

На правах рукописи

Штабкин Юрий Александрович

**РЕГИОНАЛЬНЫЕ ИСТОЧНИКИ ТРОПОСФЕРНОГО
ОЗОНА В СЕВЕРНОЙ ЕВРАЗИИ**

25.00.29 – Физика атмосферы и гидросферы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени

кандидата физико-математических наук

Москва – 2021

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

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук
Моисеенко Константин Борисович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, профессор, ведущий научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное научное учреждение Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук
Коновалов Игорь Борисович

доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией, Институт энергетических проблем химической физики им. В.Л. Тальрозе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра химической физики им. Н.Н. Семёнова Российской академии наук
Ларин Игорь Константинович

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева Сибирского отделения Российской академии наук

Защита состоится 30 марта 2021 года в 12:00 на заседании диссертационного совета Д 002.096.01 в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте физики атмосферы им. А.М. Обухова Российской академии наук по адресу: 119017, г. Москва, Пыжевский пер., д. 3.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИФА им. А.М. Обухова РАН и на официальном сайте Института:
<http://ifaran.ru/science/dissertations.html>

Автореферат разослан «__» _____ 2021 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 002.096.01
кандидат физико-математических наук



А.В. Чернокульский

Актуальность работы

Воздействие атмосферных выбросов фотохимически активных соединений на состав воздуха в высокоиндустриальных регионах имеет существенно нелокальный характер и во многих случаях прослеживается на региональном и трансконтинентальном масштабах. Характерными примерами такого влияния являются крупномасштабные шлейфы загрязненного воздуха от районов Юго-Восточной Азии, Северной Америки и Европы, устанавливаемые по данным спутникового мониторинга монооксида углерода (CO), самолетных наблюдений долгоживущих соединений (CO, реактивного азота, ряда органических соединений) и результатам численного моделирования с использованием транспортно-химических моделей (ТХМ). Согласно общепринятой терминологии, источники антропогенных эмиссий в перечисленных выше регионах принято относить к климатически значимым, ввиду их заметного воздействия на тропосферную фотохимическую систему (далее – ФХС), наряду с природными источниками соединений – предшественников озона.

Для ФХС нижней тропосферы в Северной Евразии значительный интерес, с точки зрения фотохимии озона, представляют индустриальные регионы Западной Европы, Европейской территории России (ЕТР) и юга Сибири, оказывающие непосредственное влияние на уровень загрязненности воздуха над континентом, при значительном вкладе мощного регионального источника загрязнения – природных пожаров. В этой связи, значительный теоретический и практический интерес представляют исследования чувствительности поля приземного озона над континентом, в т.ч. районах традиционно относящимся к экологически чистым, к климатически значимым источникам эмиссий соединений – предшественников озона.

На субсезонном и сезонном масштабах региональный баланс озона в нижней тропосфере над континентом, в т.ч. в приземном слое, определяется совокупностью нескольких факторов: общим нисходящим потоком озона из

стратосферы, крупномасштабной адвекцией, а также эффективностью его фотохимического производства в процессах окисления CO, метана, биогенных и антропогенных ЛОС при наличии заметных концентраций нечетного азота ($\text{NO}_x = \text{NO} + \text{NO}_2$). Основной вклад при этом дает окисление биогенных ЛОС, CO и ряда промежуточных продуктов окисления антропогенных углеводородов ввиду больших объемов эмиссий и высокой реакционной способности (по отношению к ОН) данных соединений.

Количественные оценки вклада региональных и удаленных источников атмосферного загрязнения в региональный баланс приземного озона и монооксида углерода могут быть выполнены с привлечением ТХМ при задании реалистичных полей эмиссий, что позволяет сформулировать данную задачу в рамках её наиболее общей постановки, с учетом разнообразия источников эмиссий и общих нелинейных свойств атмосферной ФХС. Несмотря на очевидную актуальность подобных исследований, надежные количественные оценки роли регионального и дальнего переноса в балансе приземного озона и монооксида углерода в регионах России, характеризующихся повышенной антропогенной нагрузкой, в настоящее время отсутствуют.

Целью работы является количественная оценка вклада региональных климатически значимых антропогенных и биогенных источников эмиссий соединений – предшественников озона: NO_x , CO, летучих органических соединений, в общее содержание и фотохимическую генерацию озона в нижней тропосфере в Северной Евразии с использованием экспериментальных данных и результатов численного моделирования с глобальной ТХМ GEOS-Chem.

Основные задачи исследования:

- Проведение количественных оценок влияния антропогенных выбросов CO, NO_x и эмиссий биогенных ЛОС на поле озона в нижней тропосфере над континентом.
- Оценка эффективности фотохимического производства озона (ЭПО) в расчете на единицу эмиссии NO_x. Установление пространственного распределения данной величины над континентом.
- Проведение количественных оценок вклада региональных климатически значимых источников атмосферного загрязнения в Северной Евразии в наблюдаемую сезонную и краткосрочную изменчивость содержания CO в нижней тропосфере.
- Сравнение расчетных концентраций O₃ и CO с данными наблюдений на высотной мачте ZOTTO в 2007–2012 гг.
- Количественные оценки основных составляющих регионального баланса озона в нижней тропосфере в макрорегионе Северная Евразия: фотохимического производства, стока на подстилающую поверхность, горизонтального и вертикального переноса, с использованием ТХМ GEOS-Chem.

