, приводящих к образованию экстремальных экологических ситуаций на Дальнем Востоке при поступлении в этот район сильно загрязненного воздуха из Японии и Кореи. Расчеты показали, что трансграничный перенос летучих органических загрязнений может приводить к интенсивной фотохимической

генерации озона и значительному повышению ПДК (предельно-допустимой концентрации), что может вызвать неблагоприятные воздействия на здоровье людей и состояние экосистем.

Впервые проанализирована пространственная и временная изменчивость аэрозольных характеристик атмосферы над всей территорией России, выявлены последствия крупных вулканических извержений (Эль-Чичон и Пинатубо) и экстремально жаркого лета 2010 года, когда отмечалось накопление продуктов горения в нижних слоях атмосферы.

Научная и практическая значимость результатов.

Проведенные исследования позволили установить ряд важных особенностей распределения и временной изменчивости состава атмосферы над Россией. Полученные результаты могут использоваться в прикладных и фундаментальных научных исследованиях, при анализе глобальных и региональных изменений фонового состояния атмосферы, оценке и прогнозировании качества воздуха в городах.

Полученные результаты могут также использоваться при анализе климатических изменений и для валидации климатических моделей. Данные наблюдений могут использоваться для валидации систем наблюдений приземных концентраций примесей и аэрозольной оптической толщины с космических аппаратов.

Сочетание наблюдений состояния атмосферы с передвижной лаборатории с численными транспортными фотохимическими моделями дает уникальную возможность идентифицировать источники загрязнений и определить их интенсивность, даже если они находятся за пределами страны.

Основные положения, выносимые на защиту

Характеристики пространственной и временной изменчивости приземной концентрации озона, оксидов азота и др. газов в масштабах континента, полученные по наблюдениям с передвижной лаборатории в период с 1995 по 2010 гг., в ходе международных экспедиций TROICA. Роль природных и антропогенных факторов в формирование пространственной структуры состава атмосферы.

В атмосфере Сибири в среднем ослаблены процессы фотохимического образования озона в приземном слое атмосферы. Суточные и сезонные вариации концентрации

озона определяются процессами вертикального перемешивания и сухого осаждения на земной поверхности.

Трансграничный перенос загрязненных воздушных масс, содержащих летучие органические соединения, на территорию России из стран Восточной Азии, может приводить в характерных для муссонного периода метеоусловиях к резкому увеличению концентрации озона в городах Дальнего Востока.

По данным многолетних наблюдений на экологической станции ИФА РАН в МГУ получены характеристики суточных, сезонных и межгодовых вариаций газовых примесей в приземном воздухе в г. Москве.

В условиях блокирующего антициклона резко возрастают приземные концентрации озона и всех основных загрязняющих примесей. Поступление в атмосферу Москвы продуктов горения биомассы из районов лесных и торфяных пожаров изменяет состояние пограничного слоя и приводит к дополнительному ухудшению качества воздуха.

Впервые по данным Российской актинометрической сети рассчитана аэрозольная замутненность атмосферы над территорией России, выявлена связь с крупными вулканическими извержениями и антропогенными факторами.

Личный вклад автора:

Автор принимал участие во всех этапах работы, в том числе в формулировке задач, анализе и интерпретации полученных результатов. Основные результаты диссертационной работы получены автором лично. Автор участвовал в экспериментах TROICA. Им были проведены все расчеты характеристик изменчивости содержания примесей в атмосфере. Пакет статистической обработки данных написан лично автором. Также при участии автора была создана и запатентована программа для расчета характеристик качества воздуха «Air Quality» (свидетельство о государственной регистрации №2013618614, 12.09.2013), программа обработки измеренных и рассчитанных данных по составу атмосферного воздуха и программа расчета показателей качества атмосферного воздуха (Фалалеева В.А., Скороход А.И., Гинзбург А.С., Панкратова Н.В. Заявка 2013616121, заявитель ИФА РАН.). Основные результаты работы, связанные с анализом и интерпретацией данных наблюдений, постановкой и проведением численных экспериментов, получены при активном участии автора.

Апробация работы. Результаты работы докладывались автором на российских и международных конференциях, школах и семинарах, основными из которых

являются EGU 2006-2013; MCAP-2006; Загрязнение атмосферы городов, Санкт-Петербург, 2013; The response of Northern Eurasian ecosystems to global climate: from observations to forecasting, Красноярск 2013; Всероссийская конференция молодых ученых "Состав атмосферы. Атмосферное электричество. Климатические процессы, 2006-2012. Symposium on Atmospheric Chemistry and Physics at Mountain Sites, Интерлакен, Швейцария, 2010. Результаты диссертации опубликованы в 14 работах, 12 из которых вышли в отечественных рецензируемых журналах.

Структура и содержание диссертации. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы. Рукопись содержит 122 страницы, 37 рисунков, 20 таблиц, список литературы из 109 названий.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во Введении обосновывается актуальность темы диссертации, сформулированы цели работы, перечислены основные этапы исследования и результаты.

Глава 1 посвящена исследованию фонового состава атмосферы над территорией России по данным TROICA (TRAnscontinental Observations Into the Chemistry of the Atmosphere). В **разделе 1.1** дается описание экспериментов TROICA, сроки проведения экспедиций и описание измерительного комплекса. Эксперименты, начавшиеся в 1995 г., имели целью заполнить дефицит данных для Северной Евразии – региона, имеющего принципиальное значение для определения причин и механизмов происходящих изменений глобального состояния атмосферы и климата Земли. Подробно были проанализированы крупномасштабные характерные для континента особенности пространственной и временной изменчивости приземного озона и окислов азота. Выделение из всего массива данных тех из них, которые получены в местности, не подверженной местному и региональному антропогенному воздействию, позволяет разделить вклад различных динамических и фотохимических процессов и вызванные ими эффекты. Критерии отбора $\text{NO} \leq 0.4$ ppbv, $\text{CO} \leq 0.2$ ppmv задают низкий фоновый уровень загрязнения, регистрируемый на высокогорных и удаленных островных станциях. Такие незагрязненные условия на Транссибирских маршрутах составляли значительную часть времени наблюдений от 35% летом, до 52% зимой - что говорит о слабом антропогенном воздействии на состав атмосферы над Северной Евразией в широтном поясе 48-58°с.ш..

Далее рассмотрено поведение примесей при наличии источников загрязнения и в удаленных (фоновых) районах. В разделе 1.2 даны характерные особенности распределения оксидов азота. Таблица 1 показывает характер изменчивости NO от весны к осени в разных условиях. В незагрязненном воздухе 75% всех значений NO весной и осенью не превышают 0.13-0.15 ppbv. Подобный уровень концентрации NO характерен для фоновых станций мониторинга атмосферы, расположенных в удаленных (как правило, это островные станции) и высокогорных районах. Летом концентрация NO в чистых условиях заметно выше (75% NO \leq 0.3 ppbv). Подобная изменчивость свойственна концентрации NO, осредненной по всем значениям. Нельзя связать такой рост с промышленным воздействием - эмиссии и концентрации NO летом в городах, наоборот, снижаются. Из других возможных региональных источников - горение биомассы, почвенные эмиссии и разложение азотных удобрений - наиболее вероятными являются – лесные пожары в Сибири и трансграничный перенос из Китая, включающий продукты сжигания отходов с/х производства, наиболее интенсивное в северо-восточной его части в июне месяце. Горение сухой травы рядом с полотном дороги, часто регистрировавшееся осенью 2005г. (TROICA-9), учитывалось при отборе данных и никак не сказалось на полученных фоновых характеристиках NO и NO₂. Таким образом, фоновые концентрации оксидов азота отражают общее состояние атмосферы в данном широтном поясе, не связанное с действием местных источников загрязнения.

