

На правах рукописи



Васильева Анастасия Васильевна

**ВЛИЯНИЕ ПРИРОДНЫХ ПОЖАРОВ НА
КРУПНОМАСШТАБНУЮ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ПОЛЯ
ПРИЗЕМНОГО СО В СЕВЕРНОЙ ЕВРАЗИИ**

25.00.29 – Физика атмосферы и гидросферы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2012

Работа выполнена в Учреждении Российской академии наук Институте физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН.

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук,
Моисеенко Константин Борисович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
Алоян Арташ Еремович
кандидат физико-математических наук,
Чернокульский Александр Владимирович

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение
«Гидрометеорологический научно-исследовательский
центр Российской Федерации»

Защита состоится 16 февраля 2012 года на заседании диссертационного совета Д 002.096.01 в Учреждении Российской академии наук Институте физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН по адресу: 119017, г. Москва, Пыжевский пер., д. 3.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН.

Автореферат разослан «__» января 2012 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 002.096.01
кандидат географических наук

Л.Д. Краснокутская



Актуальность работы.

Эмиссии продуктов горения в результате природных пожаров являются одним из важнейших факторов, определяющих баланс малых газовых компонент и аэрозолей в атмосфере. Исследования влияния пожаров на состав атмосферы традиционно были связаны с пожарами в тропических лесах и саванне, являющимися основным источником атмосферных эмиссий от горения биомассы на планете. Начиная с 90-х годов, однако, значительное внимание стали привлекать пожары в бореальной зоне Северного полушария, что было связано с развитием спутниковой системы наблюдений пожаров и возможностью проведения более надежных количественных оценок пройденных огнем площадей и сопутствующих эмиссий продуктов горения. В настоящее время общепризнано, что лесные пожары в бореальной зоне играют важную роль в глобальном балансе углерода и являются одним из климатообразующих факторов, оказывая влияние на сезонные и долгосрочные изменения химического состава и радиационных свойств атмосферы как в региональном масштабе, так и во внетропических широтах Северного полушария в целом. Существенный вклад при этом дают пожары в бореальных лесах северной Евразии, подавляющая часть которых (около 620 млн. га, или 22% от общей площади лесов на планете) приходится на территорию России. Согласно имеющимся оценкам, выбросы неорганического углерода (в основном, в форме CO и CO₂), а также сажевого и органического аэрозолей от пожаров в бореальных лесах северной Евразии в годы с высокой пожарной активностью могут достигать 10–20% от соответствующих глобальных эмиссий. Согласно данным спутниковых наблюдений, эмиссии продуктов горения в годы высокой пожарной активности на Европейской территории России, в Сибири и на Дальнем Востоке проявляются в заметном сезонном увеличении концентраций таких соединений, как монооксид и диоксид углерода, формальдегид, окислы азота, во всём Северном полушарии. Трансформация первоначальных выбросов в шлейфах пожаров может приводить к образованию высоких концентраций токсичных соединений, включая озон, летучие органические соединения (бензен, ацетонитрил, альдегиды) и мелкодисперсный аэрозоль, оказывающих негативное влияние на здоровье человека.

Поступление в атмосферу продуктов горения биомассы необходимо учитывать в исследованиях сезонной и долгосрочной изменчивости состава атмосферы и её радиационных параметров, климатических трендов, при проведении оценок экологических нагрузок, прогнозировании качества воздуха и экстремальных экологических ситуаций, связанных с загрязнением атмосферы продуктами горения. Проведение подобных исследований в рамках наиболее общей постановки проблемы требует привлечения транспортно-химических моделей атмосферы, для которых

задание реалистичных полей эмиссий является одним из необходимых условий получения физически обоснованных результатов расчётов. Отличительной особенностью атмосферных эмиссий продуктов горения является их значительная пространственная и временная изменчивость в связи с разнообразием и вероятностным характером факторов, вызывающих возгорание, разнообразием ландшафтов и экосистем, а также сезонными и короткопериодными изменениями свойств подстилающей поверхности, в т.ч. обусловленными метеорологическими факторами. В то же время, существующие на сегодняшний день количественные оценки атмосферных эмиссий от пожаров на территории России известны с большой долей неопределенности, а данные по отдельным регионам с высокой пожарной активностью крайне разрознены и практически не поддаются обобщению в масштабах континента.

Таким образом, актуальность работы связана с необходимостью понимания основных закономерностей сезонной и междугодовой изменчивости полей эмиссий продуктов горения, как в отдельных регионах, так и в масштабах континента в целом. К числу недостаточно изученных проблем относится также влияние выбросов от пожаров на приземное поле монооксида углерода – одного из основных продуктов горения биомассы. Вследствие значительного времени жизни в атмосфере, данное соединение является удобным трассером при исследованиях регионального и дальнего переноса продуктов горения и их влияния на окислительные свойства атмосферы и качество воздуха.

Целью работы является проведение количественных оценок влияния эмиссий от природных пожаров на содержание монооксида углерода в приземном слое атмосферы в северной Евразии.

Основные задачи исследования:

- проведение систематических оценок эмиссий монооксида углерода (CO) от природных пожаров в северной Евразии с 2000 по 2009 гг. на основе новейших спутниковых данных мониторинга подстилающей поверхности;
- выделение основных черт междугодовой и сезонной изменчивости полей этих эмиссий на территории России за прошедшее десятилетие;
- проведение количественных оценок вклада эмиссий от пожаров в наблюдаемую сезонную и краткосрочную изменчивость приземных концентраций CO в зоне бореальных лесов центральной Сибири;
- проведение количественных оценок влияния эмиссий от пожаров на крупномасштабную изменчивость приземного CO в северной Евразии.

Методы исследования.

Оценки площадей пожаров выполнены на основе ежемесячных карт поврежденной пожаром растительности *MODIS MCD45 Burned Area Level3 Product* с разрешением 500 м за 2000-2009 гг. Для оценки эмиссий СО от горения биомассы использовалась модель Сейлера-Крутцена (1980г.), связывающая массу выброса продуктов горения с площадью пройденной пожаром территории, плотностью биомассы на этой территории, долей сгоревшей биомассы и массой выбрасываемого в атмосферу вещества при сгорании 1 кг биомассы в зависимости от типа растительности, который определялся с помощью карты *UMD-GLC (University of Maryland's Global Land Cover Product)* с разрешением 30"×30".

Оценки вклада эмиссий от пожаров в наблюдаемую изменчивость приземного СО в центральной Сибири получены с помощью (i) разработанного автором программно-математического комплекса для расчета прямых и обратных лагранжевых траекторий на основе метеорологических полей последовательных окончательных анализов *NCEP*, (ii) разработанного программно-математического комплекса для статистического анализа ансамблей лагранжевых траекторий и (iii) данных наблюдений СО на фоновой станции мониторинга Зотино (Красноярский край, 61° с.ш., 90° в.д.). Количественные оценки влияния эмиссий от пожаров на крупномасштабное распределение приземного СО в северной Евразии выполнены на основе численной термогидродинамической модели атмосферы *RAMS* и численной модели атмосферного переноса квазиконсервативной субстанции *HYRACST*.

Основные результаты и научная новизна работы.

