АНАЛИЗ КРУПНОМАСШТАБНОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ СОСТАВА ПРИЗЕМНОГО ВОЗДУХА В СЕВЕРНОЙ ЕВРАЗИИ ПО ДАННЫМ НАБЛЮДЕНИЙ НА ФОНОВОЙ СТАНЦИИ ЗОТИНО И ЭКСПЕДИЦИЙ TROICA

Н.Ф.ЕЛАНСКИЙ, К.Б.МОИСЕЕНКО, А.И.СКОРОХОД, И.Б.БЕЛИКОВ, А.И.САФРОНОВ Н.В.ПАНКРАТОВА, А.В.ВИВЧАР, Е.В.БЕРЕЗИНА, И.И.ТИМКОВСКИЙ (ИФА РАН)

Аннотация. Наблюдаемые в последние десятилетия изменения состава приземного воздуха затронули не только индустриальные регионы, но и удаленные районы земного шара, в том числе Сибири и Арктики. Как показывают исследования, влияние климатически значимых антропогенных источников загрязнения атмосферы носит в целом нелокальный характер и во многих случаях прослеживается на региональном и трансконтинентальном масштабах. К сожалению, отсутствие систематических данных о химическом составе и уровне загрязненности воздуха для большей части территории нашей страны сильно затрудняет проведение исследований, связанных с проблемами качества воздуха, оценок экологических нагрузок и долгосрочных изменений состава воздуха. Данный пробел частично восполняют наблюдения, проводимые Институтом физики атмосферы им. А.М.Обухова РАН на фоновой станции мониторинга Зотино в Средней Сибири начиная с марта 2007 г., а также в экспедициях TROICA вдоль Транссибирской железнодорожной магистрали, проводимых ежегодно начиная с 1996 г Последние две экспедиции, совершенные летом 2007 и 2008 гг., были организованы в рамках Международного полярного года.

В статье приводятся результаты исследований отдельных физических факторов, определяющих динамику атмосферной фотохимической системы и баланс малых газовых компонент в пограничном слое атмосферы в Северной Евразии. Рассмотрены основные закономерности пространственной и временной изменчивости состава приземного воздуха для отдельных регионов России. Приводится ряд климатологических характеристик атмосферного переноса, определяющих динамику химического состава воздуха в удаленных районах Севера с учетом антропогенной нагрузки. Рассмотрены перспективы дальнейшего развития наблюдательной сети для мониторинга состава атмосферы и повышения эффективности получаемых на ее основе данных с точки зрения их использования в задачах экологии и климата.

1. Введение. Изменение состава атмосферы и климата Земли имеет ярко выраженные региональные особенности. Согласно докладу IPCC (IPCC, 2007) наиболее быстрое потепление за последние 100 лет отмечается в Сибири. Изменение климатической системы сопровождается изменением газового и аэрозольного состава атмосферы и состояния наземных экосистем. К сожалению, бурное развитие глобальной системы мониторинга состава атмосферы в 90-е годы не затронуло Россию. Более того, в этот период резко ухудшилось состояние действующей наблюдательной сети. Прекратили работу фоновые станции, где велись наблюдения концентрации O_3, NO_x, SO_2 и аэрозолей. В это критическое время профессор П. Крутзен (P. Crutzen) из Института химии Макса Планка (MPIC, Германия) предложил Институту физики атмосферы им. А.М.Обухова РАН провести наблюдения озона и его предшественников с движущегося поезда вдоль Транссибирской железной дороги Москва-Владивосток. При финансовой поддержке MPIC был подготовлен и проведен в ноябре-декабре 1995 г. первый эксперимент на специально оборудованном вагоне-обсерватории (рис.1) (Крутцен и др., 1996). Этот эксперимент показал, что наблюдения с вагона-обсерватории, если он находится в голове поезда и движется по электрифицированной дороге, дают достоверные данные о составе приземного воздуха в данной местности, а во многих ситуациях - и в региональном масштабе (Panin et al., 2001; Hurst, 2004).

Всего с 1995 по 2008 г. было проведено двенадцать подобных экспериментов, получивших название Trans-continental Observations Into the Chemistry of the Atmosphere (TROICA). Постепенное развитие наблюдательной базы вагона-обсерватории привело к значительному увеличению количества измеряемых параметров, что способствовало значительному расширению круга решаемых задач и эффективности использования данных наблюдений (Беликов и др., 2006; Elansky et al., 2001; Elansky, 2007).

Другим важным направлением в наблюдениях состава нижней атмосферы явилась организация фоновой станции мониторинга ИФА РАН в Средней Сибири, введенная в эксплуатацию в марте 2007 г. (см. рис. 2). В настоящий момент на стан-

ции осуществляются измерения приземных концентраций озона и окислов азота, а также стандартные метеорологические наблюдения. Одной из задач проводимых наблюдений является исследование эволюции химического состава воздуха при региональном и дальнем переносе от климатически значимых естественных и антропогенных источников эмиссий. Совместное использование данных фоновой станции и данных экспедиций TROICA позволяет исследовать влияние атмосферного переноса на состав воздуха в удаленных районах в зоне бореальных лесов и оценить влияние крупных индустриальных районов на экосистемы в Средней Сибири (Вивчар и др., 2007).

Главной задачей исследований, проводившихся отделом исследований состава атмосферы ИФА РАН в рамках Международного полярного года, являлось развитие научных представлений об основных физических и химических механизмах, влияющих на баланс малых газовых примесей и аэрозолей в атмосфере в северной Евразии, в т.ч. субарктических районах. Проведение подобных исследований в рамках МПГ становится понятным, если учесть, что влияние высоко урбанизированных индустриальных регионов на состав воздуха носит в целом нелокальный характер - оно хорошо выражено на региональном уровне, а во многих ситуациях прослеживается и в континентальном масштабе. В то же время отсутствие систематических данных о химическом составе и уровне загрязненности воздуха для большей части территории нашей страны сильно затрудняет проведение исследований, связанных с проблемами качества воздуха, оценок экологических нагрузок и долгосрочных изменений состава атмосферы на всей территории Северной Евразии, включая районы Севера и Арктики.

Рис. 1. Вагон-обсерватория:
слева - общий вид, справа - приборы газового комплекса

Проводившиеся в рамках Проекта 1.2 МПГ работы были направлены на то, чтобы частично восполнить указанные пробелы и подготовить методическую и теоретическую основу для развития в нашей стране современной системы мониторинга состава атмосферы. Исследования по тематике МПГ проводились в рамках крупного международного проекта (POLARCAT, 2008) и ряда долгосрочных проектов Международного научно-технического центра, направленных на исследования экосистем и химии тропосферы в Сибири и проведение комплексных наблюдений состава атмосферы с помощью вагона-обсерватории.

В предлагаемой статье дается обзор результатов, полученных на основе данных наблюдений на станции Зотино и в экспедициях TROICA с точки зрения основных закономерностей пространственной и временной изменчивости состава воздуха в различных регионах России. В пп. 2 и 3 приводятся краткие характеристики приборных комплексов вагона-обсерватории и наблюдательной станции Зотино. Основные закономерности пространственной и сезонной изменчивости состава приземного воздуха над Россией, установленные по результатам наблюдений TROICA, приведены в п. 4. Пункт 5 посвящен первым результатам наблюдений на станции Зотино. На при-