Методы исследования

Количественные оценки ЭПО и чувствительности полей O₃ и CO к региональным эмиссиям выполнены при помощи глобальной ТХМ GEOS-Chem с использованием баз данных по антропогенным (EDGAR) и биогенным (MEGAN, GFED) эмиссиям CO, NO_x и биогенных ЛОС за 2007–2012 гг. Валидация GEOS-chem для модельного региона Сибирь выполнена на основе многолетних данных наблюдений CO, NO_x и озона на фоновой станции мониторинга ZOTTO (Красноярский край, 60.8° с.ш., 89.4° в.д.).

При проведении модельных оценок влияния дальнего переноса на приземное содержание CO и NO_x в районе высотной мачты ZOTTO с целью

упрощения анализа был использован региональный подход: в каждом из 8 выбранных регионов величины эмиссий CO и NO_x варьировались в заданных интервалах, после чего результаты расчетов полей концентраций по заданному эмиссионному сценарию сравнивались с аналогичными результатами для стандартной модели эмиссий (EDGAR 4.2). Расчеты чувствительности поля озона к эмиссиям прекурсорных соединений выполнены для трех модельных регионов: Западная Европа, Европейская территория России (ЕТР) и Сибирь, величины суммарных антропогенных и биогенных эмиссий в этих регионах уменьшались последовательно на 50 и 100 % от исходной величины.

Расчеты эффективности производства озона выполнены на основе корреляций между концентрациями O₃ и NO_z, где NO_z (\equiv NO_y-NO_x) представляет сумму резервуарных соединений азота (HNO₃, HNO₄, N₂O₅ и др.).

Научная новизна работы

- Впервые проведено исследование влияния климатически значимых региональных источников эмиссий NO_x, CO и биогенных летучих органических соединений (ЛОС) на содержание озона в нижней тропосфере для всей территории Северной Евразии.
- Впервые получены количественные оценки величины эффективности производства озона (ЭПО) и пространственного распределения данной величины над континентом.
- Впервые проведена количественная оценка вкладов климатически значимых природных и антропогенных источников эмиссий в Северной Евразии в наблюдаемую сезонную изменчивость CO и O₃ в центральной Сибири по данным измерений на высотной мачте ZOTTO.
- Впервые для рассматриваемых регионов Северной Евразии получены количественные оценки вклада процессов фотохимического

производства, стока на подстилающую поверхность, зонального, меридионального и вертикального переноса в региональный баланс тропосферного озона на сезонном масштабе.

- Для Центральной Сибири выполнена валидация транспортно-химической модели (ТХМ) GEOS-Chem на основе данных наблюдений приземных концентраций CO, NO_x и озона на станции ZOTTO.

Научная и практическая значимость работы

Разработанные в рамках диссертационной работы методы и подходы, реализованные в виде программно-математического комплекса, позволили провести анализ уникальных долговременных рядов наблюдений приземного содержания CO, NO_x и озона на фоновой станции атмосферного мониторинга ZOTTO, выполнить валидацию ТХМ GEOS-Chem на основе этих данных для континентальных районов Сибири, и получить количественные оценки вклада региональных климатически значимых источников атмосферного загрязнения в Северной Евразии в наблюдаемую сезонную и краткосрочную изменчивость приземных концентраций CO и O₃ в районе наблюдательной станции.

В рамках исследования общих свойств тропосферной фотохимической системы (ФХС) Северной Евразии получена количественная оценка чувствительности ФХС к региональным антропогенным эмиссиям NO_x и биогенным ЛОС, рассчитаны значения ЭПО на единицу эмиссий NO_x для всей территории Северной Евразии. Проведены количественные оценки компонент баланса тропосферного озона в Европе, в Сибири и на ЕТР.

Основные положения, выносимые на защиту:

- Исследовано влияния климатически значимых региональных источников эмиссий NO_x, CO и биогенных летучих органических соединений (ЛОС) на содержание озона в нижней тропосфере для всей территории

Северной Евразии. Рассчитанный сезонный вклад региональных источников в приземное содержание O_3 (атмосферный отклик) составляет 20–30 % от фоновой концентрации озона в средних широтах над континентом (~ 35 ppbv).

- Получены количественные оценки величины эффективности производства озона (ЭПО) и пространственного распределения данной величины над континентом. Рассчитанные по модели средние величины ЭПО за летние месяцы (~ 10 – 30 мол. O_3 /мол. NO_x) характеризуются устойчивой воспроизводимостью по отдельным годам и находятся в хорошем соответствии с выводами фотохимической теории тропосферного озона для условий слабо загрязненного воздуха.
- Показано, что величина фотохимической наработки озона в летние месяцы хорошо коррелирует с фотохимическим возрастом воздушной массы, устанавливаемым по отношению NO_x к суммарному реактивному азоту NO_y .
- Проведена количественная оценка вкладов климатически значимых природных и антропогенных источников эмиссий в Северной Евразии в наблюдаемую сезонную изменчивость CO и O_3 в центральной Сибири по данным измерений на высотной мачте ZOTTO. Показано, что формирование устойчивого континентального шлейфа загрязнений от источников в Западной Европе, на Европейской территории России и в Сибири играет важную роль в региональном балансе указанных соединений и позволяет объяснить 55–80 % амплитуды наблюдаемого на станции годового хода CO и 15–17 % годового хода O_3 .
- Получены количественные оценки вклада процессов фотохимического производства, стока на подстилающую поверхность, зонального, меридионального и вертикального переноса в региональный баланс тропосферного озона на сезонном масштабе для рассматриваемых регионов Северной Евразии. В теплый период основным источником