Таблица 1. Вариации приземной концентрации NO и NO₂ (ВСЕ данные и ФОН) вдоль Транссибирской железной дороги Москва-Владивосток-Москва за период наблюдений 1999-2009 гг. (TROICA-5 – TROICA-12)

NO сезон	Условия	Среднее	Ст. откл	Медиана	Перцентили			
					10%	25%	75%	90%
Весна	ВСЕ	1.71	4.97	0.21	0.03	0.06	1.01	3.42
	ФОН	0.10	0.10	0.06	0.02	0.03	0.15	0.25
Лето	ВСЕ	1.51	4.09	0.40	0.12	0.20	0.98	3.02
	ФОН	0.22	0.10	0.20	0.09	0.13	0.30	0.37
Осень	ВСЕ	2.23	6.37	0.16	0.05	0.08	0.73	5.28
	ФОН	0.11	0.08	0.08	0.04	0.06	0.13	0.22

NO ₂ сезон	Условия	Среднее	Ст. откл	Медиана	Перцентили			
					10%	25%	75%	90%
Весна	ВСЕ	5.30	6.46	2.99	1.13	1.72	5.86	12.45
	ФОН	1.78	1.20	1.47	0.87	1.06	2.05	2.98
Лето	ВСЕ	3.32	4.13	2.02	0.60	1.07	3.97	7.20
	ФОН	1.60	1.34	1.24	0.50	0.80	1.96	3.03
Осень	ВСЕ	4.49	6.40	2.12	0.51	0.99	4.78	11.97
	ФОН	1.20	0.47	0.88	0.35	0.53	1.48	2.26

Описана сезонная и суточная динамика оксидов азота. На рис. 1 средние концентрации NO и NO₂ для всего широтного пояса и только для чистых условий сопоставлены с данными станции Зотино, Центральная Сибирь (60.8°с.ш., 89.4°в.д.) и Хоенпайсенберг, Германия (Hohenpeissenberg, 47,8°с.ш. и 11,0°в.д.; 985 м.н.у.м.). Значения концентрации NO₂ для чистых условий летом не превышают ее значений, характерных для горной альпийской станции, но больше, чем в удаленной области Сибири (Зотино). Летние высокие концентрации NO, наблюдавшиеся во всех экспедициях, приводят к росту NO₂, и их аномальный сезонный ход нельзя объяснить чем-то иным кроме частых в Восточной Сибири лесных пожаров и трансграничного переноса загрязнений.

По данным проведенного исследования, в незагрязненных условиях концентрации NO и NO₂ убывают в восточном направлении. Наибольшие значения долготных градиентов отмечаются весной и осенью (для NO+NO₂ около –5 ppb и –10 ppb на 10°в.д., соответственно). Летом градиент и для NO, и для NO₂ значительно слабее (для NO + NO₂ около –3 ppb на 10°в.д.), что может быть связано с горением биомассы и переносом загрязнений из Китая, Кореи и Японии в системе летнего Тихоокеанского муссона.

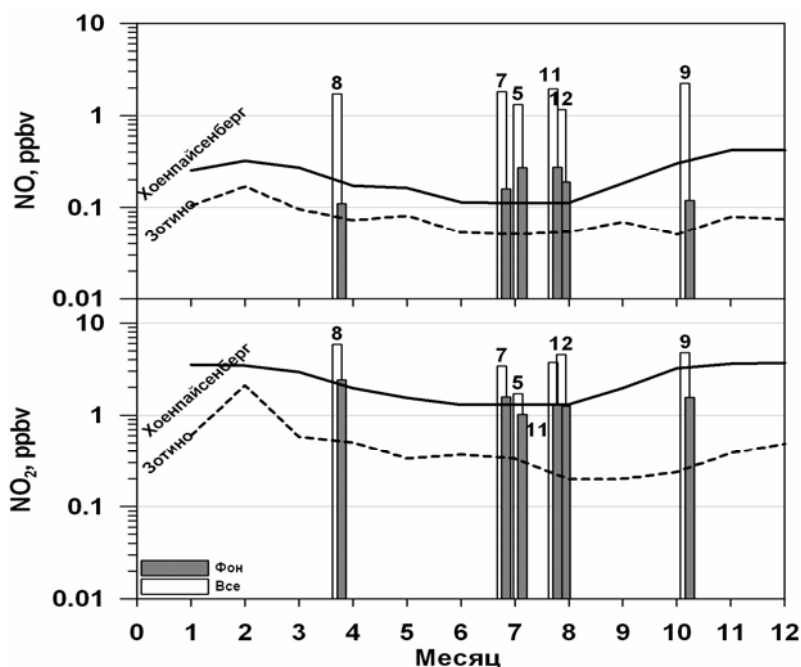


Рис. 1. Средние значения концентрации NO и NO₂ для экспедиций TROICA-5- TROICA-2 (незагрязненные условия). Сплошной линией показан сезонный ход NO и NO₂ и на европейской горной станции Хоенпайсенберг, пунктиром - на фоновой станции Зотино

В разделе 1.3 описаны характерные особенности распределения озона в фоновых условиях. Получено, что в чистых условиях концентрация O₃ всегда выше, чем средние её значения по всему Транссибу. Это превышение наибольшее в

холодный период года (зима-весна) и минимально летом, когда активизируется фотохимическое образование в загрязненном воздухе. И хотя в целом образование не компенсирует его разрушение, в отдельных районах с высоким содержанием NO_x , СО и ЛОС (в основном ароматических углеводородов и терпенов), генерация O_3 в теплый сезон может быть очень активной, приводя к концентрациям, существенно превышающих ПДК (до 166 ppbv, см. табл. 2). В зимнее время подобные процессы ослаблены. Но в условиях высокой солнечной освещенности и высоких концентраций ЛОС образование озона тоже может быть значительным. Проанализированы пространственно-временные вариации концентрации озона. В холодный период года (зима-весна) они проявляются слабее, чем в теплый период (лето-осень). На изменение концентрации озона влияют различные фотохимические и динамические факторы. В разные сезоны их активность разная, но летом почти для всех она наибольшая. Соответственно стандартное отклонение для лета – максимальное (табл. 2).

Таблица 2. Вариации приземной концентрации озона (ВСЕ данные и процент данных, полученных в незагрязненных условиях – ФОН) вдоль Транссибирской железной дороги (Москва-Владивосток-Москва, 1995-2008гг).