- На основе новейших спутниковых данных, для территории России получены систематические оценки площадей пожаров и сопутствующих атмосферных эмиссий СО за продолжительный период с 2000 по 2009 гг.
- Впервые проведен подробный анализ межгодовой и сезонной изменчивости пожарной активности и эмиссий с учетом природно-климатических особенностей отдельных регионов страны.
- Разработан программный комплекс для расчётов полей атмосферных эмиссий от природных пожаров, с последующим усвоением данных в транспортно-химических моделях атмосферы.
- Разработана кинематическая модель прямых и обратных лагранжевых траекторий и пакет статистического анализа ансамблей траекторий в приложении к задачам регионального и дальнего переноса атмосферных примесей.

- Впервые для России получены количественные оценки вклада атмосферных эмиссий от природных пожаров и региональных антропогенных источников загрязнений в приземное содержание СО в различных регионах России. Проанализирована сезонная изменчивость поля приземного СО над континентом.
- Впервые проведен подробный анализ региональных эффектов эмиссий от пожаров для бореальной зоны средней Сибири. Получены оценки прямого и косвенного эффектов, проявляющихся, соответственно, в увеличении приземного СО в регионе в синоптическом и сезонном масштабах изменчивости.

Научная и практическая значимость работы. Разработан программно-математический комплекс, позволяющий (i) проводить количественные оценки величины атмосферных выбросов продуктов горения биомассы на основе спутниковых данных о пройденных пожарами площадях, (ii) выполнять усвоение данных об эмиссиях в транспортно-химических и климатических моделях атмосферы, (iii) проводить расчеты ансамблей лагранжевых траекторий воздушных частиц и (iv) выполнять статистический анализ ансамблей траекторий при исследованиях атмосферного переноса природных и антропогенных загрязнений. На основе разработанных программных комплексов, проведены количественные оценки влияния природных пожаров на поле приземных концентраций СО над континентом. Созданы программные продукты, позволяющие оценивать вклад эмиссий от пожаров в вариации атмосферных концентраций газовых и аэрозольных субстанций на основе данных мониторинга состава атмосферы.

Результаты работы могут быть использованы:

- для инвентаризации природных и антропогенных источников загрязнений на территории Российской Федерации;
- для уточнения параметрических схем, описывающих эффекты от пожаров в климатических моделях атмосферы;
- при разработке программно-математических комплексов с целью прогнозирования качества воздуха и экологически неблагоприятных условий и чрезвычайных ситуаций при загрязнении атмосферы продуктами горения;
- при разработке современной концепции мониторинга состава атмосферы на территории Российской Федерации;
- разработки учебно-методических пособий по курсам начального образования, разработки спецкурсов для студентов ВУЗов по разделам «Физика и химия атмосферы» и «Экология».

Личный вклад автора. Автор принимал участие во всех этапах работы, в том числе в формулировке задач и интерпретации полученных результатов. Всё программное обеспечение для модели расчёта эмиссий, модели расчёта лагранжевых траекторий и пакета статистической обработки ансамблей траекторий разработано лично автором. 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 как на российских, так и на международных научных конференциях, школах и семинарах.

Основные результаты диссертации опубликованы в 12 работах, из которых 4 вышли в отечественных и зарубежных рецензируемых журналах.

Структура и объём диссертации. Диссертационная работа состоит из трех глав, введения и заключения, содержит 26 рисунков и 16 таблиц, список цитируемой литературы состоит из 162 наименований.

Содержание диссертации.

Во **введении** обосновывается актуальность темы диссертации, дается краткий обзор предыдущих работ, сформулированы цели и задачи и перечислены основные результаты работы.

В **первой главе** приводятся результаты анализа пространственной и временной динамики поля атмосферных эмиссий монооксида углерода (CO) в результате природных пожаров в России с 2000 по 2009 гг. В **разделе 1.1** дается исторический обзор методов детектирования пожаров и их последствий по данным спутниковых наблюдений, от алгоритмов оперативного обнаружения активных пожаров по методу «горячих точек» до картографирования гарей по временным рядам мультиспектральных данных. Приводится обзор методов оценки атмосферных эмиссий продуктов горения на основе спутниковых данных о площадях пожаров.

В **разделе 1.2** дается описание используемого автором метода оценки эмиссий от природных пожаров на основе новейших данных спутникового радиометра MODIS (площади пожаров) и эмиссионной модели Сейлера-Крутцена:

$$E = A \cdot B \cdot C \cdot D, \quad (1)$$

где A – площадь пройденной пожаром территории [м^2], B – плотность биомассы на этой территории [$\text{кг}/\text{м}^2$], C – доля сгоревшей биомассы [%], D – масса выбрасываемого в атмосферу вещества при сгорании 1 кг биомассы [$\text{г}/\text{кг}$], E – общая масса выбрасываемого в атмосферу вещества в результате пожара [г].

Описывается реализация метода автором в виде комплекса вычислительных программ. В разделе 1.3 приводятся полученные на основе данного метода оценки площадей природных пожаров и сопутствующих эмиссий CO в России за период 2000–2009 гг. Показывается, что эмиссии CO от природных пожаров в России составляют 7–43 Мт в год или 20–120% от суммарных техногенных эмиссий по данным EDGAR-2000. Преобладающий вклад (5–35 Мт в год) дают пожары в лесах и редколесьях, на долю которых ежегодно приходится 45–80% суммарных эмиссий от горения биомассы (рис.1).

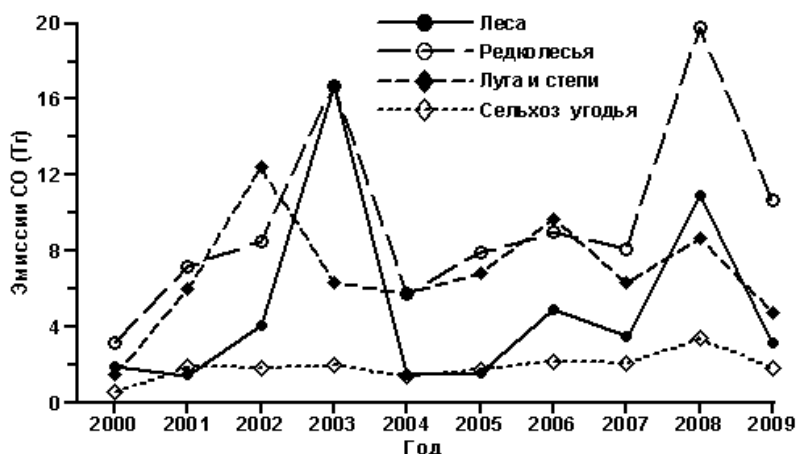


Рис.1. Суммарные ежегодные эмиссии CO в России в 2000-2009 гг. от природных пожаров в разных типах экосистем (по карте растительности UMD-GLC).