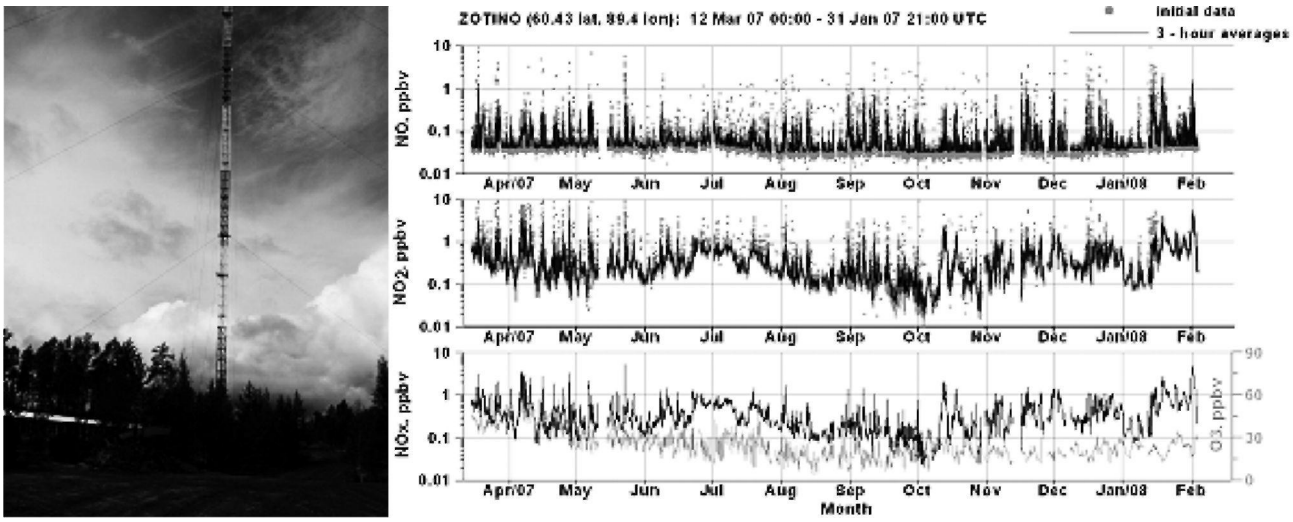

Рис. 2. Фоновая станция мониторинга Зотино.

Слева - вид высотной мачты. Справа: приземные (на высоте 4 м) концентрации NO, NO_2, NO_x и O_3, усредненные за 10 мин и 3 ч, по измерениям на станции Зотино с марта 2007 по февраль 2008 г. Данные для NO_x и O_3 представлены средними трехчасовыми значениями

мере задачи регионального переноса показано, каким образом данные подвижного вагона-обсерватории и наблюдательной станции могут совместно использоваться при исследованиях локальных и климатологических аспектов загрязнения атмосферы. Основные выводы работы приведены в Заключении.

2. Вагон-обсерватория. К настоящему моменту в организации системы наблюдений на базе вагона-обсерватории удалось реализовать ряд конструкционно-технических решений, обеспечивающих высокую эффективность приборных комплексов при решении задач в областях атмосферного переноса, климата и экологии (см. Еланский, 2006). Действующие приборные комплексы отличает

- полная автоматизация измерений, первичного отбора, контроля качества и сохранения данных;
- измерение всех основных газовых и аэрозольных компонент, радиационных и термодинамических параметров приземного слоя;
- широкий диапазон измеряемых концентраций (от фоновых до условий сильной загрязненности воздуха);
- высокое временное разрешение, составляющее для большинства измерений около 10 с;
- многофункциональность (возможность комплексных исследований воздействия загрязнений на состояние природных экосистем);
- соответствие международным стандартам - используются приборы, рекомендованные Глобальной службой атмосферы Всемирной Метеорологической Организации и имеющие международные сертификаты.

В период подготовки и проведения МПГ коллективом ИФА РАН были организованы три экспедиции TROICA: 10-я - в мае 2005 г., 11 и 12-я - в конце июля - начале августа 2007 и 2008 гг. Использовавшийся в прежних экспедициях приборный комплекс (Panin et al., 2001) был значительно усовершенствован - была проведена доукомплектация научного оборудования компонентами «hardware» и средствами автоматизации измерений. Были введены в эксплуатацию новые приборные комплексы: анализатор SO_2 Horiba APSA-360, анализатор метана и неметановых углеводородов Horiba APHA-360, акустический анемометр АЦАТ-3М, измерители субмикронного и сажевого аэрозоля, микроволновый температурный профилемер. Было разработано и протестировано программное обеспечение к приборам и проведена их адаптация к условиям непрерывных измерений. Существенным достижением стало включение в автоматизированный приборный комплекс вагона-обсерватории протонного масс-спектрометра PTR-MS для измерений в режиме in-situ концентраций в воздухе летучих органических соединений, ключевых для химии нижней атмосферы. Измерения 19-ти органических соединений с временем единичного отсчета концентраций 10 с вдоль всей Транссибирской магистрали были проведены в экспедиции TROICA-12 в июле-августе 2008 г. Следует отметить, что подобные комплексные исследования состава приземного слоя воздуха на территории нашей страны были осуществлены впервые. Помимо органических соединений, в экспедициях TROICA осуществлялись измерения озона O_3, монооксиси азота NO, двуокиси азота NO_2, монооксиси углерода CO, двуокиси углерода CO_2, метана CH_4, двуокиси серы SO_2 и аммиака. В состав приборного комплекса также входят: аэрозольный комплекс (измерения счетной и массовой концентраций частиц в отдельных диапазонах размеров, коэффициентов прямого и обратного рассеяния); метеорологический комплекс (измерения температуры, влажности, давления, скорости и направления ветра), приборы для дистанционных измерений:

- CO (общее содержание);
- O_3 (общее содержание в вертикальном столбе и вертикальный профиль в слое 0-45 км);
- NO_2 (общее содержание и профиль в слое 0-45 км);
- профиль температуры в слое 0-600 м с вертикальным разрешением 50 м.

Также проводились измерения изотопного состава CO, CO_2, CH_4 (^{13}C, ^{14}C, ^{18}O, D), измерения ^{222}Rn и радионуклидов, солнечной радиации (суммарной, UV-A, UV-B, скорости фотодиссоциации NO_2), фиксировались навигационные параметры (GPS), осуществлялась TV съемка местности, TV съемка облаков, проводились отборы проб воды, почвы и растительности.

3. Фоновая станция Зотино. Измерения приземных концентраций озона и окислов азота NO и NO_2 на фоновой наблюдательной станции Зотино, расположенной в 500 км к северу от Красноярска и в 20 км к западу от р. Енисей, осуществляются в непрерывном режиме с помощью автоматизированного приборного комплекса начиная с марта 2007 г. Станция расположена на на 60°26' с.ш., 89°24' в.д., на высоте 300 м над уровнем моря в таежной зоне вдали от крупных населенных пунктов и промышленных объектов. Характер рельефа - равнинный, с пологими возвышенностями и грядами при относительном перепаде высот до 50 м. Для измерений моноксида и диоксида азота применен газоанализатор типа TE42C-TL производства Termo Electron Corporation, обеспечивающий непрерывные измерения приземных (на высоте 4 м) концентраций NO и NO_2 в диапазоне от 0,05 до 400 ppbv (частиц на миллиард) с общей погрешностью ±1%. Время измерения единичного отсчета концентрации - 1 мин. Используемый на станции приборный комплекс проходит регулярное тестирование и калибровку. Анализ первых данных, полученных в период с марта по сентябрь 2007 г., приводится в (Вивчар и др., 2007). Организацию работы приборного комплекса осуществляют руководитель станции И.Б.Беликов, а также сотрудники института Р.А.Шумский и А.И.Скороход.

4. Пространственная и временная изменчивость состава приземного воздуха над Россией

4.1. Выделение фоновых условий. Как показал опыт наблюдений, при анализе состава атмосферы необходимо отделять данные, полученные в условиях антропогенного загрязнения, от данных, характерных для фоновых, невозмущенных условий. Подобное разделение необходимо не только для проведения корректного анализа, но и при анализе влияния удаленных источников загрязнений (пересечения шлейфов выбросов с подветренной стороны от источников). В нашем анализе при разделении воздушных масс использовались некоторые пороговые концентрации NO и CO, являющихся типичными антропогенными загрязнителями, при превышении которых воздух считался загрязненным. Поскольку время жизни для CO в приземном слое атмосферы значительно больше, чем для NO (несколько недель зимой и несколько дней летом, против нескольких часов для NO), выбранный критерий будет учитывать как влияние эмиссий от местных источников (по данным о NO), так и общий уровень региональных загрязнений (по данным о CO). Соответственно, под фоновыми условиями будем подразумевать отсутствие явного воздействия на анализируемую воздушную массу местных и региональных источников загрязнений. В качестве пороговых были приняты значения CO = 0,2 ppmv и NO = 0,4 ppbv, что также соответствует критериям загрязненности, установленным для ряда европейских фоновых станций мониторинга, например Mace Head, расположенной на Атлантическом побережье в Ирландии, и высокогорных альпийских станциях Niwot Ridge (3050 м над уровнем моря) и Jungfraujoch (3950 м над уровнем моря).