озона в нижней тропосфере являются фотохимические процессы окисления его прекурсорных соединений, а суммарный перенос и осаждение являются стоком O_3 . В холодный период главным источником озона является вертикальный перенос из свободной тропосферы, в то время как процессы горизонтального переноса дают отрицательный вклад в суммарный баланс O_3 . Смена режимов генерации озона в умеренных и высоких широтах Северной Евразии происходит в апреле и октябре.

- Выполнена валидация транспортно-химической модели (ТХМ) GEOS-Chem на основе данных наблюдений приземных концентраций CO , NO_x и озона на станции ZOTTO. Результаты модельных расчетов в целом хорошо согласуются с данными многолетних измерений, что свидетельствует о корректности выполненных оценок атмосферного отклика (АО) и ЭПО для выбранных регионов.

Достоверность результатов работы подтверждается:

- Согласованностью количественных оценок фотохимического производства озона (атмосферного отклика на поля эмиссий прекурсоров озона) полученных по независимым расчетным методикам.
- Качественным согласием результатов работы с основными выводами теории фотохимического образования озона.
- Согласованностью модельных количественных оценок эффективности производства озона с независимыми расчетами на основе данных прямых измерений озона в ZOTTO.
- Многочисленными результатами валидации модели GEOS-Chem, включая регион исследований.

Результаты работы могут быть использованы при решении ряда актуальных практических задач:

- Разработки национальной стратегии по защите окружающей среды и предотвращении чрезвычайных ситуаций, связанных с загрязнением воздушной среды в результате природных катаклизмов и климатических изменений.
- Инвентаризации природных и антропогенных источников загрязнений на территории Российской Федерации;
- Подготовки рекомендации в нормативно-правовой сфере, направленных на смягчение последствия климатических изменений и роста антропогенной нагрузки на природно-климатические системы в России в 21-м веке.
- При разработке 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 активное участие во всех этапах работы, включая постановку задач, проведение численных экспериментов и анализ полученных результатов. Всё программное обеспечение для подготовки начальных условий для химико-транспортной модели, обработки данных численного моделирования и анализа данных наблюдений разработано лично автором. Основные результаты работы представлены в научных публикациях и материалах конференций, подготовленных при непосредственном участии автора.

Апробация работы.

Результаты работы докладывались автором на российских и на международных научных конференциях, школах и семинарах. Основные результаты диссертации опубликованы в 22 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 114 страниц, 22 рисунка и 7 таблиц, список цитируемой литературы состоит из 114 наименований.

Содержание диссертации

Во **введении** обосновывается актуальность темы диссертации, представлен краткий обзор предшествующих работ, сформулированы основные цели и задачи, а также перечислены главные результаты работы.

В **первой главе** приводится подробное описание актуальных исследований приземного озона над континентальными районами Северной Евразии, а также дается информация об используемой для численных расчетов модели. В **разделе 1.1** представлен полный работ, посвященный анализу влияния антропогенного загрязнения и дальнего переноса на состав приземного воздуха в отдельных регионах России. Особое внимание уделено данным многолетних стационарных наблюдений приземного озона и его предшественников. Приведен обзор немногочисленных количественных оценок влияния атмосферного загрязнения на фотохимическую систему нижней тропосферы в рассматриваемом макрорегионе. В **разделе 1.2** представлено подробное описание используемой автором глобальной ТХМ GEOS-Chem, приведены общие сведения о модели, ее характеристиках и расчетных сетках, обосновано использование достаточно грубого горизонтального разрешения $4^{\circ} \times 5^{\circ}$ в проведенных расчетах. Дано подробное описание применяемых для расчетов метеорологических полей MERRA и баз данных, используемых для задания антропогенных (EDGAR 4.2) и природных (MEGAN 2.1 – биогенные ЛОС и GFED 4 – природные пожары) эмиссий в модели. Подробная информация о высотной мачте ZOTTO (60.8° с.ш., 89.0° в.д), используемом на ней приборном комплексе и наблюдениях приземного содержания CO , NO_x и O_3 , а также результатах валидации ТХМ

GEOS-Chem приведены в **разделе 1.3**. Основные выводы первой главы сформулированы в **разделе 1.4**.

Во **второй главе** исследуется влияние климатически значимых природных и антропогенных источников эмиссий в Северной Евразии на наблюдаемую сезонную изменчивость приземного содержания монооксида углерода и озона в Северной Евразии. При этом CO рассматривалось не только как прекурсор озона, но и как трассерное соединение, позволяющее идентифицировать крупномасштабные шлейфы загрязненного воздуха от антропогенных источников эмиссий и природных пожаров. В **разделе 2.1** детально описаны используемые для численных расчетов сценарии биогенных и антропогенных эмиссий.