Выполняется анализ межгодовой и сезонной динамики пожарной активности в семи различных регионах России, объединяющих территории со схожими физико-географическими и климатическими признаками; приводится анализ факторов (синоптических, ландшафтных, антропогенных), определяющих эту динамику. Приводится карта крупномасштабного распределения пожарной активности на континенте за 2000–2009 гг. и выделяются три макрорегиона со сходной межгодовой и сезонной изменчивостью: ЕТР и юг Западной Сибири, юг Восточной Сибири и Дальнего Востока, север Сибири и Дальнего Востока. Во всех регионах отмечается высокая межгодовая изменчивость пожарной активности. Относительная доля пожаров в лесах и редколесьях в суммарных выгоревших площадях (эмиссиях CO) увеличивается от западных регионов к восточным, составляя от 5–30% (10–60%) на ЕТР и юге Западной Сибири до 40–75% (60–95%) на юге Восточной Сибири и Дальнего Востока. Отмечается (рис.2) преимущественная локализация пожарной активности в умеренных широтах между 45° и 57° с.ш. при сосредоточении лесных пожаров в поясе 50–55° с.ш. вдоль южной границы зоны бореальных лесов, где плотность населения также высока. Последнее особенно важно с точки зрения учёта воздействия пожаров на качество воздуха и возможности формирования экстремальных ситуаций при загрязнении атмосферы продуктами горения.

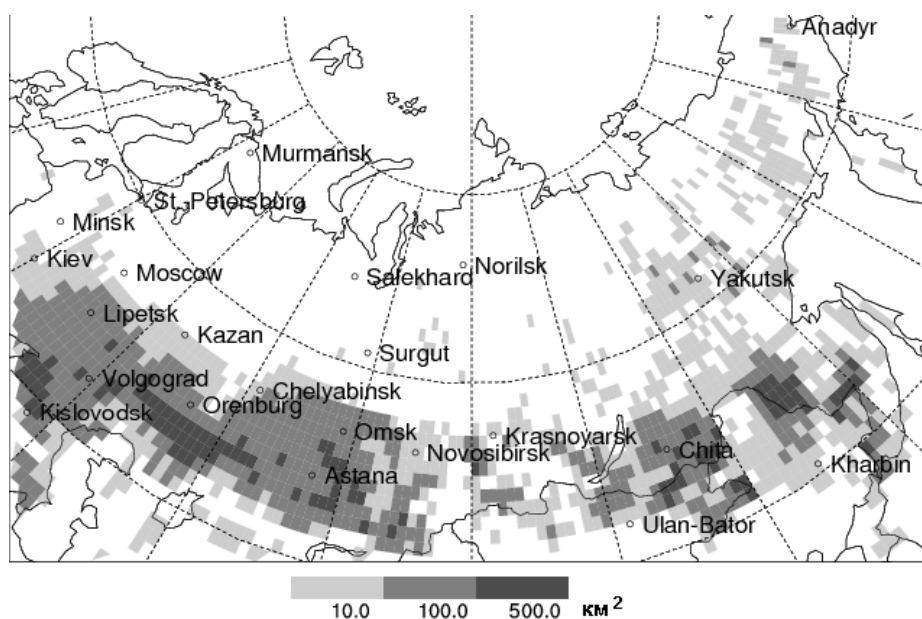


Рис.2. Средние площади ежегодных пожаров (км² в год) за 2000-2009 гг. в ячейках сетки размером 1°x1° для России и сопредельных территорий по данным MODIS MCD45.

Полученные оценки сравниваются с опубликованными ранее результатами и данными по антропогенным эмиссиям. Показывается, что рассчитанные эмиссии CO от пожаров представляют собой нижнюю границу среди аналогичных опубликованных результатов, главным образом вследствие различных предположений о степени выгорания наземной и подземной (почвы, торф) биомассы. Делается вывод о преимуществе использования данных о выгоревших площадях MODIS MCD45, ввиду наиболее полного из доступных на сегодняшний день пространственного и временного покрытия данными MODIS территории России с 2000 г., а также наиболее подробного пространственного (500 м) и временного (16 суток) разрешения при сохранении высокой (в сравнении с данными об активных пожарах) надежности детектирования гарей (меньшая вероятность пропусков или ложного обнаружения). При этом не исключается возможность недооценки в данных MODIS MCD45 площадей лесных пожаров при относительно более высокой производительности алгоритма на открытых (степи, редколесья) территориях. На основе сравнения полученных оценок с данными по антропогенным эмиссиям EDGAR за 2000 г. показывается (табл.1), что во всех регионах России эмиссии от природных пожаров могут составлять значительную часть суммарных эмиссий CO, составляя в годы аномальной пожарной активности до 30% суммарных (пожары + антропогенные) эмиссий CO на ЕТР и 65–95% в Сибири и на Дальнем Востоке.

В разделе 1.4 приводится анализ факторов, влияющих на точность полученных оценок площадей и эмиссий от пожаров. Указывается на необходимость учета низовых и почвенных (торфяных) пожаров в стадии тления, которые дают наиболее интенсивные выбросы CO и которые сложнее всего детектируются по спутниковым

данным. Также отмечается важная роль карты растительности, используемой для оценок площадей пожаров. Основные выводы первой главы формулируются в разделе 1.5.

Табл.1. Ежегодные эмиссии CO от антропогенных источников (EDGAR-2000) и от природных пожаров (минимальные и максимальные значения за 2000-2009 гг.).

Регион	Эмиссии CO (Мт в год)			
	EDGAR антр. ^a	Пожары макс.	Пожары мед.	Пожары мин.
Юг ЕТР	24.3	11.4	8.0	0.9
Юг Запад. Сибири	2.7	8.1	3.8	0.6
Юг Вост. Сибири	0.8	20.7	3.5	0.6
Юг Дальнего Востока	6.7	11.9	3.2	1.2
Север Дальнего Востока	0.1	4.2	1.6	0.1
Север ЕТР	1.0	0.01	<0.01	<0.01
Север Сибири	0.3	0.7	0.1	0.03

^a Суммарные антропогенные эмиссии EDGAR-2000, исключая классы L43 (сжигание сельхоз отходов), L44 и L47 (природные пожары) в базе данных EDGAR.

Во **второй главе** исследуются основные закономерности сезонной и краткосрочной (обусловленной синоптическими процессами) изменчивости состава приземного воздуха в зоне бореальных лесов центральной Сибири по данным наблюдений на фоновой станции мониторинга Зотино в Красноярском крае (61° с.ш., 90° в.д). Специально проведенные при участии автора данной работы исследования показали, что данные измерений в Зотино являются репрезентативными, в масштабах сезона, для региона в целом, ввиду однородности фотохимической системы в континентальных районах северной Евразии. На основе данных наблюдений приземных концентраций CO на станции Зотино в 2007–2008 гг. и расчётов ансамблей обратных лагранжевых траекторий, приводятся оценки вклада эмиссий от региональных антропогенных источников и природных пожаров в распределение приземного CO в районе наблюдений. В **разделе 2.1** дается общее описание района станции мониторинга Зотино и выполняемых на ней с 2007 г. непрерывных измерений CO, NO, NO₂ и O₃. Приводятся результаты предварительного этапа работ, выявившего фоновый характер наблюдений, при эпизодическом выносе воздуха в шлейфах от крупных городов и промышленных центров юга Сибири, проявляющемся в кратковременном (от нескольких часов до 3–5 суток) увеличении приземных концентраций озона, окислов азота и монооксида углерода на станции. Отмечается важность наблюдений CO как индикатора переноса эмиссий от природных пожаров. В **разделе 2.2**, на основе данных наблюдений состава воздуха на других станциях мониторинга, а также в экспедициях TROICA, выделяются основные черты распределения CO в приземном воздухе над континентальными районами северной Евразии. Выделяется одномодальная гармоника сезонного хода приземного CO с максимумом зимой (200–220 ppb) и минимумом летом (100–120 ppb). Ввиду сравнительно большого фотохимического времени жизни (от нескольких недель до полугода), на масштабах сезона поле приземного CO над континентом