4.2. Особенности пространственного распределения окислов азота NO_x(=NO+NO_2). Транссибирская железнодорожная магистраль имеет большую протяженность - более 9 тыс. км - и крайне неравномерное расположение вдоль нее населенных пунктов и промышленных предприятий. Поскольку интенсивность природных источников окислов азота на единицу площади много меньше в сравнении с антропогенными, наблюдения повышенных концентраций NO_x связаны, как правило, с воздушными массами, находившимися непосредственно перед этим в зоне действия значительных антропогенных источников. Распределение содержания окислов азота во всех случаях крайне неравномерно вдоль трассы. Наряду с отдельными локальными всплесками, выделяются протяженные на сотни километров области с повышенным содержанием NO_2. Общей особенностью является высокая антикорреляция полей озона и двуокиси азота, обусловленная локальным фотохимическим равновесием между ними. Почти все локальные максимумы NO_2 соответствуют таким же по продолжительности минимумам O_3. В целом наиболее высокие концентрации NO_x приходятся на крупные города и их окрестности (см.

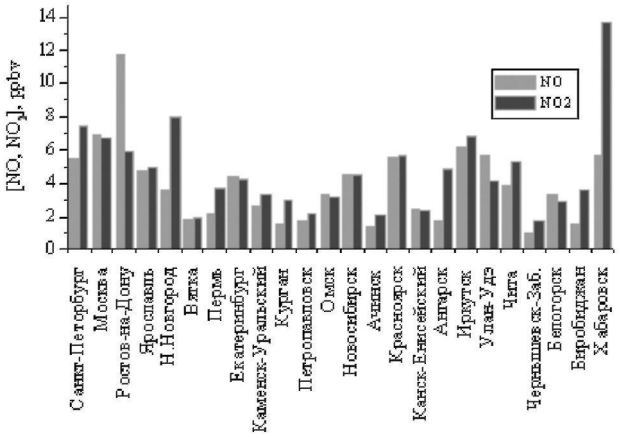

Рис. 3. Концентрации N0 и NO_2 в городах вдоль Транссибирской магистрали по экспедициям TROICA. Дополнительно приведены данные для С.-Петербурга и Ростова-на-Дону

рис. 3), при этом зимние концентрации значительно выше летних, что связано с особенностями сезонной изменчивости источников азота и интенсивности обменных процессов в атмосфере.

Для более детального анализа трасса Москва - Владивосток была разбита по географическому признаку на 5 участков в соответствии с доминирующими факторами, определяющими сезонный ход NO_x:

1) Москва - Екатеринбург (Восточно-Европейская равнина и Урал) - район с наибольшей плотностью расположения антропогенных источников NO_x; дополнительный вклад может давать вынос загрязнений из стран Западной Европы.

2) Екатеринбург - Новосибирск(Западно-Сибирская равнина) - район с интенсивными биогенными и антропогенными источниками парниковых газов, прежде всего метана.

3) Новосибирск - Иркутск (южная часть Среднесибирского плоскогорья) - крупный промышленный район с климатически значимыми антропогенными источниками эмиссий, влияние которых прослеживается в региональном масштабе (см. подробнее в п. 5). Благодаря континентальному климату в нижней атмосфере часто формируются температурные инверсии, при которых резко ослабляется вентиляция пограничного слоя и концентрации загрязняющих соединений резко возрастают. Данная особенность проявляется наиболее сильно в зимний период, когда средние фоновые концентрации многих соединений, имеющих антропогенное происхождение, возрастают более, чем в два раза по сравнению с летними.

4) Иркутск - Белогорск (Благовещенск) (горные районы Забайкалья). Железная дорога проходит здесь в основном по горным долинам, уровень загрязненности которых определяется наличием и интенсивностью местных антропогенных и биогенных источников. Кроме того, на распределение примесей здесь оказывает заметное влияние горно-долинная циркуляция.

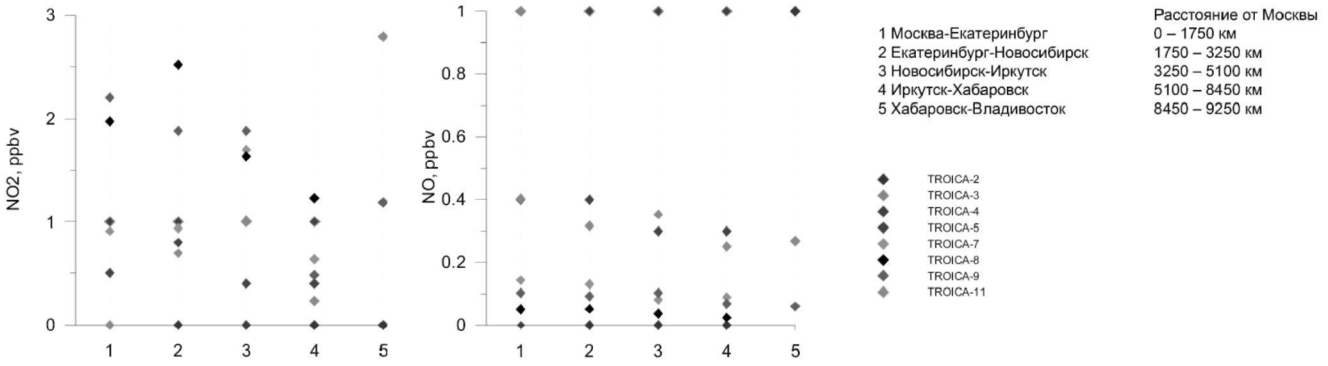

Рис. 4. Средние концентрации NO и NO. по данным экспедиций TROICA для различных участков Транссибирской магистрали

5) Белогорск - Владивосток (юго-восток Дальневосточного региона). Район с относительно большой плотностью населения и развитой промышленностью. Влияние регионального переноса проявляется наиболее отчетливо в связи с муссонной циркуляцией. В летние месяцы район в значительной мере подвержен выносам сильно загрязненного воздуха из сопредельных индустриальных районов Северного Китая, Кореи и Японии.

Средние концентрации окислов азота для перечисленных выше районов, в т.ч. для фоновых и городских условий с учетом сезонной изменчивости, приведены на рис. 4 и 5. Как видно из рисунков, значения NO_2 в зимний период оказываются заметно выше, чем в летний. В сезонном распределении выделяется весенний максимум, что можно объяснить общим накоплением загрязнений в нижней атмосфере в зимний период в силу особенностей циркуляции и ослабления массообмена между пограничным слоем и свободной тропосферой. Увеличение притока солнечной радиации ранней весной ведет к активизации фотохимических процессов и резкому возрастанию концентраций продуктов разложения первичных соединений, в т.ч. и окислов азота. В холодный период максимальные концентрации NO и NO_2 наблюдаются в крупных городах Сибири - Новосибирске, Красноярске, Иркутске. Высокие NO_x наблюдаются и в воздухе, пришедшем из Кузнецкого индустриального района. Железная дорога не пересекает этот район, но шлейф загрязнений от него почти всегда заметен. Сильно загрязнен район от Москвы до Урала, где сосредоточено много промышленных предприятий и имеется густая сеть автомобильных дорог. Кроме того, эта территория находится под влиянием переноса загрязнений из Западной и Центральной Европы, что отчетливо проявляется в зональном градиенте CO (являющейся по сравнению с NO_2 более консервативной и потому более информативной для оценки дальнего переноса примесью), а также в зональном градиенте некоторых летучих органических соединений. В Забайкалье влияние антропогенных источников NO_2 минимально, а вблизи Хабаровска оно опять стано-