Количественные оценки вклада природных и антропогенных эмиссий в поле концентрации CO в нижней тропосфере были выполнены на основе регионального подхода. Для каждого из 8 регионов (Рис. 1) все эмиссии были разделены на 3 категории: антропогенные, биогенные и природные пожары, для каждой из которых атмосферный отклик (АО) в поле CO рассчитывался по формуле (1). Величина среднего атмосферного отклика (AO_{CO}) в поле монооксида углерода в данной точке пространства \mathbf{r} определялась, как разность между концентрацией $[CO]^*$, полученной из базового модельного расчёта, и концентрацией $[CO]_R$, рассчитанной при уменьшенной величине эмиссий. Сравнительный анализ величин AO_R проводился для района расположения станции ZOTTO и Северной Евразии в целом.

$$AO_{CO}(\mathbf{r}) = ([CO]^* - [CO]_R)(\mathbf{r}) \quad (1)$$

Сопоставление величин эмиссий CO по данным GFED3 (используется в расчетах) и [Vasileva et al., 2011] наглядно иллюстрирует диапазон неопределенностей итоговых оценок AO_{CO} (Таблица 1) Учитывая, однако, что суммарные массы эмиссий CO по всем регионам в обоих случаях оказываются близкими (22.9 и 20.2 Тг С), полученные оценки АО на эмиссии от пожаров можно считать достаточно надежными.

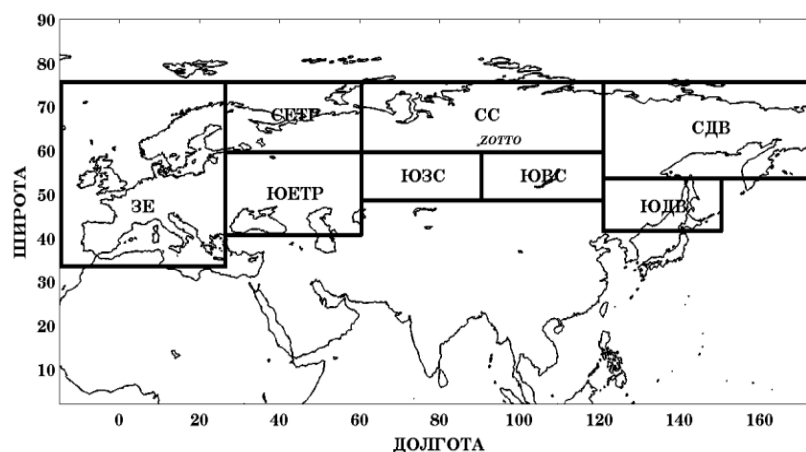


Рис. 1. Географические районы, выбранные при проведении оценок влияния эмиссий CO: СЕТР – север ЕТР (60–75 N, 37–60 E), ЮЕТР – юг и средняя полоса ЕТР (41–60 N, 37–60 E), СС – север Сибири (60–75 N, 60–120 E), ЮЗС – юг Западной Сибири (49–60 N, 60–90 E), ЮВС – юг Восточной Сибири (49–60 N, 90–120 E), СДВ – север Дальнего Востока (54–75 N, 120–180 E), ЮДВ – юг Дальнего Востока (42–54 N, 120–150 E), ЗЕ — Западная Европа (35—75 N, -15—37 E).

Таблица 1. Сводная таблица эмиссий CO [Тг С] по отдельным регионам (см. Рис.1). В скобках приведены диапазоны вариаций за 2007 – 2011 гг.

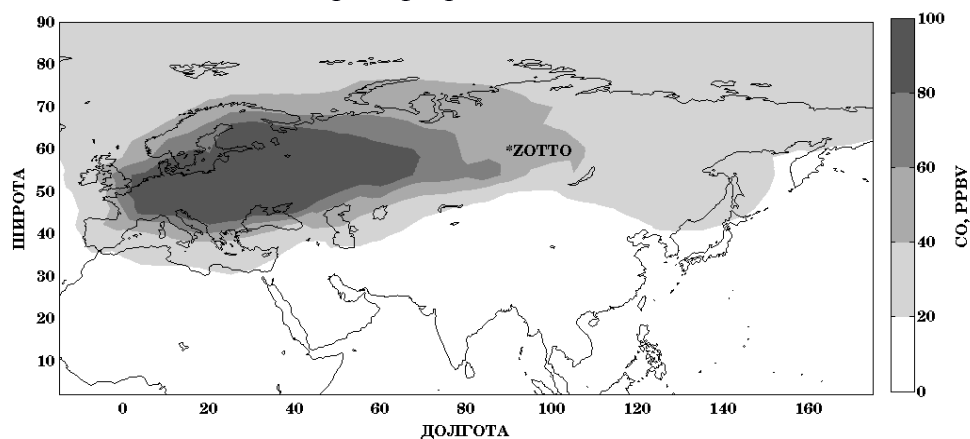
Регион	EDGAR3.2	Горение биомассы	
		GFED3	[Vasileva et al., 2011]
СЕТР	0.8	0.1 (<0.01 .. 0.3)	<0.01
ЮЕТР	19.2	2.9 (1.9 .. 3.5)	8.0 (0.9 .. 11.4)
СС	0.3	0.5 (0.2 .. 0.7)	0.1 (0.03 .. 0.7)
ЮЗС	1.6	1.2 (0.6 .. 1.6)	3.8 (0.6 .. 8.1)
ЮВС	0.6	4.1 (0.7 .. 9.8)	3.5 (0.6 .. 20.7)
СДВ	0.08	9.5 (1.2 .. 13.7)	1.6 (0.1 .. 4.2)
ЮДВ	3.3	4.0 (0.4 .. 14.4)	3.2 (1.2 .. 11.9)
ЗЕ	38.1	0.6 (0.4 .. 1.3)	-