Сезон	Условия	Кол-во данных	Среднее	Ст. отклон	Медиана	Мода	Min	Max	Перцентили	
									10%	90%
Зима	ВСЕ	18825	32.5	10.0	34.7	42.0	1.5	77.7	18.6	42.8
	ФОН	52%	36.5	7.1	38.6	42.0	10.1	66.3	25.3	43.1
Весна	ВСЕ	34546	39.8	11.0	41.0	50.3	0.6	82.8	25.0	51.7
	ФОН	26%	43.9	8.9	45.0	50.3	8.3	81.5	32.1	53.2
Лето	ВСЕ	82912	23.7	12.2	23.2	21.0	0.1	166.1	7.9	39.8
	ФОН	36%	24.1	11.6	24.3	19.0	0.1	80.9	9.5	39.9
Осень	ВСЕ	17978	24.3	12.5	25.3	30.8	0.1	157.2	6.8	39.1
	ФОН	31%	26.7	8,1	28.1	30.8	0.1	52,6	15.9	35.6

Выявлен характерный сезонный ход концентрации озона. Важнейшей его особенностью является ярко выраженный весенний максимум и низкие летние значения. По форме полученный сезонный ход повторяет тот, который наблюдается на фоновых станциях Мейс Хед и Зотино, а по абсолютным значениям он находится между этими двумя станциями.

Пространственное распределение приземного озона в пределах данного широтного пояса в среднем близко к однородному. Наибольшие деформации поля озона связаны с метеорологическими процессами синоптического масштаба. На мезомасштабном уровне проявляются антропогенные воздействия, вызванные устойчивыми эмиссиями загрязняющих примесей в городах и промышленных центрах. Важной особенностью распределения является увеличение концентрации

озона в восточном направлении в незагрязненных условиях. Значимые положительные градиенты отмечаются во все сезоны, кроме зимнего (табл. 3) Средний по всем проездам градиент равен 0.47 ± 0.02 ppbv на 10° долготы.

Таблица 3. Долготный градиент концентрации O_3 , NO, NO_2 CO в фоновых условиях между Москвой и Владивостоком (ppbv/ 10° в.д.).

Вещество	ЗИМА	ВЕСНА	ЛЕТО	ОСЕНЬ
O_3 [ppbv]	-0.22 ± 0.01	1.0 ± 0.02	0.55 ± 0.02	0.83 ± 0.02
NO [ppbv]	-	-0.0046 ± 0.004	$-0.0035 \pm 1 \cdot 10^{-4}$	$-0.01 \pm 1 \cdot 10^{-4}$
NO_2 [ppbv]	-	-0.07 ± 0.003	-0.05 ± 0.003	-0.07 ± 0.003
CO [ppbv]	-	$-0.43 \pm 4 \cdot 10^{-2}$	$2.4 \pm 4 \cdot 10^{-2}$	$-1.3 \pm 8 \cdot 10^{-2}$

Также была исследована суточная динамика концентрации озона. В фоновых условиях выявлен значимый суточный ход. Максимум отмечается в послеполуденное время (15-17ч. местного времени), а минимум в ранние часы (04-07ч.). Минимальная амплитуда суточного хода – зимой, максимальная - летом. Величина этой амплитуды (от 8 до 15 ppbv) заметно превышает аналогичные значения для фоновых станций Зотино (0 ppbv – зимой и 10 ppbv – летом), Мейс Хед и высокогорных станций, хотя и значительно меньше, чем для равнинных континентальных станций Европы, Северной Америки и Юго-Восточной Азии.

Раздел 1.4 посвящен диагностике экстремальных уровней загрязнения по данным наблюдений TROICA. Был использован фотохимический и радиационный блоки модели построены на основе программного пакета REGIONAL ATMOSPHERIC CHEMISTRY MECHANISM (RACM) Version 2.

В **разделе 1.5** приведен пример моделирования условий, сложившихся летом 1999г. в районе Биробиджан-Архара. Показано, что при поступлении в этот район сильно загрязненного воздуха из Японии, в малоподвижной теплой и влажной воздушной массе, насыщенной органическими соединениями и окислами углерода, под воздействием солнечной радиации могут появляться области с высокими значениями озона вблизи источников NO_x . При устойчивой погоде превышающие ПДК значения концентрации озона могут существовать продолжительное время и оказывать резко неблагоприятное воздействие на здоровье местных жителей. Таким образом, трансграничный перенос ЛОС может приводить к увеличению загрязнений в условиях накопления примесей. **Раздел 1.6** содержит основные выводы к Главе 1.

Данные экспериментов TROICA дают представление о распределении характеристик атмосферы в широтном поясе 48-58° градусов с.ш. Пространственную картину в масштабах всей страны позволяет выявить анализ данных российской актинометрической сети. Глава 2. посвящена исследованиям крупномасштабных вариаций аэрозоля в толще атмосферы над континентом по данным российской актинометрической сети. В разделе 2.1 говорится об актуальности изучения пространственных характеристик прозрачности атмосферы. В разделе 2.2 описана база данных. В работе были проанализированы данные с 53 станций, для которых по измеренным значениям потока прямой солнечной радиации у поверхности Земли выполнялись оценки аэрозольной оптической толщины вертикального столба атмосферы (АОТ) для длины волны 0.55 мкм. Рассматриваемые станции охватывают большую часть российского региона и расположены вне зон непосредственных локальных антропогенных источников промышленных и городских выбросов атмосферного аэрозоля (пригороды, сельские местности, возвышенности и пр.). То есть, рассмотренные нами пространственно-временные изменения АОТ, формируются под воздействием естественных причин: адвекции воздушных масс из областей повышенной или пониженной аэрозольной нагрузки, вулканическими извержениями, лесными и тундровыми пожарами. В последние десятилетия произошло два крупных извержения вулканов Эль Чичон (1982 г.) и Пинатубо (1991 г.), которые проявились в температурном и аэрозольном режимах. Чтобы разделить наблюдения, полученные в разных условиях, данные были разбиты на два периода – замутненный (1976-1995 гг.) и период очищения (1996-2010 гг.). В разделе 2.3 описаны методы расчета характеристик прозрачности атмосферы. Отбор станций проведён с учётом качества и полноты инструментальных рядов. Интегральная прозрачность атмосферы рассчитывается по формуле (1):

$$P = \sqrt{\frac{S}{S_0}}, \quad (1)$$

где S – прямая солнечная радиация на нормальную к лучу поверхность, приведенная к среднему расстоянию между Землей и Солнцем и к высоте Солнца над горизонтом 30°; S_0 – солнечная постоянная 1.367 кВт/м². Фактор мутности Линке связан с P соотношением (2):

$$T = \frac{\lg P}{\lg Pi} = \frac{\lg S_0 - \lg S}{\lg S_0 - \lg Si} = -\frac{\lg P}{0.0433}, \quad (2)$$

где $S_0 = 1.367 \text{ кВт/м}^2$, S_i – значение прямой солнечной радиации у подстилающей поверхности в идеальной атмосфере при оптической массе атмосферы $m = 2$ (высота Солнца 30°). Величина T показывает, во сколько раз ослабление солнечной радиации в реальной атмосфере больше, чем в идеальной.