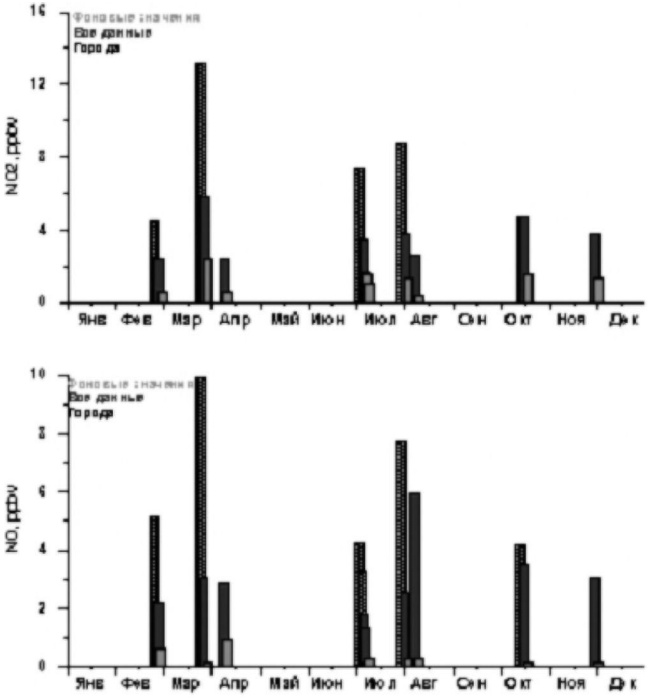

Рис. 5. Средние концентрации NO и NO_2 в зависимости от сезона в городах и фоновых условиях

Таблица 1. Экстремально высокие (более 50 ppbv) значения NO вблизи железнодорожных станций и промышленных предприятий

Станция	км	Дата	Локальное время	max [NO], ppbv
Шахунья	757	17/02/98	12:01	99,7
Тайшет	4540	04/03/98	07:27	84,3
Тайшет	4539	11/04/97	06:32	70,4
Иркутск	5212	03/03/98	19:36	69,2
Бада	5906	10/04/98	06:39	69
Шлейф от пожара	7325	31/07/96	22:40	66,3
Иркутск	5212	05/07/99	20:20	58,9
Заозерная(промзона)	4287	10/08/96	02:26	57,8
Хабаровск	8541	03/07/99	07:57	56,4
Шаля	1690	19/02/98	09:45	54,2
Хабаровск	8549	07/04/97	19:58	52,9

вится значительным. Средняя концентрация в городских условиях во все сезоны заметно превосходит средние значения для всей экспедиции, превышая в несколько раз фоновые значения.

Существенную неоднородность в крупномасштабное распределение NO_x вносят урбанизированные районы, поскольку именно они дают наибольший вклад в антропогенные эмиссии загрязнений. В зонах влияния этих районов, в соответствии с основными закономерностями фотохимической системы нижней тропосферы, на фоне повышенных концентраций NO_x почти всегда наблюдается уменьшение концентрации приземного озона (см. рис. 6). Наиболее значительное понижение концентрации озона наблюдается в городах на юге Средней и Восточной Сибири и на Дальнем Востоке в условиях сильно загрязненного воздуха. В среднем на европейской территории в городах снижение озона относительно фонового уровня составляет около 30 %, в Западной Сибири от 15 до 25 %, в то время как в Красноярске, Иркутске и Чите превышает 60 %, что соответствует условиям сильно загрязненного воздуха. Данная особенность связана с тем, что города Юга Сибири, как правило, являются крупными промышленными центрами, расположенными в горных долинах и котловинах, что создает условия для застоя воздуха. Кроме того, для континентального климата Сибири характерна высокая повторяемость приземных инверсий, особенно в холодное полугодие, что также препятствует вентиляции пограничного слоя и способствует накоплению загрязнений. Наблюдаемые высокие концентрации N0 по сравнению с $N0_2$ свидетельствуют также о том, что измерения проводились в непосредственной близости от источников загрязнения атмосферы, наиболее важным из которых для городских условий является автотранспорт. Заметный вклад дают выбросы теплоэлектростанций и отопительных систем (в зимний период).

Наблюдаемое в ряде случаев значительное превышение $N0_2$ над N0 (см. рис. 3) свидетельствует о высокой окислительной способности воздуха (Исидоров, 1985). Летом при высоком уровне солнечной радиации и наличии водяного пара в воздухе образуется гидроксил, который инициирует окисление летучих органических соединений (ЛОС) и генерацию озона. Анализ проб воздуха, отобранных в периоды проведения экспедиций, позволил выделить районы с высоким содержанием ЛОС и O_3. Одним из самых загрязненных участков на

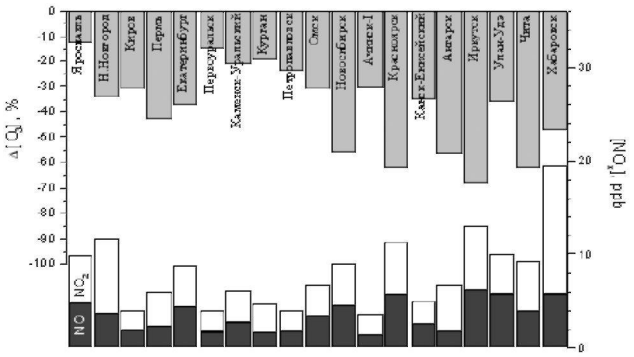

Рис. 6. Внизу: концентрации окислов азота (NO_x=NO+NO_2, ppbv) в городах с населением более 100 тыс. чел. Вверху: уменьшение концентрации озона (%) по сравнению с условиями окружающей сельской местности (средние по всем проездам значения). Изменение содержания озона δO_3 определялось как отклонение от его среднего уровня вне границ города и городского шлейфа.

Транссибирской железнодорожной магистрали является г. Хабаровск и Хабаровский край. Из-за неэлектрифицированного участка дороги Хабаровск - Уссурийск на станции Хабаровск сосредоточено большое количество постоянно дымящих магистральных тепловозов; содержание некоторых углеводородов здесь в 30-50 раз превышает значения, полученные в других регионах. Шлейф загрязнений от Хабаровска тянется на 100-200 км. Если на этот шлейф накладываются загрязнения, приносимые летним муссоном из Японии и Кореи, то в городах

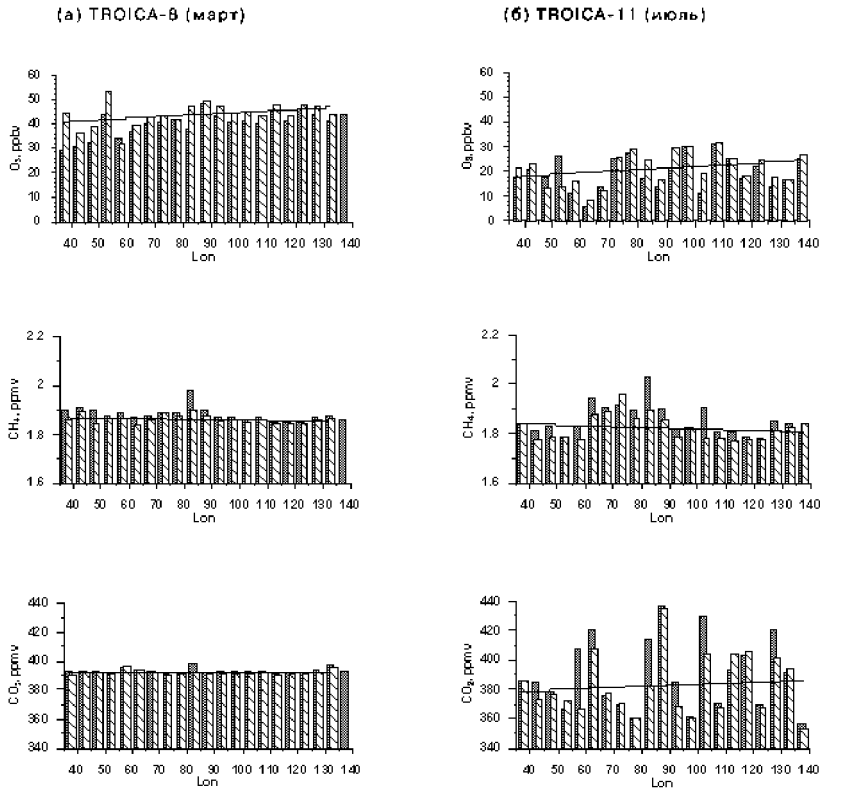

Рис. 7. Пространственные распределения O_3, CH_4 и CO_2 по данным экспедиций TROICA: по всем данным (сплошная закраска) и в фоновых условиях (штриховка)