В разделе 2.2 представлены оценки вклада дальнего переноса от крупномасштабных источников атмосферного загрязнения в наблюдаемую сезонную изменчивость приземного содержания CO в Северной Евразии по результатам численных экспериментов. Значительное (1 – 6 месяцев, в зависимости от сезона) время жизни монооксида углерода в атмосфере делает CO удобным трассером загрязнённой воздушной массы и позволяет привлекать результаты наблюдений данного соединения для исследований

влияния удаленных эмиссий на химический состав воздуха в региональном масштабе.

Поля приземного АО на антропогенные эмиссии CO в отдельных регионах представлены на Рис. 2.

Декабрь – февраль, 2007 – 2012 гг.



Июнь – август, 2007 – 2012 гг.

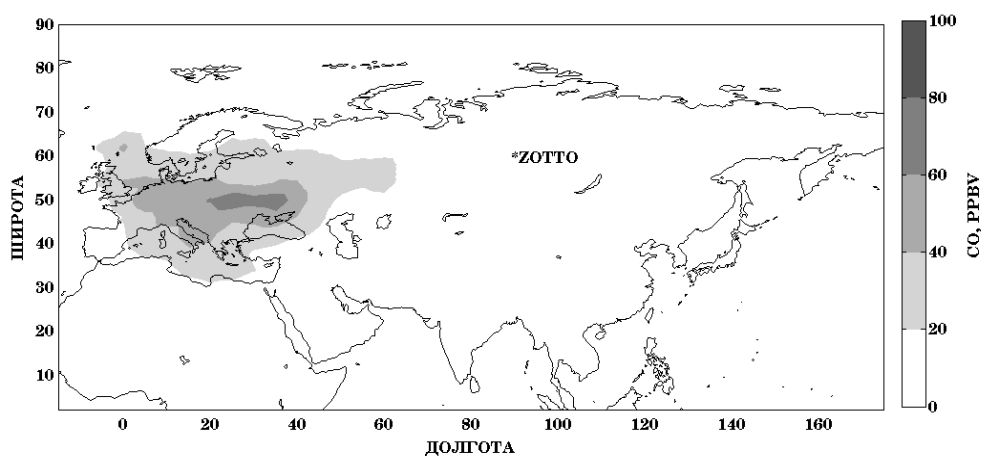


Рис.2. Средние за 2007–2012 гг. поля АО_{CO} на суммарные антропогенные эмиссии CO в Западной Европе (ЗЕ), на ЕТР и юге Западной Сибири (ЮЗС).

В разделе 2.3 с использованием методом анализа обратных траекторий, основываясь на данных наблюдений CO в ZOTTO, была рассчитана двумерная функция вклада источника (ФВИ), позволяющая выполнить пространственную локализацию основных региональных источников CO, «различимых» по данным наблюдений. Полученные результаты свидетельствуют о значимой роли промышленных регионов Юга Сибири, что независимо подтверждается результатами прямого численного

моделирования. Значения ФВИ для зимы и лета 2007-2012 представлены на Рис. 3а и 3б.