характеризуется относительно небольшими пространственными градиентами. При этом, амплитуда сезонного хода (около 100 ppb), определяемого процессами планетарной циркуляции и глобальным распределением эмиссий, существенно превышает характерные амплитуды краткосрочных флуктуаций (5–20 ppb), обусловленных синоптическими процессами. Отмечается вклад (10–20 ppb) антропогенных эмиссий юга Урала и Западной Сибири в абсолютные величины наблюдаемых сезонных максимумов и минимумов приземного CO в этих регионах, а также преобладающий вклад эмиссий от лесных пожаров на юге Сибири и Дальнего Востока в наблюдаемые межгодовые вариации сезонного хода приземного CO в подветренной части континента. В разделе 2.3 приводится описание методов анализа рядов непрерывных наблюдений состава воздуха на основе статистической обработки ансамблей обратных лагранжевых траекторий. Дается описание траекторной модели, реализованной автором в виде комплекса вычислительных программ. Расчеты Лагранжевых траекторий воздушных частиц осуществлялись на основе трехмерной кинематической модели с использованием давления в качестве вертикальной координаты. Положение частицы \vec{r} связано с полем скорости ветра $\vec{V}(\vec{r}, t)$ посредством обыкновенного дифференциального уравнения

$$d\vec{r}(t)/dt = \vec{V}(\vec{r}, t), \quad (2)$$

решение которого для любого момента времени $t_N > t_0$ есть

$$\vec{r}(t_N) = \vec{r}(t_0) + \int_{t_0}^{t_N} \vec{V}(\vec{r}, t) dt. \quad (3)$$

Разделив отрезок (t_0, t_N) на N интервалов с шагом $\tau = (t_N - t_0) / N$, запишем (2) в виде

$$r(t_N) = r(t_0) + \sum_{k=0}^{N-1} \int_{t_k}^{t_{k+1}} V(r, t) dt. \quad (4)$$

Уравнение (4) на каждом интервале (t_k, t_{k+1}) приближённо решается методом Рунге-Кутты второго порядка точности по времени:

$$\vec{r}(t_h) = \vec{r}(t_k) + 0.5 \cdot \tau \cdot \vec{V}(\vec{r}(t_k), t_k), \quad \text{где } t_h = t_k + 0.5 \cdot \tau, \quad (5)$$

$$\vec{r}(t_{k+1}) = \vec{r}(t_k) + \tau \cdot \vec{V}(\vec{r}(t_h), t_h). \quad (6)$$

Уравнения (5),(6) записывались в сферической системе координат $X=m \cdot \lambda \cdot \cos \varphi$, $Y=m \cdot \varphi$, в которой

$$\vec{V}(\vec{r}, t) = \{u, v, w\}(\vec{r}, t), \quad \text{где } u=DX/Dt, v=DY/Dt, w=DP/Dt \quad (7)$$

где φ и λ – широта и долгота [градус], P – гидростатическое давление [гПа], u , v и w – зональная, меридиональная [м/с] и вертикальная [гПа/с] компоненты скорости ветра, D/Dt обозначает субстанциальную производную, $m=\pi \cdot a/180^\circ$, a — радиус Земли. В формулах (5),(6) шаг по времени берется положительным для прямых и отрицательным для обратных траекторий. Для расчетов использовались метеорологические поля анализа NCAR/NCEP на сетке $1^\circ \times 1^\circ$ за стандартные сроки 00:00 и 12:00 GMT. Соответствующие значения u , v и w в (5),(6) для текущего момента определялись с помощью билинейной интерполяции по ближайшим узлам

пространственной ячейки и квадратичной интерполяции по времени. Таким образом, ошибка аппроксимации (4) по формулам (5),(6) есть $O(\Delta T^2, h)$, где $\Delta T=12$ ч — период, с которым берутся поля анализа, h — горизонтальный размер ячейки.

Излагается метод «функции вклада источников», позволяющий устанавливать связь между эпизодами наблюдений повышенных концентраций в пункте наблюдений и географическими районами локализации предполагаемых источников эмиссий, дающих вклад в наблюдаемые концентрации, на основе статистических оценок нормированного «времени пребывания» воздуха в ячейках регулярной широтно-долготной сетки. Описывается разработанная автором классификация (на основе обратных траекторий) наблюдаемых концентраций СО по типам потенциальных источников – антропогенных и природных пожаров – с разделением по времени переноса от источника. Описывается программная реализация данных методов. В разделе 2.4 приводятся оценки вклада природных пожаров на юге Сибири в наблюдаемую краткосрочную (1–10 дней) изменчивость приземных СО в Зотино весной 2007 и 2008 гг. и летом 2007 г. на фоне влияния региональных антропогенных источников. Оценки суммарных эмиссий от природных пожаров в регионах юга Сибири и ЕТР, выполненные автором по описанной в Главе 1 методике, составили (без учета сельскохозяйственных палов) 15 Тг СО в 2007 г. и 27 Тг СО в 2008 г., что соответствовало 85 и 70% от суммарных эмиссий СО от пожаров в России в эти годы. Весной 2008 г. аномально высокая (в масштабах десятилетия) пожарная активность на юге Сибири сопровождалась повышением медианных концентраций СО в апреле–мае 2008 г. приблизительно на 15 ppb (рис.3). Результаты численного моделирования (см. Главу 3) указывают на заметное влияние пожаров на ЕТР на приземное СО в средней Сибири; тем не менее, непосредственно из данных наблюдений в Зотино данный эффект обнаружить не удалось. Вероятными причинами являются отсутствие данных наблюдений в период пика пожарной активности на ЕТР (август–сентябрь), а также значительная удаленность региона от пункта наблюдений, что не позволяет идентифицировать шлейфы от пожаров на ЕТР в рамках используемого подхода. С другой стороны, анализ обратных траекторий показал, что крупные города и промышленные районы юга Урала и Сибири оказывают основное антропогенное воздействие на район станции мониторинга, однако их вклад в наблюдаемую краткосрочную изменчивость приземного СО в целом незначителен (до 10 ppb в теплый сезон и до 20–30 ppb в холодный). С помощью обратных траекторий установлены эпизоды прохождения шлейфов от крупных пожаров, сопровождавшиеся увеличением средних 12-часовых концентраций СО относительно среднемесячного уровня на 50–100 ppb летом 2007 г. и 100–250 ppb весной 2008 г. (рис.3), что на порядок выше аналогичных превышений, связываемых с