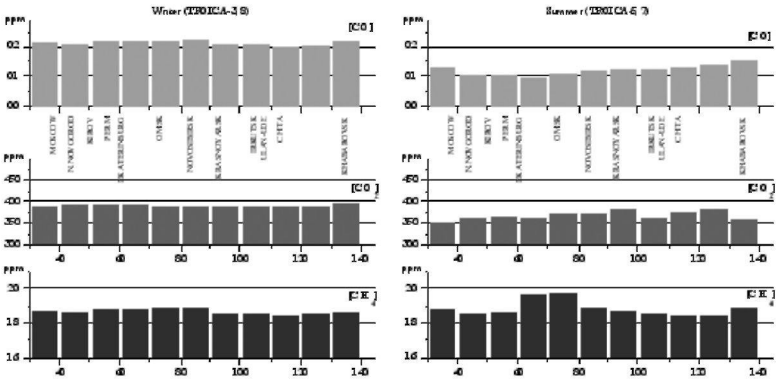

Рис. 8. Пространственные распределения CO, CO_2 и CH_4 в фоновых условиях для летнего и зимнего сезонов по данным экспедиций TROICA

Хабаровского края могут формироваться экстремально высокие концентрации озона. Например, 2 июля 1999 г. (TROICA-5) в Биробиджане концентрация озона достигала 166 ppbv, что существенно превосходит значение разовой ПДК, равной 75 ppbv (Еланский и др., 2005).

Экстремально высокие (более 50 ppbv) значения NO регулярно наблюдались вблизи железнодорожных станций и промышленных предприятий, а также в зонах лесных пожаров. Некоторые данные приведены в табл. 1.

4.3. Особенности пространственного распределения парниковых газов (CO, CO_2, CH_4, O_3) над континентом. Пространственные распределения озона, метана и углекислого газа над континентом для теплого и холодного периодов, а также концентрации в отдельных городах представлены на рис. 7 и 8 соответственно. Как и в случае окислов азота, распределения этих газов характеризуются значительной сезонной изменчивостью, что обусловлено многообразием факторов, определяющих баланс этих соединений в нижней атмосфере (Беликов и др., 2006).

Распределение углекислого газа в холодный период над континентом практически однородно, что связано с прекращением действия биогенных источников/стоков и накоплением CO_2 антропогенного происхождения в приземном слое при температурных инверсиях. В теплый период неоднородность распределения CO_2 связана с сильно отличающимися ландшафтными условиями и особенностями растительного покрова в различных регионах. Поскольку источники CO_2 (как биогенные, так и антропогенные) находятся вблизи от подстилающей поверхности, на приземную концентрацию CO_2 оказывают влияние ночные температурные инверсии, приводящие к накоплению двуокиси углерода в это время суток. Интересный результат был получен по результатам наблюдений изотопа $^{14}CO_2$ от Москвы до Владивостока (Tarasova et al., 2006; Turnbull et.al., 2007). На фоне локальных всплесков $^{14}CO_2$ вблизи от атомных электростанций и местных источников загрязнений наблюдается систематическое уменьшение содержания данного изотопа в приземном воздухе к востоку (в масштабах континента), что можно объяснить постепенной деградацией шлейфа загрязнений, выносимых из густонаселенных районов Европы и европейской территории России при зональной адвекции (Turnbull et al., 2007).

По результатам анализа изотопного состава метана (Tarasova et al., 2006) выявлен ряд важных особенностей распределения его источников. Прежде всего, было показано, что значительное повышение концентрации метана в Западной Сибири над фоновым уровнем связано прежде всего с биогенными эмиссиями. С другой стороны, значительный локальный вклад могут давать утечки природного газа при его добыче, переработке и транспортировке. Как показывают наблюдения, в районах добычи газа вклад термогенного метана в суммарное превышение над фоновым уровнем может достигать 50 %. Повышенные концентрации

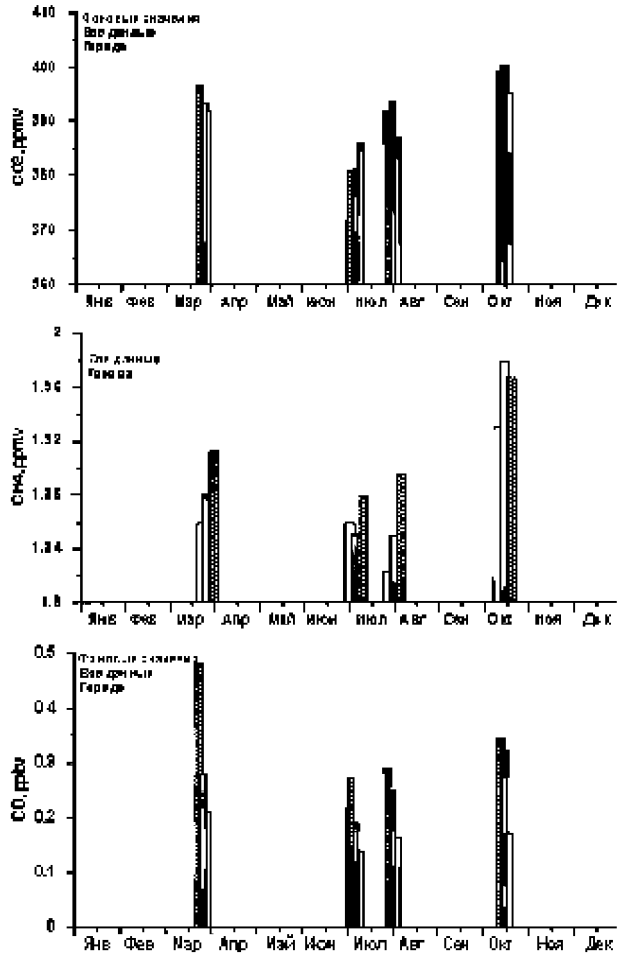

Рис. 9. Средние концентрации CO_2, CH_4 и CO над континентом в зависимости от сезона по данным экспедиций TROICA

Таблица 2. Параметры распределения концентраций парниковых газов над континентом

	CO		CO_2		CH_4	
	зима	лето	зима	лето	зима	лето
Среднее	0,210	0,120	392,0	376,0	1,855	1,886
Стандартное отклонение	0,03	0,03	3	34	0,04	0,09
Медиана	0,202	0,115	389,0	358,0	1,845	1,845
Мода	0,200	0,120	390,0	355,0	1,850	1,840

метана наблюдаются в шлейфах от лесных (низовых) пожаров, большая часть которых приходится на территорию Восточной Сибири и Хабаровского Края. На Дальнем Востоке увеличение концентрации метана наблюдалось и при пересечении шлейфов, содержащих продукты горения биомассы в результате сельскохозяйственных работ в Китае (Bergamaschi et al., 1998; Oberlander et al., 2002; Rockmann et al., 1999; Tarasova et al., 2006).

Как следует из рис. 7, в холодный период года распределение углекислого газа и метана близко к однородному. Небольшое увеличение в CO_2 и CH_4 в Средней Сибири может быть связано с влиянием Кузнецкого промышленного района, где добывают и сжигают в электростанциях большое количество угля. Летом в концентрациях CO и CO_2 отмечается положительный градиент в восточном направлении. Изотопный анализ и оценка потоков углекислого газа от биогенных источников по наблюдениям ^{222}Rn объясняет такое увеличение более высокими в бореальной зоне Восточной Сибири биогенными эмиссиями этих газов, а также влиянием лесных пожаров. Увеличение CH_4 в Западной Сибири в летний период практически полностью связано с биогенными эмиссиями метана из болот и увлажненных почв (Belikov et al., 2006; TROICA, 2006). На фоне общего повышения CH_4 в Западной Сибири заметны локальные всплески его концентрации при пересечении шлейфов от мест добычи природного газа и магистральных газопроводов (TROICA, 2006). Отметим, что в теплый период распределение повторяемостей CH_4 имеет характер, аналогичный распределению CO_2, т.к. также подвержено влиянию приземных инверсий, хотя и в несколько меньшей степени, чем для углекислого газа.