Расчёт аэрозольной оптической толщины вертикальной атмосферы проводился по специальной методике, разработанной и применённой в Метеорологической Обсерватории МГУ, при учёте ограничений и погрешностей метода:

$$\frac{\ln S - [0.1886w^{-0.1830} + (0.8799w^{-0.00094} - 1)/\sinh]}{0.8129w^{-0.0021} - 1 + (0.4347w^{-0.0321} - 1)/\sinh} = AOT \quad (3)$$

АОТ - аэрозольная оптическая толщина атмосферы. Показатель спектрального ослабления Ангстрема n , зависящий от распределения частиц по размерам и коэффициента преломления частиц предполагается равным 1; S – прямая солнечная радиация, приведенная к среднему расстоянию между Землей и Солнцем, Вт/м^2 ; w – влагосодержание атмосферы, г/см^2 . Условия наблюдений на станциях – это, как правило, погода антициклонального типа, при Солнце, свободном от облаков (безоблачная или малооблачная).

Влагосодержание атмосферы рассчитывается на основе данных о парциальном давлении водяного пара (e_p):

$$w = 0.1 \left[a (e_p \cdot 10^{-1}) + b \right] \quad (4)$$

Коэффициенты постоянны с мая по сентябрь и с октября по апрель. Из формулы (3) следует, что для расчетов АОТ величина w должна быть строго больше нуля, в противном случае АОТ уходит в сторону отрицательных значений. В этом случае АОТ не рассчитывалось. Затем были рассмотрены пространственно-временные вариации АОТ, которые подробно описаны в **разделе 2.4**. Аэрозольные характеристики атмосферы определяются рядом факторов. Рассчитаны средние, экстремальные значения годовых АОТ, стандартные отклонения от среднего годового значения для каждого из пунктов наблюдений и по всему периоду наблюдений 1976-2010 гг. (табл. 4).

Пространственно-временные неоднородности годовых АОТ наглядно показаны на 3-хмерной схеме (рис. 2а): пики соответствуют вулканическим извержениям (Эль Чичон – 1982 год, Пинатубо – 1991 год), а также эпизодам крупных тундровых пожаров последнего 10-тилетия в Восточной Сибири на станции Тура, частота и интенсивность которых возросла. Вариации среднего годового хода АОТ приведены на рис. 2б.

Таблица 4. Годовые значения АОТ, их экстремумы, осреднённые по всем станциям

Период	АОТ		σ	Тенденция изменения АОТ в % за 10 лет
	Среднее значение			
1976 – 2010	Среднее значение	0.14	0.04	-0.02
	max	0.29		+0.02
	min	0.07		-0.05
1995 – 2010	Среднее АОТ (σ)	0.12	0.04	-0.01
	max	0.22		+0.05
	min	0.05		-0,06

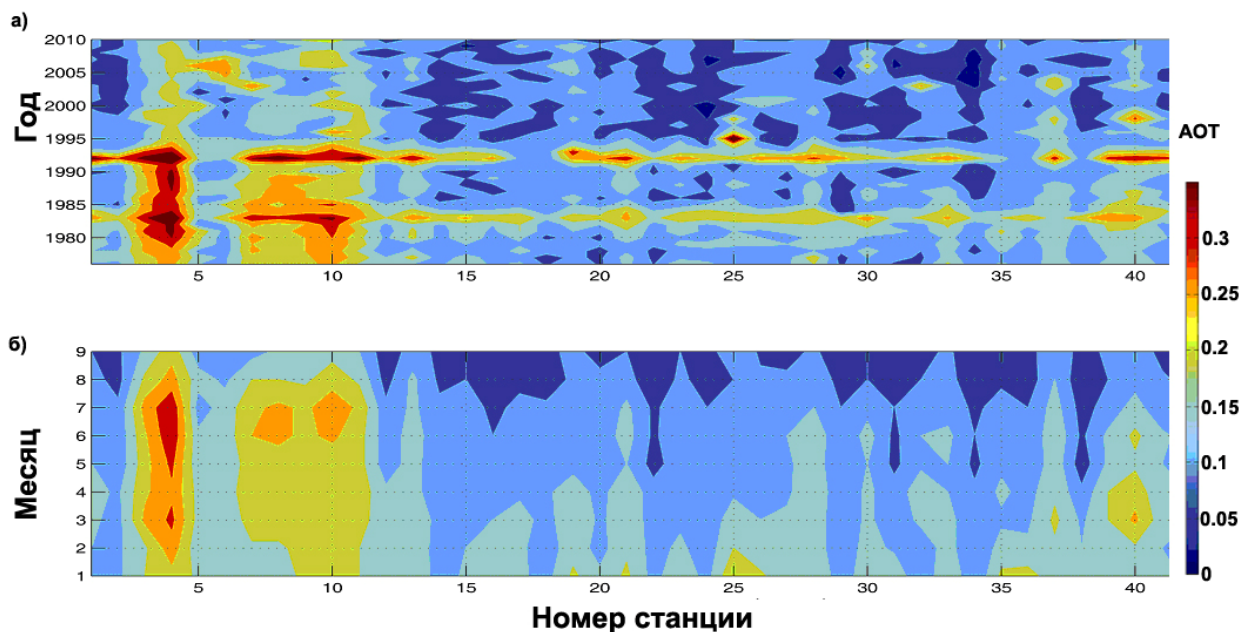


Рис. 2. Пространственно-временные вариации в АОТ: (а) многолетняя изменчивость средних годовых значений АОТ; (б) сезонные вариации АОТ для 53 станций.

Анализ показывает, что в среднем для всех станций имеется тенденция почти монотонного убывания АОТ от марта к октябрю с локальными пиками АОТ в апреле и в июле-августе. На всех станциях наблюдаются максимумы АОТ в апреле и в июле-августе, но летний максимум выражен более отчётливо на станциях, расположенных на юге ЕТР.

В большинстве районов наблюдения за поствулканический период выявлено очищение атмосферы от аэрозолей. В целом, для российского региона тенденция изменений АОТ отрицательна, абсолютное значение тренда (15 лет) колеблется от (-0,05) до (+ 0,02) и увеличивается в целом с юго-запада на северо-восток России. Средний тренд для региона -13% в год, максимальный 17% в год, а минимальный - 37% в год, при коэффициенте детерминированности не более 0.5. Это связано с очищением атмосферы от трансформированного вулканического аэрозоля и уменьшением антропогенной нагрузки в последние годы. Положительные

тенденции наблюдаются на севере ЕТР (Архангельск) и на Дальнем Востоке (станции Камчатки и Охотское), и почти нулевой тренд наблюдается на станциях Западной Сибири.

В целом, тренды АОТ указывают на “очищение” атмосферы от аэрозоля, связанное как с отсутствием крупных вулканических извержений и с промышленным “затишьем” в последние 15 лет. Отрицательные тенденции приблизительно одинаковы для удалённых и городских (и сельских) станций, но менее выражены осенью, нежели в весенне-летний период.

В разделе 2.5 обсуждается эффект от вулканических извержений. Последствия извержения вулканов Пинатубо и Эль Чичон проявляются на всей территории России. Локальный эффект увеличения АОТ спустя 5-10 месяцев после извержений может достигать 100%, а средний эффект, в рамках рассмотренного периода, составляет несколько процентов.