прохождением шлейфов от региональных антропогенных источников. Почти все идентифицированные эпизоды переноса от пожаров сопровождались также прохождением воздушной массы над районами антропогенных эмиссий. На фоне среднемесячных концентраций, 12-часовые флуктуации СО, связанные с переносом воздуха от районов пожаров при времени переноса не более 3 суток, систематически (на уровне медианных значений) превосходили на 5–25 ppb аналогичные флуктуации в воздушных массах, приходящих из антропогенных районов. Относительный вклад близлежащих пожаров (время переноса до Зотино до 2 суток) оказался еще выше: от 5–25 ppb весной 2007 и 2008 гг. до 50 ppb летом 2007 г., согласно медианным значениям 12-часовых флуктуаций. Наиболее выраженное влияние пожаров на краткосрочную (до 10 суток) изменчивость СО в Зотино было выявлено в июле и августе 2007 г., в основном при прохождении шлейфов продуктов горения от небольших пожаров в районе станции наблюдений, эффект от которых проявлялся на фоне сезонного минимума СО в летние месяцы. Приведённые выше результаты практически полностью связаны с пожарами в лесах и редколесьях, дающими наибольшие объёмы эмиссий СО. Включение в анализ пожаров на сельскохозяйственных территориях (расположенных в основном на юге ЕТР и Западной Сибири) не повлияло существенным образом на представленные результаты ввиду географической удалённости этих районов от станции наблюдений и относительно невысоких объёмов эмиссий продуктов горения. В рамках используемого подхода не было выявлено сколько-нибудь заметного влияния на наблюдаемые краткосрочные вариации СО пожаров при времени адвекции продуктов горения более 3 суток. Делается вывод, что при более продолжительном времени переноса в нижней тропосфере загрязнённая воздушная масса (эмиссионный шлейф) теряет свою идентичность вследствие перемешивания с окружающим воздухом, состав которого определяются накопленным эффектом от суммарного воздействия множества различных природных и антропогенных источников (как региональных, так и удаленных), расположенных преимущественно вблизи поверхности земли. В то же время, развивающаяся вследствие высоких температур горения пироконвекция может способствовать выносу эмиссий от крупных пожаров до высот свободной тропосферы, где эмиссионный шлейф предположительно может идентифицироваться и при более длительном времени переноса. Основные выводы главы даны в **разделе 2.5.**

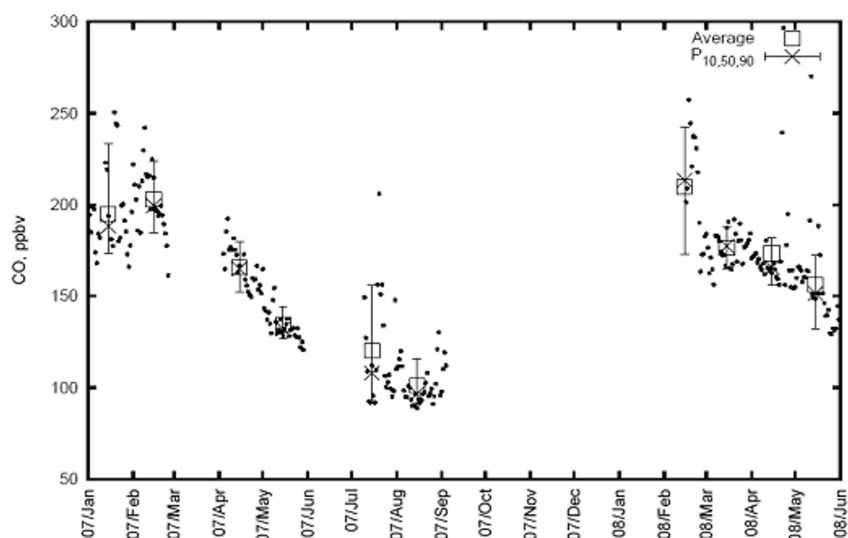


Рис.3. Среднесуточные концентрации CO в Зотино с января 2007 по май 2008 гг. Символами для каждого месяца показаны концентрации: квадрат – средние, крест – медианы, вертикальные линии – 10% и 90% перцентили для данного месяца. Для тёплых периодов 2007 и 2008 гг. концентрации CO на уровне 90% соответствуют эпизодам прохождения в Зотино шлейфов от природных пожаров.

В **третьей главе** исследуется вопрос о влиянии природных пожаров в различных регионах России на поле приземного CO в северной Евразии. Расчёты полей концентраций CO за пожароопасные сезоны (март–октябрь) 2007 и 2008 гг. выполнены с использованием численной термогидродинамической модели атмосферы RAMS (*Regional Atmospheric Modeling System*) и численной модели атмосферного переноса квазиконсервативной субстанции HYRACT (*HYbrid Particle and Concentration Transport*). Входные данные по эмиссиям от природных пожаров для модели HYRACT рассчитывались по методике, описанной в Главе 1. Данные по антропогенным эмиссиям были взяты из базы EDGAR за 2000 г. В **разделе 3.1** дается обзор предыдущих исследований переноса продуктов горения в северной Евразии; указывается на малое количество и недостаточную детальность подобных исследований, в том числе в связи с нехваткой данных систематических наблюдений, необходимых для верификации расчетов. Частично данный пробел может быть восполнен данными непрерывных наблюдений на станции мониторинга Зотино (см. Главу 2) в годы с низкой (2007 г.) и высокой (2008 г.) пожарной активностью, которые позволяют оценить эффект эмиссий от природных пожаров непосредственно в бореальной зоне в континентальных районах Сибири, используя данные наблюдений и результаты численного моделирования. В **разделе 3.2** дается общая математическая постановка задачи и приводится краткое описание численных моделей RAMS и HYRACT. Описание проводимых численных экспериментов (параметров расчётной сетки, начальных и граничных условий, параметризация фотохимического стока CO) дано в **разделе 3.3**.

Химический сток СО параметризуется стандартным образом через задание первой гармоники сезонного хода дневных концентраций гидроксила ОН над континентом по формуле

$$\tau_{ch}(t_d) = \frac{1}{2} (\tau_{ch}^{jan} + \tau_{ch}^{jul}) + \frac{1}{2} (\tau_{ch}^{jan} - \tau_{ch}^{jul}) \cos\left(\frac{2\pi \cdot t_d}{365}\right), \quad (8)$$

где $\tau_{ch}^{jan}=180$ сут, $\tau_{ch}^{jul}=15$ сут — значения τ_{ch} для января и июля, а t_d — порядковый номер дня в году. В этом случае задача о пространственно-временной эволюции поля $\chi(\mathbf{r}, t)$ (отношение смеси для СО) в атмосфере в конечной области Ω с открытыми границами сводится к решению уравнения переноса при надлежащих условиях на поверхности земли, верхней и боковых границах Ω :

$$\partial \chi / \partial t + \mathbf{V} \cdot \nabla \chi - \rho^{-1} \nabla (k \rho \nabla \chi) = \rho^{-1} S - \chi / \tau, \quad (9)$$