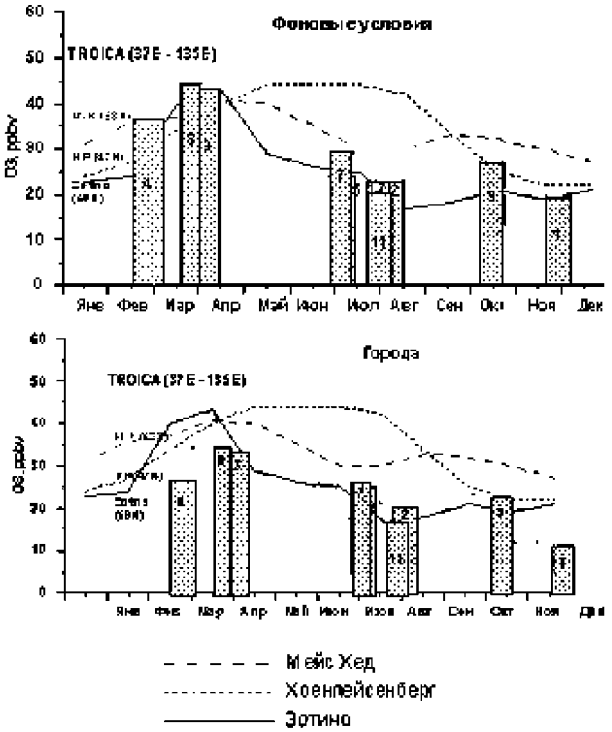

Рис. 10. Сезонный ход средней приземной концентрации озона над континентом по экспедициям TROICA в сравнении с сезонным ходом на станциях мониторинга Hohenpeissenberg (Германия), Mace Head (Ирландия), Зотино (Россия, Красноярский край)

Некоторые параметры распределения концентраций парниковых газов над континентом приведены в табл. 2:

Представляется интересным сравнение полученных данных для Евроазиатского континента с данными измерений на станциях мировой сети. Из этих станций наиболее близкой по условиям проведенных измерений над континентом является станция Mace Head в Ирландии. Сравнение данных показывает, что сезонный ход концентрации CO над континентом в целом имеет те же особенности, что и на приморской фоновой станции, с минимумом в теплый период и максимумом - в холодный. Типичные летние значения CO в континентальных районах оказываются близкими к значениям на побережье Атлантики, а в холодный период - заметно выше, что, как уже отмечалось, может быть связано с особенностями вертикального обмена между пограничным слоем и свободной атмосферой. Аналогичная тенденция наблюдается и в сезонном ходе CO_2: в холодный период концентрация CO_2 над континентом больше, чем на побережье, а в теплый период примерно соответствует ей. По концентрации CH_4 наблюдается обратная картина: значения над континентом наиболее высокие в теплый период, тогда как на побережье в это время они минимальны.

Сезонный ход средних для континента приземных концентраций CO_2, CH_4 и CO представлен на рис. 9. Как видно из рисунка, максимумы CO_2 приходятся на весну и осень. Накопление углекислого газа в это время происходит в результате его выделения в процессе дыхания растительностью, а также под влиянием различных антропогенных источников. Летом, напротив, в процессе фотосинтеза происхо-

дит поглощение углекислого газа, что ведет к уменьшению его концентрации на 10-20 ppmv. Как правило, в фоновых условиях концентрация двуокиси углерода несколько ниже, чем в городских условиях. Небольшие локальные всплески CO_2 наблюдаются также при пересечении шлейфов от лесных пожаров. Сезонный ход метана выражен в целом менее значительно благодаря большому фотохимическому времени жизни в нижней тропосфере (около 10 лет), с минимумом в теплый период и максимумом в холодный, т.е. находится в противофазе с сезонным ходом интенсивности его биогенных источников. Подобно концентрации метана, содержание CO в приземном воздухе тоже максимально в холодное время года в городах, что связано с отоплением жилых помещений. В теплый период основными источниками CO являются промышленность и транспорт, а в удаленных районах - лесные пожары.

Баланс приземного озона определяется совокупностью нескольких факторов: стоком на подстилающую поверхность, проявляющимся наиболее сильно в условиях приземных температурных инверсий; поступлением озона вместе с субстратосферным воздухом при стратосферных вторжениях (в тылу холодного фронта высоких циклонов), а также его генерацией в загрязненном воздухе в шлейфах городов, лесных и степных пожаров. Совокупным действием этих факторов объясняется увеличение концентрации озона при пересечении континента с запада на восток в секторе 40° - 90° в.д. (Elansky et al., 2001; Schakina et al., 2001; Golitsyn et al., 2002). Концентрация озона в холодный период имеет довольно равномерное распределение. В теплое время года существенный вклад вносят фотохимические процессы и сухое осаждение на поверхности под слоем инверсии. На графиках отчетливо просматривается суточный ход, с максимумом в дневные часы и минимумом - в предрассветные, перед началом разрушения инверсии. Суточный ход нарушается в пасмурные дни, когда ночные инверсии не образуются, а днем облака препятствуют поступлению ультрафиолета к земной поверхности. Сезонные вариации озона над континентом, полученные по данным наблюдений TROICA, имеют заметные отличия от большинства других станций, расположенных в той же широтной зоне в Западной и Центральной Европе, США и Канаде. Данная особенность хорошо укладывается в схему действия источников тропосферного и, в том числе, приземного озона. На рис. 10 представлены средние для каждой из экспедиций TROICA концентрации озона в сельской местности и в городах. Усреднение проводилось по всему пути от Москвы до Владивостока и обратно, что составляет в среднем около 3 недель. Несмотря на то, что данные приведены за разные годы, они представляют собой осредненные значения по континентальной среднеширотной зоне, в пределах которой пространственно-временная структура поля приземного озона довольно устойчива и потому при-

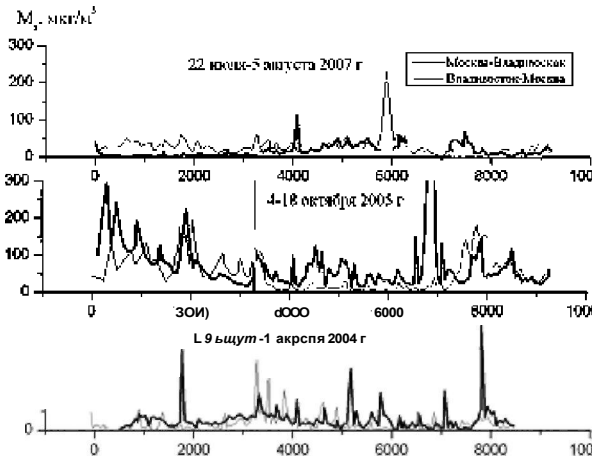

Рис. 11. Вариации массовой концентрации субмикронного аэрозоля M_s (мкг/м^3) вдоль Транссибирской железной дороги для 3 сезонов (весна, лето и осень) с осреднением 1 час

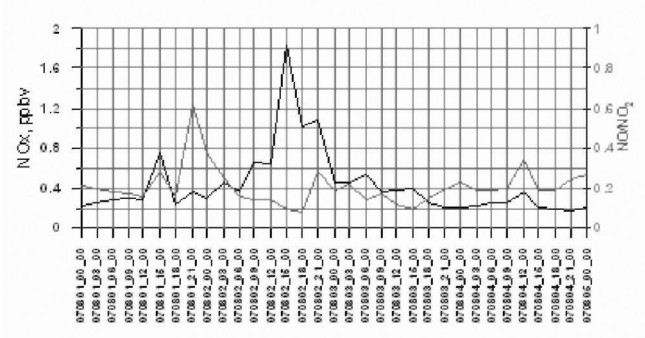

Рис.12. Наблюдения высоких концентраций NO_x и отношения NO/NO_2 на станции Зотино в период 2 августа 2007 09:00 - 3 августа 07 00:00 GMT

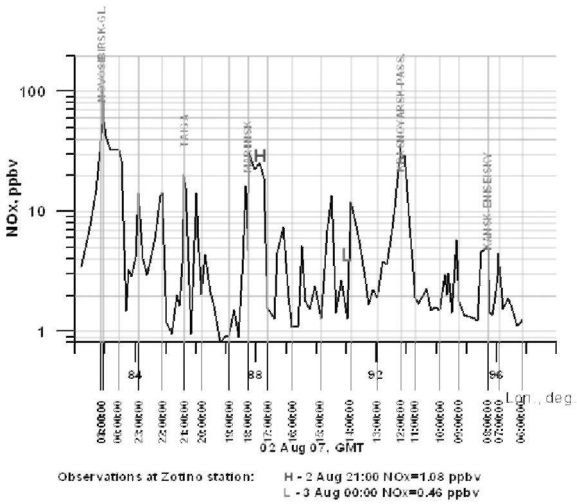

Рис.13. Наблюдения приземных концентраций NO_x вдоль транссибирской ж.-д. магистрали за период 2 августа 07 06:00 - 3 августа 07 00:00 GMT. Символами H и L обозначены моменты наблюдений, для которых соответствующие воздушные частицы спустя двое суток оказывались в районе станции Зотино в пер

GMT) и низких концентраций NO_x (3 августа 2007 г. 00:00 GMT)

соответственно.