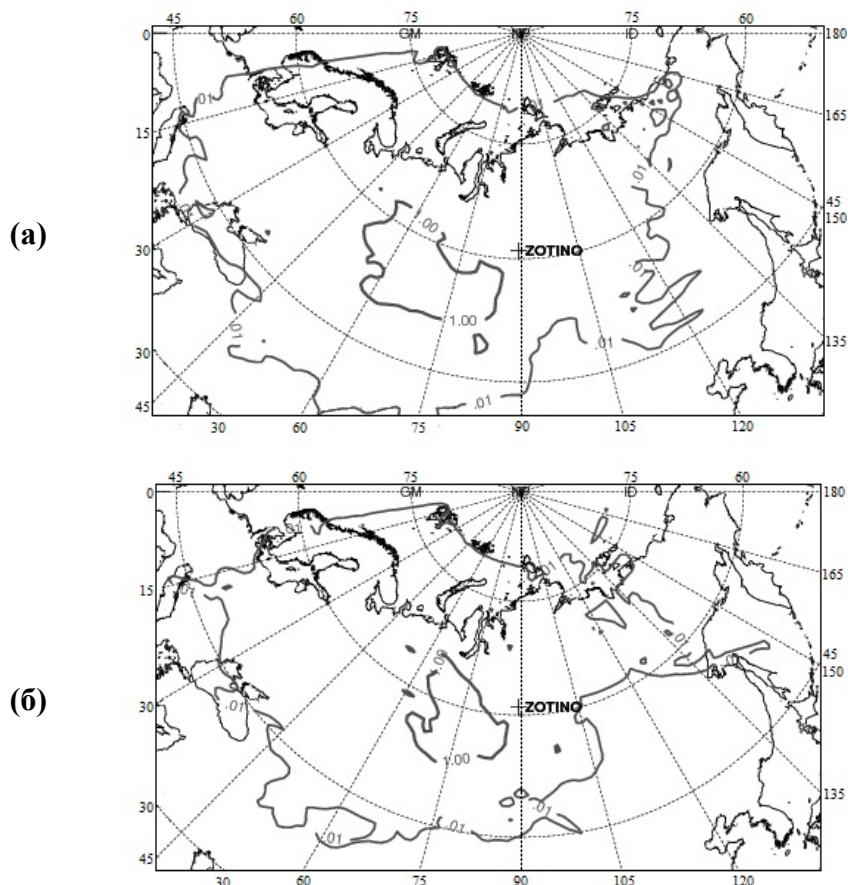


Рис.3. Функция вклада источников CO для станции ZOTTO. Изолиниями оконтурены области выноса в район станции воздуха с высоким содержанием CO с вероятностями 1. и 0.01 (в условных единицах).

В разделе 2.4 приведены сводные количественные оценки влияния антропогенных и природных эмиссий CO по данным EDGAR (антропогенные эмиссии), MEGAN (эмиссии биогенных ЛОС) и GFED (природные пожары) на состав воздуха в Центральной Сибири (ZOTTO) по результатам численных экспериментов. Как следует из рис. 4, наибольший вклад в увеличение приземного содержания CO в холодный период относительно фоновой величины (обусловленной дальним переносом от планетарных источников) вносит региональный перенос от антропогенных источников в Западной Европе (до 20 ppbv для района ZOTTO), на Европейской территории России (ЕТР) (до 35 ppbv), на Урале и юге Сибири

(до 28 ppbv). В теплый период влияние антропогенного фактора резко ослабевает и фоновое содержание CO контролируется, в первую очередь, окислением биогенных ЛОС (26 ppbv), а также пожарной активностью в восточной Сибири и на севере Дальнего Востока (до 12 ppbv).

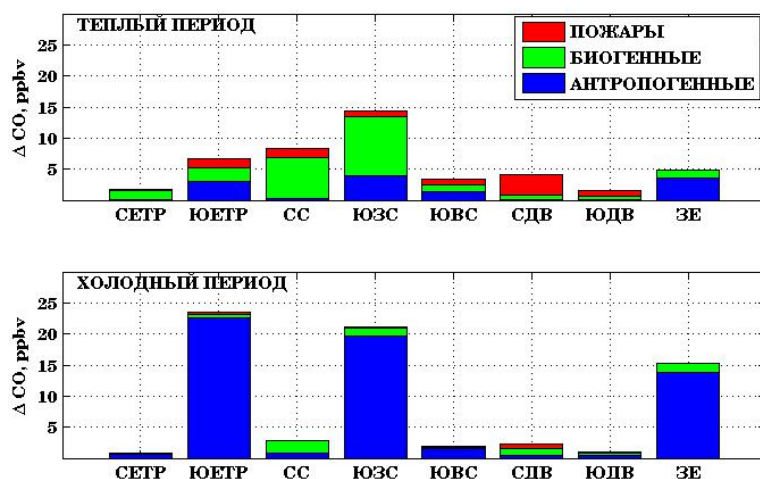


Рис. 4. Сводная диаграмма значений ΔCO в ZOTTO для разных эмиссий CO. Средние за 2007 – 2011 гг. значения за теплый (июнь - август) и холодный (декабрь-февраль) период.

В целом, региональный перенос от антропогенных источников и районов с высокой пожарной активностью играет важную роль в суммарном региональном балансе CO, что необходимо учитывать при количественном анализе факторов, определяющих долговременную эволюцию фотохимической системы нижней тропосферы над континентом.

Основные выводы второй главы сформулированы в **разделе 2.5**.

Третья глава посвящена изучению влияния климатически значимых региональных источников эмиссий $NO_x (=NO+NO_2)$ и биогенных летучих органических соединений (ЛОС) на фотохимическую генерацию приземного озона (O_3) в Северной Евразии. В **разделе 3.1** дается подробное описание режимов фотохимической генерации озона в фотохимической системе NO_x -ЛОС- O_x - NO_x , приведены основные реакции, описывающие процессы генерации и стока озона, определено понятие эффективности производства озона (ЭПО) как количество произведенных молекул озона в расчете на одну молекулу NO_x , поступившую в атмосферу из источника выброса.

Присутствие в атмосфере молекул NO_x катализирует процесс окисления летучих органических соединений и является важнейшим фактором, определяющим длину цепи механизма окисления ЛОС и, тем самым, скорость производства озона. В условиях слабозагрязненного воздуха ($0.1\text{--}0.5 \text{ ppb}$) $< [\text{NO}_x] < (5\text{--}10 \text{ ppbv})$ при достаточном количестве солнечной радиации средняя лагранжева эффективность производства озона (ЭПО) за время от t_0 до t может быть определена как

$$\partial_{\text{NO}_x, \text{lag}} \text{O}_3 = \frac{\Delta[\text{O}_3]}{\Delta[\text{NO}_z]}, \quad (2)$$

где $\Delta[\text{NO}_z] = [\text{NO}_z](t) - [\text{NO}_z](t_0)$, с точностью до величины, определяемой вкладом процессов удаления NO_y из атмосферы, есть разность между общим количеством поступивших молекул NO_x за время $t - t_0$ и количеством NO_x к моменту времени t .