$$\chi \Big|_{\partial^+ \Omega} = \chi^+, \quad (10)$$

$$\chi \Big|_{\partial^- \Omega} = \chi_{etr}, \quad (11)$$

$$\chi(\mathbf{r}, 0) = \chi \Big|_{t=t_0}, \quad (12)$$

где $\mathbf{V}(\mathbf{r}, t)$ - упорядоченное (разрешаемое моделью) поле скорости ветра, k - коэффициент турбулентного обмена, определяющий перенос вихрями подсеточных масштабов, $S(\mathbf{r}, t)$ - интенсивность объёмных источников в Ω , $\tau(t)$ - химическое время жизни субстанции, $\partial^+ \Omega$ и $\partial^- \Omega$ - участки границы $\partial \Omega$, на которых упорядоченный перенос осуществляется внутрь области и из неё, соответственно, χ_{etr} - граничное значение, получаемое экстраполяцией из основной расчётной области, $\chi \Big|_{t=t_0}$ - поле концентрации в момент времени t_0 , $\rho(\mathbf{r}, t)$ - плотность воздуха. Используемый подход основан на общей концепции координатных преобразований для системы уравнений Навье-Стокса, согласно которой уравнение переноса (9) для поля концентраций квазиконсервативной субстанции $C(x, y, z, t)$ записывается в полярной стереографической проекции следующим образом:

$$\begin{aligned} \frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial m u C}{m \partial x} + \frac{\partial m v C}{m \partial y} + \frac{\partial w C}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \rho \frac{\partial C/\rho}{m \partial x} \right) + \\ \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \rho \frac{\partial C/\rho}{m \partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \rho \frac{\partial C/\rho}{\partial z} \right) - \frac{C}{\tau_{ch}} \end{aligned} \quad (13)$$

где $\vec{v}_c = (u, v, w)$ - контравариантный вектор скорости $\vec{v}_c \equiv d\vec{x}/dt$, компоненты которого связаны с соответствующими компонентами физической скорости $\vec{v} = (\bar{u}, \bar{v}, \bar{w})$ посредством соотношений

$$u = \bar{u}, \quad (14)$$

$$v = \bar{v}, \quad (15)$$

$$w = \left(\bar{w} + G^{1/2} G^{13} \cdot m \bar{u} + G^{1/2} G^{23} \cdot m \bar{v} \right) / G^{1/2}, \quad (16)$$

где $m(x, y)$ - масштабный коэффициент для данной проекции, $\tau_{ch}(t)$ - химическое время жизни, которое полагалось зависящим от времени, ρ, C - преобразованные плотность и концентрация, связанные с плотностью сухого воздуха $\bar{\rho}(x, y, z, t)$ и физической концентрацией \bar{C} [кг/м³] соотношениями

$$(\rho, C) = \frac{G^{1/2}}{m^2} (\bar{\rho}, \bar{C}), \quad (17)$$

K_x, K_y, K_z - коэффициенты турбулентного обмена,

$$K_x \equiv K_{\bar{x}}, \quad K_y \equiv K_{\bar{y}}, \quad K_z \equiv \frac{K_{\bar{z}}}{(G^{1/2})^2}. \quad (18)$$

Входящие в (16-18) коэффициенты метрического тензора преобразования определяются выражениями

$$G^{1/2} G^{13} = \left(\frac{z}{H} - 1 \right) \frac{\partial h}{\partial x}, \quad G^{1/2} G^{23} = \left(\frac{z}{H} - 1 \right) \frac{\partial h}{\partial y}, \quad (19)$$

где $G^{1/2} = 1 - h/H$ - якобиан преобразования.

В разделе 3.4 на основе расчетов по моделям RAMS/НУРАСТ приводятся оценки вклада регионального переноса эмиссий от природных пожаров и антропогенных источников в наблюдаемые приземные концентрации СО на станции мониторинга Зотино. Эмиссии от пожаров задавались в модели переноса в виде объёмных источников, равномерно распределённых по высоте в слое от поверхности земли до $h^*=1.5$ км, что соответствует медианным значениям наблюдаемых максимальных высот конвективного подъёма продуктов горения от пожаров в бореальных лесах. Оценивается индивидуальный вклад эмиссий от каждого из макрорегионов: Европы, Европейской России, юга Урала и Сибири, юга Дальнего Востока, севера Сибири, севера Дальнего Востока. Такое разделение позволило количественно описать вклад каждого из регионов в наблюдаемую сезонную вариацию СО в связи с сезонными изменениями объемов эмиссий от пожаров и условий атмосферного переноса. Расчёты показывают, что в годы как повышенной (2008 г.), так и умеренной (2007 г.) пожарной активности, вклад в приземные концентрации СО в Зотино от пожаров на юге Сибири (апрель–май) и ЕТР (август–сентябрь) может быть сравним с влиянием региональных антропогенных источников

в соответствующие периоды года и даже превышать его в несколько раз на уровне экстремальных суточных концентраций. Такое влияние пожаров способно сгладить переход от сезонного максимума СО (зимой) к минимуму (летом) в весенние месяцы, что согласуется с наблюдениями в Зотино. Отдельные расчеты на основе антропогенных эмиссий показали, что модель правдоподобно воспроизводит динамику сезонного хода СО, хотя абсолютные значения рассчитанных концентраций могут и отличаться от наблюдаемых ввиду неопределённостей в оценках эмиссий. Сравнение результатов расчётов с данными наблюдений также показало способность модели воспроизводить эффект от весенних пожаров на юге Сибири, проявляющийся в относительном увеличении приземных концентраций примерно на 15 ppb в апреле–мае 2008 г. по сравнению с аналогичным периодом в 2007 г. В рамках использованного подхода, не удалось воспроизвести наблюдаемую внутрисезонную динамику влияния пожаров с максимумом в мае, что может быть объяснено недоучетом в используемой эмиссионной модели поступления СО на стадии тления, когда выброс происходит близко к земной поверхности. На это указывает, в частности, хорошее согласование модельных расчетов и данных наблюдений в среднем за апрель–май при выбранной величине h^* (1.5 км), которая оказывается заметно ниже по сравнению с расчетами других авторов, предполагавших вынос значительной доли эмиссий в свободную тропосферу (до 3–5 км) на стадии горения.

В разделе 3.5, на примере рассчитанных по модели НУРАСТ полей приземного СО за 2007–2008 гг., проведены оценки возможного вклада эмиссий от пожаров в отдельных регионах России (ЕТР, юг Сибири, Дальний Восток) в состав приземного воздуха над континентом. С этой целью была проведена серия расчётов полей СО от источников, расположенных в границах каждого региона. Устанавливалась величина атмосферного отклика на эмиссии на уровне среднемесячных и максимальных (на уровне 90-й перцентиля) за данный месяц суточных концентраций СО за пожароопасный сезон. Для каждого из регионов определялась область влияния расположенных в нём пожаров, в границах которой атмосферный отклик в поле среднемесячных приземных концентраций составлял более 5 ppb. По результатам расчетов, максимальный атмосферный отклик на эмиссии от пожаров в каждом регионе совпадал по времени с пиком пожарной активности, что может не совсем соответствовать реальным данным (как в случае с Зотино весной 2008 г.). В месяцы пика пожарной активности, влияние пожаров в каждом регионе было сопоставлено с аналогичным влиянием региональных антропогенных эмиссий. Согласно расчётам, максимум атмосферного отклика на эмиссии от пожаров на ЕТР приходится на август–сентябрь (до 170 ppb СО за месяц и 300 ppb СО за сутки над районами пожаров в августе 2008 г., см. рис.4), когда область влияния эмиссий

распространяется на большую часть континента (20–130° в.д.). Влияние пожаров в Западной Сибири максимально в апреле–мае (до 125 ppb CO за месяц и 340 ppb CO за сутки в апреле 2008 г.) и также распространяется до восточных окраин континента, в соответствии с преобладающим во внетропической атмосфере зональным типом переноса. Второй по величине максимум приходится на август–сентябрь (до 45 ppb CO за месяц и 90–100 ppb CO за сутки в августе 2008 г. и сентябре 2007 г.), но тогда эмиссии локализованы в основном в пределах региона. Летом в июне–июле даже при сравнительно высоких для этого региона эмиссиях влияние пожаров заметно ниже.