веденные оценки имеют высокую значимость. На этом же рисунке представлены сезонные вариации по многолетним данным наблюдений прибрежной станции Mace Head, расположенной на атлантическом побережье, и высокогорной альпийской станции Hohenpeissenberg. Для обеих станций характерны условия чистого либо умеренно загрязненного воздуха. На этом же рисунке для сравнения представлен сезонный ход озона на станции Зотино, расположенной в зоне бореальных лесов в Средней Сибири в 500 км к северу от Красноярска. Хорошее согласование в сезонном ходе по данным Зотино и TROICA позволяет предположить, что фотохимическая система над континентом достаточно однородна относительно факторов, определяющих ее эволюцию, при осреднении по достаточно большим временным и пространственным масштабам. Как следует из рисунка, данные Зотино оказываются близки к средним концентрациям озона, характерным для северной части Евразийского континента в целом.

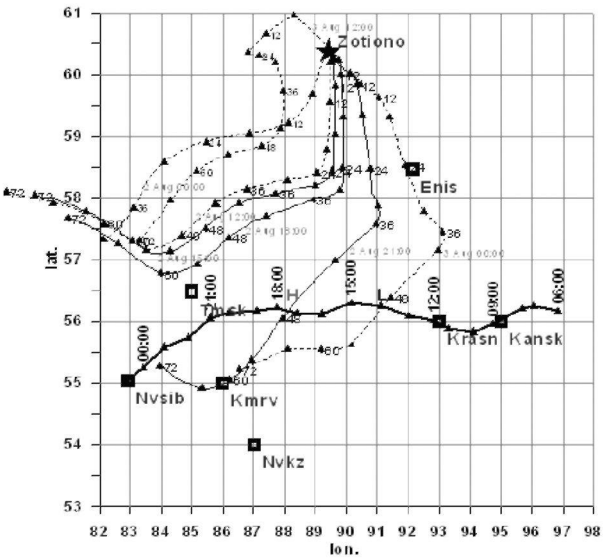

Рис.14. Обратные изобарические траектории воздушных частиц на 950 мбар за период 2 августа 2007 г. 00:00 - 3 августа 2007 г. 12:00 GMT для эпизода наблюдений высоких концентраций NO_2 на станции Зотино. Серым цветом обозначены крупные города в регионе (Енисейск, Томск, Кемерово, Новосибирск, Новокузнецк, Красноярск, Канск)

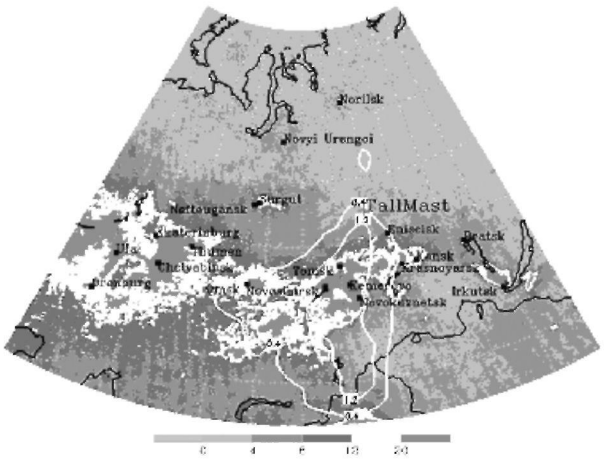

Рис. 15. Относительный вклад отдельных районов в повышенные концентрации окислов азота на фоновой станции Зотино по данным измерений с марта 2007 по февраль 2008 г.

Шкала цветов представляет среднегодовые значения общего содержания NO_2 в тропосфере (размерность 1015 мол./м^2) по данным OMI за тот же период

Наблюдаемые расхождения в сезонном ходе озона на станциях Зотино, Mace Head и Hohenpeissenberg связаны с значительными климатическими различиями между районами расположения этих станций. Наличие весеннего и осеннего максимумов в сезонном ходе озона на Mace Head связано с усилением в эти периоды трансатлантической адвекции воздуха с Североамериканского континента, характеризующегося повышенными концентрациями как самого озона, так и его предшественников (Wang et al., 1998; Li et al., 2002). На станции Hohenpeissenberg максимум озона наблюдается летом, что связано с высокой концентрацией источников загрязнения и интенсивной наработкой озона в условиях высокой температуры и освещенности на примыкающих к горам равнинах. На станции Зотино годовой ход озона характеризуется одним весенним максимумом, обусловленным интенсификацией тропосферно-стратосферного обмена в этот период, хорошо выраженным на всей территорией России. Летом содержание озона заметно понижается, в т.ч. и относительно европейских станций, что, по всей вероятности, связано с более эффективным осаждением на подстилающую поверхность в условиях типичных для континентальных районов России ночных инверсий.

В целом сезонные вариации озона по данным TROICA для фоновых условий и по всем данным оказываются близки друг к другу. Это означает, что фотохимическая система над континентом мало подвержена антропогенному воздействию. Наличие ярко выраженного годового максимума в апреле и низкие значения летом и осенью говорят об активном действии стратосферно-тропосферного переноса, значительно преобладающем над фотохимическим образованием озона. Усиливающийся летом сток озона на растительности под инверсиями в целом снижает общий уровень приземного озона, но в сезонной изменчивости данный фактор проявляется незначительно.

4.4. Наблюдения субмикронного аэрозоля вдоль Транссибирской магистрали. Наблюдения субмикронного аэрозоля в атмосфере вдоль Транссибирской магистрали проводились в 5 экспедициях TROICA (Vartiainen et al., 2007). По результатам наблюдений для всех географических районов установлен хорошо выраженный сезон-

ный ход аэрозоля с максимальными значениями массовой концентрации осенью и зимой (39,0¬ 73,7 мкг/м^3), и минимальные - весной и летом (17,7- 31,1 мкг/м^3). Для зимнего периода были выявлены крупномасштабные (до 1000 км) неоднородности распределения субмикронного аэрозо¬ ля, обусловленные его региональным переносом. Вариации концентрации субмикронного аэрозоля вдоль Транссибирской железной дороги, полученные с помощью нефелометра фирмы GRIMM, для 3 сезонов (весна, лето и осень) с осреднени¬ ем 1 час приведены на рис. 11.

В крупных городах (Свердловске, Новосибирске, Красноярске и Иркутске) часто наблюдались большие, по сравнению с сельской местностью, концентрации субмикронного аэрозоля. Однако «городская добавка» субмикронного аэрозоля в этих городах только во время неблагоприятных метеоусловий была большая и составляла 50¬ 250 мкг/м^3; в весенний и летний сезоны городская атмосфера по уровню содержания субмикрон¬ ного аэрозоля в целом мало отличалась от сельс¬ ких мест. Как в европейской, так и в азиатской ча¬ сти континента в теплое время года часто случа¬ ются лесные пожары, возгорание торфяников, сжигается трава на полях и вдоль Транссибирс¬ кой ж.-д. магистрали, что проявляется в значи¬ тельном локальном повышении концентрации са¬ жевого аэрозоля. Наиболее протяженное задым¬ ление от горения торфяников протяженностью 2000 км от Москвы до Тюмени наблюдалось 4¬ 5 октября 2005 г., вызвав увеличение содержания субмикронного аэрозоля до 50-100 мкг/м^3.