На практике, значения $[\text{O}_3]$ и $[\text{NO}_z]$ в начальный момент времени, как и соответствующие фоновые величины, остаются неизвестными, а их формальное определение зачастую оказывается невозможным, в связи с чем величину $\Delta[\text{O}_3]/\Delta[\text{NO}_z]$ рассчитывают по результатам стационарных измерений абсолютных концентраций O_3 и NO_z за продолжительный период времени, как угол наклона соответствующей прямой при регрессии $[\text{O}_3]$ на $[\text{NO}_z]$. Свободный член уравнения регрессии (далее $[\text{O}_3]_0$) по своему смыслу представляет среднюю за продолжительный временной интервал в данной точке пространства концентрацию озона, обусловленную лишь процессами переноса (в отсутствие источников NO_x). Рассчитанные на основе (2) отношения $\Delta[\text{O}_3]/\Delta[\text{NO}_z]$ представляют оценку сверху для реальных величин ЭПО, ввиду неучитывания процессов стока реактивного азота на подстилающую поверхность.

В разделе 3.2 детально описаны сценарии модельных экспериментов. Для оценки интегрального эффекта от эмиссий NO_x на поле приземного озона

антропогенные эмиссии NO_x и биогенные эмиссии ЛОС в выбранных регионах последовательно уменьшались на 50 и 100% от исходной величины, принятой в базовом модельном расчете. Величина среднего атмосферного отклика (AO_{O_3}) в поле озона определялась аналогично отклику в поле CO :

$$\text{AO}_{\text{O}_3}(\mathbf{r}) = ([\text{O}_3]^* - [\text{O}_3]_{\text{R}})(\mathbf{r}) \quad (3)$$

Величину AO_{O_3} можно интерпретировать как среднюю (по большому ансамблю реализаций траекторий воздушных масс, приходящих в \mathbf{r}) величину наработки озона при заданном сценарии эмиссий.

Анализ полей AO_{O_3} и $\Delta[\text{O}_3]/\Delta[\text{NO}_z]$ за период с 1 декабря 2006 г. по 30 ноября 2012 гг. выполнен для трех географических регионов: Западной Европы (ЗЕ), Европейской территории России (ЕТР) и Сибири (см. Рис.5). Как следует из Таблицы 2, для рассматриваемых ниже регионов Европы и Сибири антропогенные эмиссии NO_x являются преобладающими по сравнению с другими источниками в нижней тропосфере, что обуславливает их определяющее влияние на условия фотохимической генерации озона.

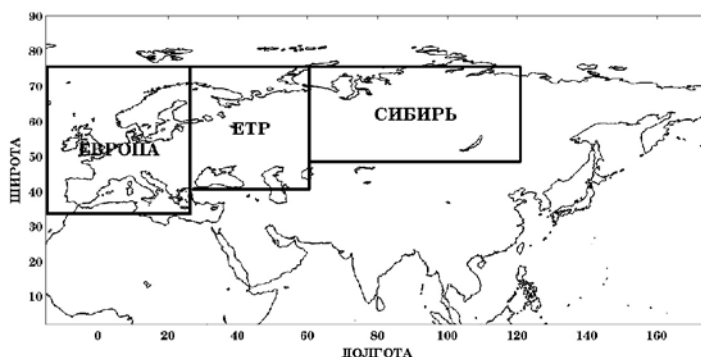


Рис. 5. Географические районы, выбранные для анализа приземного поля озона: Западная Европа (ЗЕ) (35–75 N, 15–27E), Европейская территория России (ЕТР) (41–75 N, 27–60 E), Сибирь (СИБ) (49–75 N, 60–120 E).

Таблица 2. Суммарные эмиссии NO_x (Тг N в год) для модельных регионов ЗЕ, ЕТР и СИБ (Рис. 5) за 2007–2012 гг., использованных в базовом расчете по модели GEOS-Chem.

Источники NO_x	ЗЕ	ЕТР	СИБ
Антропогенные	3.5	1.5	0.6
Растительность и почвы	0.30 – 0.41	0.44 – 0.50	0.28 – 0.36
Горение биомассы	0.06 – 0.13	0.05 – 0.11	0.08 – 0.18

В разделе 3.3. представлены результаты расчетов полей AO_{O_3} по ТХМ GEOS-Chem при последовательном уменьшении эмиссий NO_x и ЛОС в рассматриваемых регионах на 50 и 100 % от базовой величины. Средние по регионам значения AO_{O_3} приведены в Таблице 3. Средние за лето и зиму 2007–2012 гг. поля AO_{O_3} при 100% уменьшении эмиссий NO_x в макрорегионе Евразия представлены на Рис. 6.

Таблица 3. Средние значения величины AO_{O_3} на оси континентального шлейфа (50–55° N) загрязнений за 2007–2012 гг. при различных сценариях эмиссий NO_x и ЛОС в макрорегионе Евразия (ЗЕ, ЕТР, Сибирь) (см. Рис. 5). Во втором столбце приведены средние концентрации приземного озона на оси шлейфа в базовом расчете.