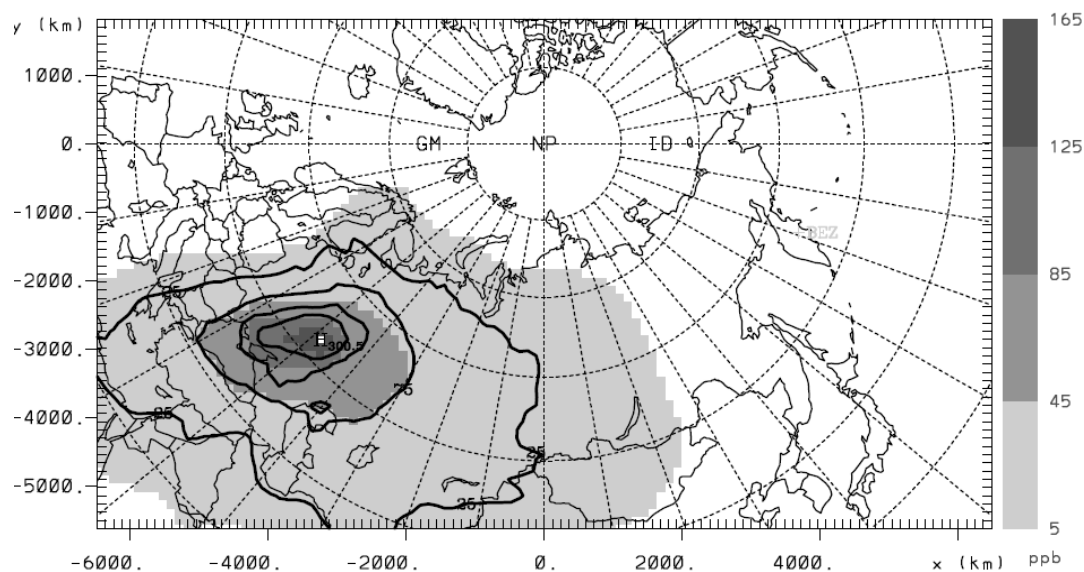


Рис.4. Среднемесячные (зеленая шкала) и экстремальные (90-я перцентиль) суточные концентрации CO на нижнем модельном уровне (39 м над землей) согласно расчетам по модели НУРАСТ с эмиссиями от пожаров в Европейской России в августе 2008 г.

Влияние пожаров на юге Восточной Сибири и Дальнего Востока максимально в апреле–мае (до 225–260 ppb CO в месяц и 560–630 ppb CO за сутки в апреле 2008 г., см. рис.5), когда оно распространяется на всю северо-восточную часть континента; при этом, в отличие от ЕТР, для этих регионов практически полностью отсутствует западная составляющая переноса. Рассчитанные для этих регионов максимальные приземные концентрации CO от пожаров в апреле 2008 г. в 1.5–2 раза превышают аналогичные концентрации для ЕТР и Западной Сибири.

Результаты расчетов также позволяют предположить, что в месяцы с высокой пожарной активностью на ЕТР атмосферный отклик на эмиссии от пожаров оказывается сопоставим по величине, на уровне среднемесячных приземных концентраций CO, с влиянием региональных антропогенных источников и атмосферного переноса из Западной Европы. При этом, на уровне экстремальных суточных концентраций, даже при умеренной пожарной активности вклад пожаров может превышать аналогичный вклад антропогенных источников. Еще более выраженный эффект от пожаров был получен для юга Сибири и Дальнего Востока,

где ввиду значительно меньшей антропогенной нагрузки вклад природных пожаров в апреле–мае, как правило, заметно превышает вклад антропогенных эмиссий в самих регионах и имеет существенно более нелокальную (чем антропогенные эмиссии) область влияния. В разделе 3.6 формулируются основные выводы третьей главы.

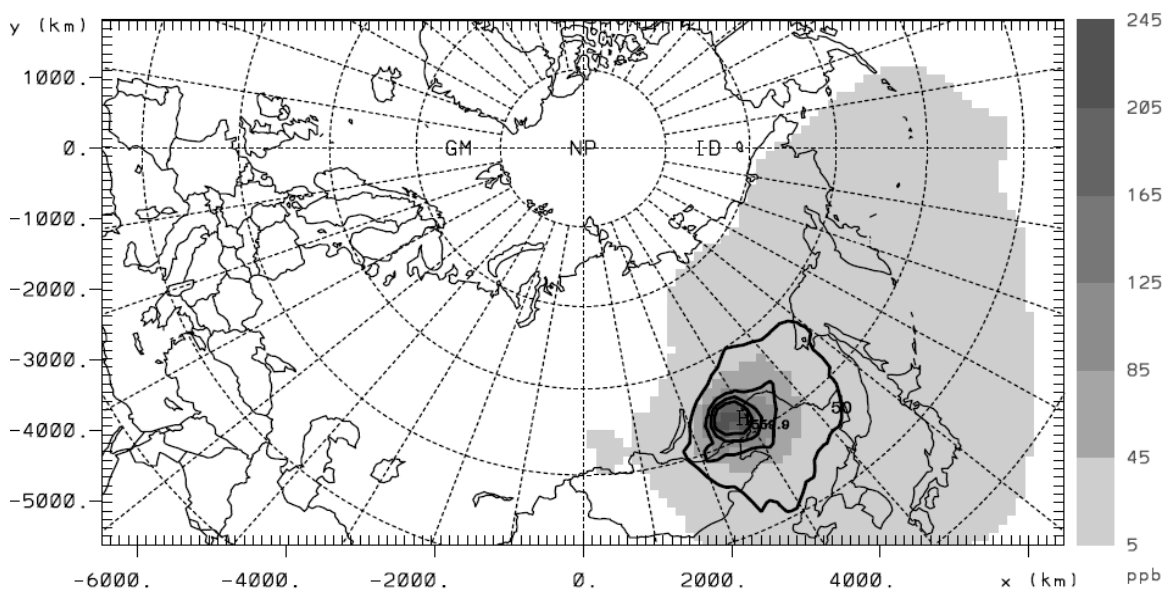


Рис.5. Аналогично рис.4, но для пожаров на юге Восточной Сибири в апреле 2008 г.