В разделе 2.6 исследуется влияние пожаров летом 2010 года на АОТ. Выявлены особенности пространственных изменений фактора мутности во время аномальной жары летом 2010 года. Установлены особенности пространственной изменчивости сезонного хода фактора мутности T и аэрозольной оптической толщины АОТ. Аномальным летом 2010 г. закономерности, полученные в поствулканический период, нарушаются. В июне 2010 г. пространственные вариации T близки к распределениям T_{post} с некоторым сдвигом областей максимальной прозрачности ($T = 2-2.5$) к северу при уменьшении средних для июня (табл. 2) по всему региону по сравнению с “поствулканическим” периодом.

В июле наблюдается “язык” повышенных значений фактора мутности в направлении с юга на север ($T = 3.5-4.0$). В августе оформляется очаг (замкнутая область) аномальной мутности атмосферы ($T = 4.5-5.5$) в области $48^{\circ}-55^{\circ}$ с.ш. и $37^{\circ}-42^{\circ}$ в.д, находящийся южнее Москвы и захватывающий Московский регион своей периферией ($T = 4.0-4.5$). Эта картина – результат действия высокого блокирующего антициклона, который препятствовал проникновению воздушных масс с запада, обеспечивал замкнутую циркуляцию воздуха на ЕТР, способствуя дальнейшему росту температуры и быстрому увеличению площади лесных пожаров. В результате аэрозоли, поступавшие в воздух от пожаров, накапливались в толще атмосферы. Этот процесс достиг своего максимального проявления в 1-й декаде августа. Картина пространственного распределения T для августа 2010 г., полученная по наземным измерениям потока прямой солнечной радиации, хорошо соответствует карте распределения АОТ на ЕТР (в области $50^{\circ}-65^{\circ}$ с.ш.; $30^{\circ}-55^{\circ}$ в.д.) для 1-й декады августа, рассчитанной по спутниковым данным MODIS.

В разделе 2.7 Представлены основные выводы к Главе 2

Глава 3 посвящена анализу состава приземного воздуха в городе Москве. В разделе 3.1 описана станция наблюдений ИФА, расположенная в наиболее чистом юго-западном секторе г. Москвы на Воробьевых горах (52°42' с.ш. 37°31' в.д. 191 м над уровнем моря) на территории метеобсерватории МГУ. Станция оборудована приборами для измерения концентрации газов, микрофизических и оптических свойств аэрозолей, интегрального содержания NO₂, как во всем вертикальном столбе атмосферы, так и в пограничном слое.

В разделе 3.2 представлены ряды наблюдений на экологической станции. Максимальная концентрация озона, достигающая 134.2 ppb, отмечалась летом 2010 года, в период аномальной жары. При этом среднее значение соответствует 14.7 ppb, медиана – 11.1 ppb (табл. 5). Такие значения соответствуют концентрациям озона в крупных городах вдоль Транссиба, которые были получены в ходе экспериментов TROICA и существенно ниже тех, которые отмечаются в крупных городах, расположенных в более низких широтах. Пониженная концентрация озона связана с насыщением городского воздуха оксидами азота и их взаимодействием с озоном

Таблица 5. Статистические характеристики средних часовых рядов наблюдений концентрации примесей на станции мониторинга ИФА за период 02.2002-12.2012гг.

	O ₃ ppb	NO ppb	NO ₂ ppb	CO ppm	CO ₂ ppm	CH ₄ ppb	NMHC ppm C	SO ₂ ppb	NH ₃ ppb
Min	0	0	1.55	0.05	300.6	1.14	0.003	0	1.1
Max	134.2	593.5	214.7	26.98	555.5	7.22	3.60	141.6	96.2
Среднее	14.56	15.14	21.33	0.52	392.3	1.97	0.39	1.37	6.4
10 перцентиль	0.8	0.41	8.75	0.22	371.7	1.83	0.25	0.4	3.1
Медиана	11.1	4.83	18.94	0.39	391.2	1.92	0.34	1	5.8
90 перцентиль	33.6	40.71	36.64	0.96	412.38	2.16	0.57	2.3	10.6
Стандартное отклонение	13.54	28.9	11.86	0.48	17.5	0.19	0.19	2.02	3.16
ПДКсс*	15	49	21	2.6	-	-	-	19	58
ПДКмр*	81	326	45	4.3	-	-	-	190	288

* ПДКсс – предельно допустимая концентрации среднесуточная, ПДКмр – предельно допустимая концентрации максимальная разовая. Нормативы соответствуют российским стандартам.

Повышение уровня озона до опасных значений происходило несколько раз, например, кратковременный всплеск O₃ отмечался в августе 2010 года (табл. 6). Содержание оксидов азота тесно связано с содержанием озона. Средняя

концентрация NO составляет 15.7 ppb, а максимальная достигает 593.5 ppb. Среднее значение NO₂ соответствует 21.5 ppb, а максимум 214.7 ppb. Такие значения концентраций оксидов азота существенно превышают уровень в других крупных городах, расположенных вдоль Транссиба, однако существенно меньше, чем средние концентрации в самых грязных городах мира – Пекине и Мехико. Так в Пекине средняя концентрация NO₂ составляет 60 ppb, в Мехико – 28 ppb. Что касается остальных примесей, то они соответствуют значениям, зарегистрированным в других крупных городах, расположенных вдоль Транссиба и существенно ниже ПДК.

Таблица 6. Статистические характеристики средних часовых рядов наблюдений опасных газовых составляющих на станции мониторинга ИФА 18.06.-18.08 2010 гг.

	O3 ppb	NO ppb	NO2 ppb	CO ppm	SO2 ppb
Min	0	0.05	1.55	0	0
Max	134.2	175.9	214.7	15.76	15.20
Среднее	31.01	13.16	25.79	1.01	1.92
Медиана	27.70	1.69	25.43	0.41	1.6
10 перцентиль	2.1	0.05	8.76	0.23	1
90 перцентиль	63.88	41.9	56.09	190	3.2
Станд. отклонение	24.35	23.89	20.80	1.88	1.18

В разделе 3.3 рассмотрены периодическая (суточная и сезонная) динамика газовых составляющих. Высокие концентрации оксидов азота наблюдаются в течение всего года. В отдельные месяцы 90 перцентиль NO₂ превышает 60 ppb, NO – 80 ppb. В Москве минимальные средние и медианные значения концентрации NO отмечаются с мая по июль (рис. 4а), максимум отмечается в феврале и сентябре. Кроме того, повышенное содержание NO наблюдаются в зимнее время года. Это связано с тем, что в холодный период из-за работы ТЭЦ появляется дополнительный источник NO, кроме того, зимой повторяемость и продолжительность температурных инверсий максимальна, что способствует накоплению примесей в приземном слое. Минимум среднего и медианного значения NO₂ фиксируется в июне. Максимум приходится на конец зимы. Это связано с тем, что летом, как правило, в хороших условиях перемешивания в нижних слоях атмосферы и сравнительно небольшой транспортной нагрузкой из-за сезона отпусков в приземном слое происходит быстрое рассеяние примесей. Кроме того, в теплый период время жизни NO₂ сокращается до нескольких дней. Зимой, напротив, происходит накопление NO₂ в нижнем слое атмосферы, в результате чего именно в марте-апреле его содержание в городском воздухе является

максимальной. Характерной особенностью распределения оксидов азота, в особенности концентрации NO, является существенное превышение средних значений над медианными, что свидетельствует о периодических кратковременных пиках концентрации оксидов азота на станции мониторинга.