5. Анализ регионального переноса загрязнений в Западной Сибири по данным измерений окислов азота на станции Зотино, наблюдениям TROICA и спутниковым данным. Особенностью измерений в экспедициях TROICA яв¬ ляется то, что маршрут проходит через индустри¬ альные районы юга Сибири и Дальнего Востока (фактически по их северной границе). Это позво¬ ляет количественно оценивать эффекты, связан¬ ные с региональной адвекцией загрязненного воз¬ духа, и оценивать экологическую нагрузку от ре¬ гиональных источников загрязнений на удаленные районы евразийского Севера. В настоящее вре¬ мя подобные оценки можно выполнить лишь для территории юга Западной и Средней Сибири, опираясь на данные TROICA и измерения на фоновой станции Зотино. В дальнейшем подобные оценки планируется провести и для более обширных территорий, опираясь, в том числе, и на данные на¬ блюдательной станции в районе Тикси.

Исследования роли регионального переноса проводились на основе разработанного в Отделе исследований состава атмосферы ИФА РАН про¬ граммного комплекса, основанного на статисти¬ ческом анализе ансамблей обратных трех- и двумерных лагранжевых траекторий воздушных час¬ тиц. Использованный подход основан на расчете условной вероятности прихода загрязненного воз¬ духа из отдельных областей и оценке уровня ста¬ тистической значимости для полученного резуль¬ тата (Ashbaugh et al., 1985; Luis et al., 1995). Данная методика позволяет выявлять климатически значимые региональные источники атмосферных загрязнений и оценивать их вклад в наблюдаемую измен¬ чивость состава воздуха по продолжительным ря¬ дам измерений приземных концентраций.

Поскольку интенсивность природных источников NO_x на единицу площади много меньше в срав¬ нении с антропогенными, высокие концентрации NO_x можно с достаточной надежностью использо¬ вать в качестве индикатора воздушной массы, за несколько часов или дней до этого находившейся под воздействием значительных антропогенных источников загрязнений. Регулярные наблюдения эпизодов повышенных (относительно некоторого фонового уровня) концентраций NO_x при низкой относительной доли NO позволяют, таким образом, предположить, что станция может находиться в зоне влияния удаленных источников, действие которых прослеживается в региональном масштабе. Как показали исследования (Вивчар и др., 2008), эти источники связаны в основном с крупными го¬ родами и промышленными объектами юга Запад¬ ной Сибири и Красноярского края.

В качестве примера рассмотрим эпизод 2¬ 3 августа 2007 г., когда на станции Зотино наблю¬ дались повышенные дневные концентрации окис¬ лов (см. рис.12). Согласно расчетам обратных тра¬ екторий, пришедший на станцию воздух за двое суток до этого находился под влиянием значитель¬ ных источников эмиссий в районе Красноярска, Канска и ряда других крупных городов юга Крас¬ ноярского края, что совпало по времени с проез¬ дом вагона-обсерватории TROICA на участке Транссибирской железнодорожной магистрали Канск - Новосибирск. Данные наблюдений при¬ земных концентраций NO_x вдоль Транссибирской магистрали за период 2 августа 2007г. 06:00 - 3 августа 2007 г. 00:00 GMT приведены на рис. 13. Для рассматриваемого эпизода на рис. 14 приве¬ дены обратные траектории воздушных частиц на уровне 950 мбар за период 2 августа 2007 г. 00:00 - 3 августа 2007г. 12:00 GMT для эпизодов высоких (сплошные линии) и низких (пунктирные линии) концентраций NO_x на станции Зотино. Даты обо¬ значают время прихода воздушных частиц на стан¬ цию. Транссибирская магистраль обозначена сплошной жирной линией. Символы H и L соответствуют приведенным на рис. 14 и обозначают ме¬ ста наблюдений высоких и низких концентраций NO_x соответственно. Как следует из данного примера, в процессе адвекции содержание NO_x в при¬ земном воздухе на пути от района Кемерово до

Зотино уменьшается более чем на порядок (с 30 ppbv в районе Мариинска до 1,8 ppbv по измерениям в Зотино на 2.08.2007 15:00 GMT). Тем не менее данная величина намного превосходит фоновое содержание NO_x (по нашим оценкам, около 0,7 ppbv), что однозначно указывает на пребывание станции в зоне шлейфа загрязнений. Как известно, время жизни окислов азота в атмосфере достаточно мало - порядка нескольких часов. Следовательно, можно предположить, что влияние долгоживущих загрязнений в подветренной зоне от крупных источников будет значительно более сильным и прослеживаться на значительно больших расстояниях, чем это имеет место в случае NO_x.

Используя ансамбли обратных траекторий за продолжительные периоды, были установлены районы наиболее вероятного расположения источников окислов азота, оказывающих влияние на район расположения станции. Расчеты 72-часовых обратных трехмерных траекторий, заканчивающихся на высотах 950-990 мбар в точке расположения станции позволили установить область влияния атмосферного переноса (в климатологическом смысле) для района станции за 72-часовой период. Данная область охватывает обширный район от Урала на западе до средней части Восточно-Сибирского плоскогорья на востоке и от плато Путорана на севере до северного Казахстана на юге. При увеличении высоты от 950 до 850 мбар область влияния имеет тенденцию к зональной асимметрии: направление прихода воздуха смещается к западу, в соответствии с преобладающим в данном широтном поясе западным переносом. Таким образом, пункт наблюдений может периодически оказываться под воздействием значительных источников антропогенных загрязнений, расположенных, главным образом, на юге Западной Сибири и Красноярского края (см. рис.15). Данное обстоятельство может оказаться существенным при анализе результатов измерений с точки зрения их пригодности для исследования процессов дальнего переноса за сроки, значительно превышающие сутки.

6. Заключение. В данной статье были систематически изложены основные результаты наблюдений состава атмосферы, полученные в экспедициях TROICA и на фоновой станции мониторинга Зотино. Многолетний опыт проведения подобных экспедиций, обработки и анализа результатов измерений показывает, что результаты наблюдений состава приземного воздуха с помощью вагона-обсерватории оказываются репрезентативными не только вдоль маршрута движения вагона, но и в региональном масштабе, при условии, что в непосредственной близости от маршрута движения отсутствуют сильные локальные источники выбросов, обладающие экранирующим действием. Данный вывод подтверждается сопоставлением данных наблюдений вагона-обсерватории с измерениями на фоновой станции Зотино в Средней Сибири, а также исследованиями особенностей регионального переноса и химической трансформации воздуха для отдельных эпизодов наблюдений для широкого диапазона газовых и аэрозольных примесей. Очевидно, что понимание основных закономерностей динамики фотохимической системы в нижней тропосфере над континентом необходимо для сколько-нибудь надежных оценок воздействия источников атмосферных загрязнений на различные экосистемы Евразии, включая и удаленные районы Севера и Арктики. Полученные в ходе экспедиций TROICA результаты будут использованы для развития системы наблюдений состава атмосферы в нашей стране и уточнения современных представлений о ключевых физических механизмах, определяющих баланс малых газовых примесей и климатические тренды в Северной Евразии.

Благодарности. Эксперименты TROICA проводились при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, Российской академии наук, Международного научно-технического центра, Международной программы Полярного года POLARCAT, Института химии Макса Планка (Германия).

Авторы выражают благодарность всему составу проекта TROICA, принявшему участие в подготовке приборнго комплекса вагона и непосредственно в экспедиционной работе. Инициаторами экспериментов TROICA были ГС.Голицын, П.Крутзен (P.J.Crutzen). Неоценимую роль в их подготовке и проведении сыграл К.Бреннинкмайер. Создание новой передвижной лаборатории велось совместно с Всероссийским институтом железнодорожного транспорта. Директор этого института И.С.Беседин и научные сотрудники В.М.Богданов и В.С.Мозгрин с большим энтузиазмом выполнили технически очень сложную работу при подготовке вагона-обсерватории. Большую помощь в приборном оснащении и проведении первых экспедиций оказал Дж.Элкинс (J.Elkins). Некоторые приборы безвозмездно передали компании «Horiba», «Kipp Zonen» и «Attex».