В **заключении** приводятся основные результаты диссертационной работы:

- Ежегодные эмиссии CO от природных пожаров в России составляют, в зависимости от пожарной активности, 7–43 Мт или 20–120% от суммарных техногенных эмиссий по данным EDGAR-2000. Преобладающий вклад (5–35 Мт в год или 45–80% суммарных эмиссий от горения биомассы) дают пожары в бореальных лесах и редколесьях. Относительно короткий ряд наблюдений не позволяет выявить долгосрочных изменений, однако в целом за последнее десятилетие наблюдается некоторый рост площадей пожаров, преимущественно на сельскохозяйственных землях.
- Суммарные площади пожаров в лесах и редколесьях России за 2000–2009 гг. составляют 30 Мга, из них 75% – на юге Восточной Сибири и Дальнего Востока и около 50% – в годы (2003 и 2008) с экстремальной пожарной активностью. Площади лесных пожаров локализованы в основном в пределах 50–55° с.ш., приблизительно вдоль южной границы зоны бореальных лесов, где плотность населения также высока и где согласно климатическим прогнозам ожидается рост индекса пожарной опасности.
- Эмиссии от пожаров в центральной Сибири в годы высокой пожарной активности дают определяющий вклад в наблюдаемую краткосрочную (1–10

суток) изменчивость приземного СО в регионе. По результатам наблюдений, превышение СО в эмиссионных шлейфах от лесных пожаров относительно фоновых концентраций летом 2007 и весной 2008 гг. на уровне медиан 12-час. концентраций СО составило 5–25 ppb при времени переноса до 3 дней и около 50 ppb при времени переноса до 2 дней. При этом максимальное превышение СО в шлейфах от пожаров составило около 225 ppb, что на порядок выше аналогичных превышений, связываемых с приходом воздушных масс из районов с высокой антропогенной нагрузкой. В рамках используемого подхода не было выявлено сколько-нибудь заметного влияния на наблюдаемые краткосрочные вариации СО пожаров при времени адвекции продуктов горения более 3 суток. Делается вывод, что при более продолжительном времени переноса в нижней тропосфере загрязнённая воздушная масса (эмиссионный шлейф) теряет свою идентичность вследствие перемешивания с окружающим воздухом, состав которого определяются накопленным эффектом от суммарного воздействия множества различных природных и антропогенных источников (как региональных, так и удаленных), расположенных преимущественно вблизи поверхности земли.

- Влияние аномально высоких эмиссий от лесных пожаров на юге Западной Сибири весной 2008 г. проявилось в сезонном увеличении приземных СО в регионе в среднем на 15 ppb в сравнении с аналогичным периодом в 2007 г. При этом атмосферный отклик приземных СО на увеличение эмиссий составил около 3 ppb в расчёте на 1 Тг (тетраграмм) эмиссий СО.
- Согласно расчетам на основе численных моделей RAMS/НУРАСТ, влияние региональных эмиссий от пожаров (проявляющееся в увеличении приземных СО более чем на 5 ppb) в периоды аномальной пожарной активности имеет существенно нелокальный характер и может распространяться в подветренном направлении до границ континента. При этом максимальные средние за месяц (сутки) концентрации СО над районами наиболее интенсивных пожаров могут достигать 125–170 (300–340) ppb на юге ЕТР и Западной Сибири и 225–260 (600–630) ppb в Забайкалье и на юге Дальнего Востока. Вклад эмиссий от пожаров в приземные СО в ЕТР может быть сравним с вкладом местных антропогенных эмиссий и переноса из Европы на уровне среднемесячных и превосходить его в экстремальных суточных концентрациях; на юге Сибири и Дальнем Востоке вклад эмиссий от пожаров в периоды максимума их активности, как правило, существенно превышает антропогенный вклад.

Список публикаций автора по теме диссертации.

1. Vasileva A.V., Moiseenko K.B., Mayer J.-C., Jurgens N., Panov A., Heimann M., Andreae M.O. Assessment of the regional atmospheric impact of wildfire emissions based on CO observations at the ZOTTO tall tower station in central Siberia // J.Geophys. Res. 2011. 116. D07301. doi:10.1029/2010JD014571.
2. Vivchar A. Wildfires in Russia in 2000-2008: estimates of burnt areas using the satellite MODIS MCD45 data // Remote Sensing Letters. 2011. Vol. 2(1). P. 81–90. doi:10.1080/01431161.2010.499138.
3. 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.
4. Вивчар А.В., Моисеенко К.Б., Шумский Р.А., Скороход А.И. Идентификация антропогенных источников эмиссий окислов азота по расчётам Лагранжевых траекторий и данным наблюдений на высотной мачте в Сибири весной – летом 2007 г. // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2009. Т.45. № 3. С. 325-336.
5. Вивчар А.В., Моисеенко К.Б. Оценки атмосферных эмиссий монооксида углерода от природных пожаров в северной Евразии и их влияния на химический состав воздуха в центре Сибири // Международная конференция по измерениям, моделированию и информационным системам для изучения окружающей среды: ENVIRONMENTIS-2010. Тезисы докладов. Томск. 2010 г.
6. Вивчар А.В., Моисеенко К.Б. Оценки региональных эффектов атмосферных эмиссий от природных пожаров с помощью данных наблюдений на фоновой станции Зотино в центре Сибири // XIV Всероссийская школа-конференция молодых ученых: «Состав атмосферы. Атмосферное электричество. Климатические процессы». Тезисы докладов. Нижний Новгород. 2010 г.
7. Vivchar A.V., Moiseenko K.B., Shumsky R.A., Skorokhod A.I. Localization of source regions of odd nitrogen through receptor climatology of trajectories for the region of Western Siberia and Tall Mast measurements at Zotino station // International symposium on atmospheric chemistry and physics. Abstracts. Xingcheng, Liaoning, P.R. China. 2009.
8. Vivchar A.V., Moiseenko K.B. Estimates of CO emissions from wildland fires in Northern Eurasia with satellite MODIS data for applications in regional transport studies and climate modeling // International symposium on atmospheric chemistry and physics. Abstracts. Xingcheng, Liaoning, P.R. China. 2009.

9. Vivchar A., Moiseenko K., Skorokhod A., Shumsky R. Identification for anthropogenic sources of atmospheric emissions for nitrogen oxides with Lagrangian trajectories and data collected at background cite in Siberia in 2007-2008 // International conference of Computational Information Technologies for Environmental Sciences «CITES-2009». Abstracts. P. 65. Krasnoyarsk, Russia. 2009.
10. Вивчар А.В., Моисеенко К.Б. Оценки эмиссий от пожаров на территории России в 2003-2008 гг. с использованием спутниковых данных высокого разрешения MODIS // XIII международная школа-конференция молодых ученых: «Состав атмосферы. Атмосферное электричество. Климатические процессы.» Тезисы докладов. С. 24. Звенигород. 2009 г.
11. Вивчар А.В., Моисеенко К.Б., Шумский Р.А. Определение особенностей регионального переноса загрязнений из промышленных регионов в центр Сибири на основе данных наблюдений NO_x на станции Зотино // XII международная школа-конференция молодых ученых: «Состав атмосферы. Атмосферное электричество. Климатические процессы.» Тезисы докладов. С. 39. Борок. 2008 г.
12. Вивчар А.В., Моисеенко К.Б., Шумский Р.А., Скороход А.И. Определение особенностей регионального переноса антропогенных загрязнений в Сибири на основе данных автоматизированных наблюдений NO_x на станции Зотино // Всероссийская конференция «Развитие системы мониторинга состава атмосферы (РСМСА)». Тезисы докладов. С.69. Москва. Россия. 2007.