Сезонный ход концентрации озона имеет два слабовыраженных максимума в весенний и летний периоды. Весенний максимум связан с интенсификацией на широте Москвы стратосферно-тропосферного обмена в марте и апреле и поступлением арктического воздуха с малым содержанием озона после разрушения циркумполярного вихря в апреле-июне. Второй максимум отмечается в июле, он связан интенсификацией фотохимических процессов генерации озона, а также с ослаблением транспортной нагрузки.

В разделе 3.4 рассмотрены неперiodические изменения, которые определяются как естественными, так и антропогенными факторами. Естественным фактором являются синоптические процессы, лесные пожары, перенос загрязненного воздуха из промышленных районов Европы. К антропогенным факторам относится режим городского транспорта, активизация или прекращение работы городской инфраструктуры (ТЭЦ, различные заводы), техногенные аварии на производстве.

В разделе 3.5 описана экстремальная экологическая ситуация на примере лета 2010 года. Сделан синоптический анализ. В результате действия блокирующего антициклона на Европейской территории установилась сухая жаркая погода. Отмечался устойчивый юго-восточный вынос воздушных масс с Каспийского региона. Характерной особенностью лета 2010 г. в Москве является увеличение концентрации всех измеряемых газовых примесей. Основную роль при этом играли способствующие накоплению примесей в приземном воздухе метеорологические условия, повышенные эмиссии веществ антропогенного происхождения и, наоборот, снижение по мере усиления засухи биогенных эмиссий, а также ослабление стока на земной поверхности. К этим процессам, обусловленным влиянием блокирующего антициклона, в начале августа добавилось воздействие лесных и торфяных пожаров, что привело к резкому изменению состава приземного воздуха и накоплению вредных примесей в приземном слое. Максимальные часовые и суточные значения концентрации газов в приземном воздухе летом 2010 г. и скорость их возрастания представлены в таблице 7.

В период действия антициклона до прихода дыма от пожаров наблюдается значимый недельный цикл оксидов азота и монооксида углерода. Отмечается резкое падение загрязнения воздуха в воскресные дни, что говорит о хорошем

перемешивании в пограничном слое. Выявлен значимый недельный цикл, проявившийся наиболее ярко в последнюю декаду июля (в период без задымления).

Таблица 7. Максимальные часовые и суточные значения концентрации газов в приземном воздухе летом 2010 г. и скорость их возрастания в условиях блокирующего антициклона (18 июня – 30 июля 2010 г.) ПДК_{СС} – среднесуточная предельная концентрация газов при T=30°C.

Примесь	Максимальные суточные значения	Максимальные часовые значения	ПДК _{СС} (T=30°C)	Скорость роста, ppb ⁻¹ сут.
O ₃ , ppb	49.6	134.2	16	0.48±0.07
NO, ppb	42.5	175.9	50	0.05±0.12
NO ₂ , ppb	52.0	214.7	21.7	0.64±0.09
CO, ppm	1.5	15.8	2.6	0.01 ±0.002
CO ₂ , ppm	410.3	548.4	-	0.58±0.14
CH ₄ , ppm	2.1	3.9	-	0.0006±0.001

Также в ходе исследования была получена логарифмическая зависимость концентрации озона от отношения концентрации NO₂ к NO, которая может быть использована для прогноза содержания озона в приземном воздухе Москвы:

$$[O_3] = 12.22 \ln([NO_2]/[NO]) + 15.3$$

Однако использование этого уравнения становится невозможным в экстремальных условиях. В период с 29.07 до 15.08 Москва находилась в плотной дымовой завесе от лесных и торфяных пожаров. В этом случае даже при малой величине отношения [NO₂]/[NO] отмечаются высокие концентрации озона, которые могут превосходить 100 ppb при средних часовых максимальных концентрациях озона для лета 50-60 ppb.

Аномальная жара 2010 года в Центральной России показала необходимость своевременного предупреждения населения о неблагоприятной экологической ситуации. В **разделе 3.6** проведена систематизация и анализ существующих подходов к оценке качества воздуха в крупных городах по данным мониторинга окружающей среды на основе расчета индексов загрязнения атмосферы (ИЗА). Описаны российский, европейский и американский подходы. В **разделе 3.7** проведено сравнение методик расчета индекса загрязнения атмосферы для оценки качества воздуха в г. Москве на основе экспериментальных данных. Из анализа следует, что в целом экологическая обстановка в городе Москве определяется содержанием мелкодисперсного аэрозоля (PM₁₀). По другим примесям экологическая ситуация преимущественно благоприятная. Из-за довольно низкой температуры воздуха генерация озона не столь интенсивна, как в тропическом

поясе и его концентрация не достигает опасных значений. Зимой генерация сильно подавлена и концентрация озона понижена. Значения концентраций других загрязняющих веществ во всех анализируемых случаях не превышали ПДК. Даже в ночные часы, при инверсиях в удаленных от автотрасс территориях, какой и является территория МГУ, концентрации вредных примесей практически не превышают ПДК. Предложена новая методика расчета индекса загрязнения, которая включает 5 уровней загрязнения и использует 6 измеряемых компонентов (PM₁₀, NO₂, CO, O₃, SO₂, общая концентрация неметановых углеводородов) (табл. 8). Поучено, что наличие высоких концентраций аэрозоля, особенно пылевой фракции, является основной причиной, снижающей качество воздуха в Москве. Расчет индекса загрязнения атмосферы основан на предположении, что на уровне ПДК все вредные вещества характеризуются одинаковым влиянием на человека, а при дальнейшем увеличении концентрации степень их вредности возрастает с различной скоростью, которая зависит от класса опасности вещества.

Таблица 8 – Диапазоны концентраций приземных газовых концентраций газов для вычисления индекса загрязнения.

Параметр	0-50 Низкий	51-100 Умеренный	101-200 Неблагоприятный для восприимчивых групп населения	201-300 Высокий	>301 Опасный
PM ₁₀ мкг/м ³	0-38	38-75	75-150	150-300	>301
NO ₂ мкг/м ³	0-50	51-100	100-200	200-400	>401
CO мкг/м ³	0-2500	2500-5000	5000-7500	7500-10000	>10000
O ₃ мкг/м ³	0-100	100-160	160-200	200-240	>241
NMHC ppm	0-0.5	0.5-1	1-2	2-4	>4
SO ₂ мкг/м ³	0-15	15-30	30-60	60-120	>120

В целом Московскому мегаполису свойственно умеренное загрязнение городской среды. Отличительной особенностью Москвы является малое содержание SO₂ в воздухе. По этому показателю она является наиболее чистым городом из всех мегаполисов. В разделе 3.9 изложены выводы к Главе 3.

В работе получены следующие новые результаты:

- Создана уникальная база данных о концентрации в приземном воздухе озона, окислов азота и других парниковых газов, радиационных и метеорологических характеристик атмосферы, полученных в ходе трансконтинентальных экспедиций с передвижной лаборатории вдоль Транссибирской железнодорожной магистрали с 1995 по 2010 гг. (эксперименты TROICA). Выявлены особенности пространственного распределения и временной изменчивости газовых примесей над континентом для широтного пояса 48-58° с.ш. отдельно для загрязненных и фоновых условий. Характерной особенностью фонового распределения является уменьшение концентрации окислов азота и рост концентрации озона и окиси углерода к востоку континента. Фотохимическое образование озона на территории Сибири в целом малоактивное. Заметные повышения его концентрации связаны с лесными и степными пожарами, генерацией в загрязненных воздушных массах при дальнем и трансграничном переносе из стран Восточной Азии, а также с активным стратосферно/тропосферным обменом на востоке континента.
- Суточные и сезонные изменения озона, оксидов азота и других примесей на территории Сибири имеют характерные особенности, отличные от тех, которые наблюдаются на фоновых станциях, но в прибрежных и высокогорных районах. При высокой устойчивости пограничного слоя (мощных и продолжительных температурных инверсиях) в зоне бореальных лесов происходит интенсивное сухое осаждение газовых примесей на земной поверхности. В частности, существенное преобладание стоков озона над его образованием отводит Сибири важную роль в глобальном балансе озона.
- В городах Дальнего Востока в период летнего муссона зарегистрированы повышенные концентрации озона, в некоторых случаях существенно превышающие ПДК. С помощью траекторной фотохимической модели показано, что активная генерация озона происходит в ходе трансграничного переноса загрязненных воздушных масс, содержащих продукты окисления летучих органических соединений (вторичных ЛОС).
- Выполнены исследования временной изменчивости газовых примесей в г. Москве по данным многолетних наблюдений на Московской экологической станции ИФА РАН. Показаны характерные различия между изменчивостью озона в фоновых и городских условиях. Выделен семидневный цикл в изменении состава атмосферы, вызванный действием антропогенных факторов.

- Анализ изменения состава городского воздуха (Московский регион) в экстремальных условиях лета 2010 г. дал несколько новых важных результатов. Подробно проанализирована уникальная ситуация, связанная с блокирующим антициклоном и с воздействием пожаров летом 2010 года. Выявлены характерные особенности роста приземной концентрации примесей в условиях высокой устойчивости пограничного слоя атмосферы в период существования блокирующего антициклона. Аномальная ситуация позволила уточнить влияние различных факторов на приземную концентрацию примесей с различным временем жизни.
- По данным российской актинометрической сети впервые получены пространственные и временные характеристики прозрачности атмосферы. Оценен вклад вулканических извержений и природных пожаров. Выявлено уменьшение АОТ с юго-запада на северо-восток при наличии районов постоянной повышенной аэрозольной замутнённости на юго-западе и юго-востоке российского региона. На этом фоне проявляются очаги повышенной тропосферной аэрозольной нагрузки, особенно ярко это проявляется на фоне глобального очищения атмосферы от стратосферного аэрозольного слоя в период с 1995 года.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ В РЕЦЕНЗИРУЕМЫХ ИЗДАНИЯХ

1. Еланский, Н.Ф., Моисеенко К.Б., **Панкратова Н.В.** Фотохимическая генерация озона в шлейфах антропогенных выбросов над Хабаровским краем // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2005. Т. 41. № 4. С. 511-519.
2. И. Н. Плахина, **Н. В. Панкратова**, Е. Л. Махоткина. Пространственные вариации фактора мутности атмосферы над Европейской территорией России в условиях аномального лета 2010 г. Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2011. Т. 47. № 6. С.1–6.
3. Плахина И.Н., Махоткина Е.Л., **Панкратова Н.В.** Вариации аэрозольной оптической толщины атмосферы на территории России в последние 30 лет: сезонные изменения и многолетний ход // Метеорология и гидрологи. 2007. № 2. С. 19–29.
4. Плахина И.Н., **Панкратова Н.В.**, Махоткина Е.Л. Вариации аэрозоля в толще атмосферы по данным российской актинометрической сети (1976–2006 гг.) // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2009. Т. 45. № 4. С.489–500.
5. Махоткина Е.Л., Лукин А.Б., Плахина И.Н., **Панкратова Н.В.** Анализ годового хода и межгодовой изменчивости аэрозольной оптической толщины атмосферы над территорией России//Исследование Земли из космоса. 2006. № 5. С. 63-71.

6. Н.Ф.Еланский, И.Б.Беликов, академик Г.С.Голицын, А.М.Грисенко, О.В.Лаврова, **Н.В.Панкратова**, А.Н.Сафронов, А.И.Скороход, Р.А.Шумский. Наблюдения состава атмосферы в Московском мегаполисе с передвижной лаборатории//Доклады академии наук, 2010, том 432, № 2, с. 250–256
7. **Н.В.Панкратова**, Н.Ф.Еланский, И.Б.Беликов, О.В.Лаврова, А.И.Скороход, Р.А.Шумский. Озон и окислы азота в приземном воздухе Северной Евразии по наблюдениям в экспериментах TROICA//Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2011. Т. 47. № 3. С. 343-358
8. Н.Ф. Еланский., И.И. Мохов, И.Б. Беликов, Е.В. Березина, А.С. Елохов, В.А. Иванов, **Н.В. Панкратова**, О.В. Постыляков, А.Н. Сафронов, А.И. Скороход, Р.А. Шумский. Газовые примеси в атмосфере над Москвой летом 2010 г.//Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2011. Т. 47. № 6. С.729-738.
9. Еланский., чл.-корр. И.И. Мохов, И.Б. Беликов, Е.В. Березина, А.С. Елохов, В.А. Иванов, **Н.В. Панкратова**, А.Н. Сафронов, Р.А. Шумский. Газовый состав атмосферного воздуха в г. Москве в экстремальных условиях лета 2010 г//Доклады академии наук. 2011. 437. № 1. С. 90-96.
10. Н.Ф. Еланский, И.И. Мохов, И.Б. Беликов, Е.В. Березина, А.С. Елохов, В.А. Иванов, **Н.В. Панкратова**, О.В. Постыляков, А.Н. Сафронов, А.И. Скороход, Р.А. Шумский. Газовый состав атмосферного воздуха в г. Москве в экстремальных условиях лета 2010 г//Доклады академии наук. 2011. Т. 437. № 1, с. 90-96.
11. Н.Ф. Еланский., И.И. Мохов, И.Б. Беликов, Е.В. Березина, А.С. Елохов, В.А. Иванов, **Н.В. Панкратова**, О.В. Постыляков, А.Н. Сафронов, А.И. Скороход, Р.А. Шумский. Газовые примеси в атмосфере над Москвой летом 2010 г.//Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2011. Т. 47. № 6. С.729-738.
12. Вивчар А. В., Моисеенко К.Б., **Панкратова Н.В.** Оценки эмиссий оксида углерода от природных пожаров в Северной Евразии в приложении к задачам регионального атмосферного переноса и климата//Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2010. Т. 46. № 3. С. 307-320.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ В НЕРЕЦЕНЗИРУЕМЫХ ИЗДАНИЯХ

13. Передвижная обсерватория «ТРОЙКА» и наблюдения состава атмосферы над Россией. Брошюра. 2006. Ред. Н.Ф.Еланский. Москва. ИФА РАН. 2006 44 с.
14. 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., ElokhoV 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.**, Postylyakov 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 experiment//2009. ISTC publ. Moscow. 73 p.

15. Н.Ф.Еланский, И.Б. Беликов, Е.В. Березина, К.А.М. Бреннинкмейер, Н.Н. Букликова, Л. Вайсфлог, Е. Вартайнен, Г.С. Голицын, Г.И. Горчаков, И.Г. Гранберг, А.М. Грисенко, Н.Ф. Еланский, С.Н. Еланский, А.С. Елохов, К.В. Жерников, А.И. Игаев, А.А. Козлова, В.М. Копейкин, П. Крутцен, С. Куокка, О.В. Лаврова, Л.В. Лисицына, К.Б. Моисеенко, Е. Оберландер, Ю.И. Обвинцев, **Н.В. Панкратова**, О.В. Постыляков, Е. Путц, П.А. Ромашкин, А.Н. Сафронов, А.И. Скороход, О.А. Тарасова, Дж. С. Турнбулл, Д.Ф. Хёрст, Р. Хользингер, К.П. Шенфельд, Р.А. Шумский, Дж. В. Элкинс. Состав атмосферы над Северной Евразией: эксперименты TROICA//М., Издательство «Агрспас». 2009, 81 с.
16. Senik I.A., Elansky N.F., **Pankratova N.V.**, and Moeseenko K.B., Surface ozone variation at two levels (2070m and 870m) in the regions of the Northern Caucasus. Proc. XX Quadrennial Ozone Symposium, Ed. Christos S. Zerefos, Vol. 2, 2004, p. 911-912
17. N.F.Elansky, I.B.Belikov, T.A.Markova, K.B.Moeseenko, **N.V.Pankratova**. Experiment TROICA on Surface Ozone and Its Precursor Distributions Over Continental Regions of Russia. Ozone//Proceedings of the XX Quadrennial Ozone Symposium 1-8 June 2004, Kos, Greece// Ed. By Christos S.Serefos University of Athens. 2004, pp. 867-868.
18. **N. Pankratova**, N. Elansky. Diagnostics of Long-Range Atmospheric Transport of Ozone Basing on Measurements at Kislovodsk High-Mountain Scientific. Station Geophysical Research Abstracts, Vol. 8, 00614, 2006
19. Elansky, N.; Belikov, I.; Berezina, E.; Elokhov, A. Kopeikin, V.; Lavrova, O.; **Pankratova, N.**; Safronov, A. Shumsky, R.; Skorokhod, A. Trace Gases and Aerosols in surface Air of polluted and unpolluted Regions of Russia: TROICA Experiments. Geophysical Research Abstracts, Vol. 10, EGU2008-A-05022, 2008
20. **N. Pankratova**, N. Elansky, I. Belikov, and R. Shumskiy. Ozone and nitrogen oxides in surface air in Russia: TROICA experiments. Geophysical Research Abstracts, Vol. 11, EGU2009-9347, 2009
21. N.F. Elansky, I.A. Senik, A.Ya. Arabov, V.V. Savinykh, A.F. Dyachkov, A.S. Elokhov, A.V Dzhola, E.I. Grechko, A.A. Isakov, V.Ya. Kolpakov, V.N. Kozhevnikov, K.B. Moeseenko, **N.V. Pankratova**, S.A. Sitnov, V.Yu Skornyakov, and A.V.Vivchar. Kislovodsk high-mountain station: results of long-term atmospheric monitoring and future prospects //Symposium on Atmospheric Chemistry and Physics at Mountain Sites. June 8-10, 2010 in Interlaken, Switzerland. Paul Scherrer Institut. 2010. PP. 187-188
22. N. Elansky, I. Belikov, E. Berezina, A. Elokhov, V. Ivanov, **N. Pankratova**, O. Postylyakov, A. Safronov, A. Skorokhod, and R. Shumsky. Gaseous composition of surface air in Moscow during the extreme heat and fires in summer 2010 Geophysical Research Abstracts. Vol. 13, EGU2011-5894, 2011.
23. N. Elansky, I. Belikov, E. Berezina , A. Elokhov, O. Lavrova , **N. Pankratova**, A. Rakin, A. Safronov, A. Skorokhod, and R. Shumsky. TROICA experiments 1995-2010: Atmospheric species spatial distribution and temporal variations over Eurasia. Geophysical Research Abstracts Vol. 13, EGU2011-5986, 2011.

24. **N. Pankratova**. Development of assessing the air quality methodology for Russian cities. NewsLetters of the FP7 EC MEGAPOLI Project, Issue 12, September 2011, p. 13.
25. **N. Pankratova**, A. Skorokhod, and K. Moiseenko. Air quality in Moscow megacity: basic level and extreme cases Geophysical Research Abstracts. Vol. 14, EGU2012-2875, 2012.
26. A. Skorokhod, R. Shumsky, **N. Pankratova**, K. Moiseenko, A. Vasileva, E. Berezina, and N. Elansky. Trace gases over Northern Eurasia: background level and disturbing factors Vol. 14, EGU2012-4533, 2012.
27. Скороход А.И., Гинзбург А.С., **Панкратова Н.В.**, Фалалеева В.А. Использование комплексных показателей загрязнения для оценки качества воздуха в Московском мегаполисе Тез. докладов Всероссийского совещания «Состояние воздушного бассейна города Москвы в экстремальных погодных условиях лета 2010 года». М. 2010. С 42-44.
28. Andrey Skorokhod, Nikolai Elansky, Olga Lavrova, **Natalia Pankratova**, Igor Belikov, Victoria Falaleeva, Irina Mel'nikova, Andrey Remizov, and Irina Sitnikova Urban Air Pollution in Russia: Observations and Assessment/ Geophysical Research Abstracts/ Vol. 15, EGU2013-8273, 2013/ EGU General Assembly 2013
29. **Natalia Pankratova**, Nikolai Elansky, and Andrey Skorokhod The composition of polluted air in Moscow based on surface observations / Geophysical Research Abstracts/ Vol. 15, EGU2013-4632, 2013/ EGU General Assembly 2013
30. V. Rakitin, L. Yurganov, A. Safronov, E. Grechko, E. Fokeeva, A Dzhola, **N. Pankratova**. Comparison of Orbital and Ground Based Spectroscopic Measurements of CO and CH₄. Living Planet Symposium. ESA. Edinburg, UK. 9-13 September. 2013. 2-P-46
31. **Панкратова Н.В.**, Скороход А.И., Еланский Н.Ф., М.М. Хурамшина. Газовый состав приземного воздуха Москвы: характерные и экстремальные концентрации / Труды конференции «Загрязнение атмосферы городов». С-Пб. 1-3 октября 2013. С. 38.
32. **N.V. Pankratova**, N.F. Elansky, A.I. Skorokhod, and R.A. Shumsky. Ozone and nitric oxides in the surface air over Northern Eurasia according to observational data obtained in TROICA experiments. / The response of Northern Eurasian ecosystems to global climate: from observations to forecasting. Krasnoyarsk. 16-22 September. 2013. P. 23
33. **Панкратова Н.В.**, Скороход А.И., Еланский Н.Ф. Газовый состав приземного воздуха Москвы: фоновые и экстремальные условия, оценка качества воздуха // труды XVI Международной школы-конференции молодых ученых / Рос. акад. наук, Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова [и др.] – Москва : Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН. 2012. С. 155-158