Июнь – август

Регион	$\delta NO_x = 0 \%$			$\delta NO_x = 50 \%$			$\delta NO_x = 100 \%$		
	δ БЛОС, %			δ БЛОС, %			δ БЛОС, %		
	0	50	100	0	50	100	0	50	100
ЗЕ	60.3	2.6	6.4	3.8	5.7	8.6	10.2 (10.6)	11.3	13.1
ЕТР	52.4	2.5	6.2	3.5	5.4	8.4	8.8 (2.3)	10.1	12.2
Сибирь	51.4	1.6	4.3	2.7	3.9	6.1	6.7 (0.3)	7.4	9.0

Декабрь – февраль

Регион	$\delta NO_x = 0 \%$			$\delta NO_x = 50 \%$			$\delta NO_x = 100 \%$		
	δ БЛОС, %			δ БЛОС, %			δ БЛОС, %		
	0	50	100	0	50	100	0	50	100
ЗЕ	34.5	0.1	0.2	-1.6	-1.5	-1.4	-1.6 (-1.1)	-1.6	-1.5
ЕТР	18.7	0.1	0.1	-4.5	-4.4	-4.3	-9.1 (-0.4)	-9.1	-9.0
Сибирь	29.8	0.1	0.1	-2.4	-2.4	-2.3	-4.6 (0.1)	-4.5	-4.4

Наибольшие значения AO_{O_3} на ЕТР и в Сибири приходятся на регионы с высокими антропогенными эмиссиями, влияние которых проявляется в повышенном содержании СО в подветренных областях. Как следует из Рис.3а, антропогенные эмиссии NO_x вносят определяющий вклад в фотохимическую наработку озона (по сравнению с биогенными ЛОС и антропогенным СО), величина которого закономерно уменьшается при смещении к востоку ввиду общего уменьшения объемов антропогенных выбросов NO_x в Сибири и на ЕТР по сравнению с Западной Европой. Значимый эффект от эмиссий NO_x в поле приземного озона на уровне $AO_{O_3}=5-10$ ppbv (или 15–30% от фоновой величины ~ 35 ppbv), прослеживается в средних широтах до $\sim 110^\circ$ в.д., а на уровне $AO_{O_3}>2$ ppbv –

до 130° в.д., охватывая значительную часть Дальневосточного региона (Рис. б). Влияние эмиссий в Западной Европе на уровне 5 ppbv ограничивается в летний период $\sim 35^\circ$ в.д. К востоку от Уральских гор (60° в.д.) влияние источников NO_x в Западной Европе на поле озона незначительно (< 1 ppbv).

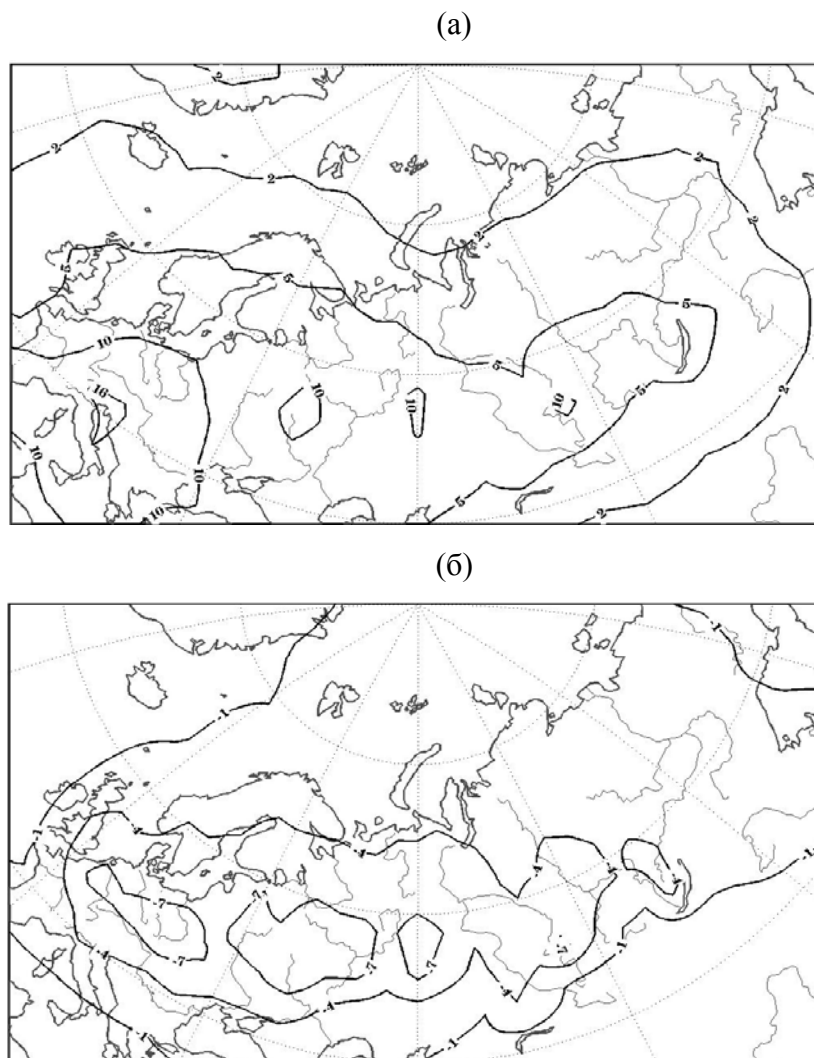


Рис.6. Средние за летние (а) и зимние (б) месяцы 2007–2012 гг. поля AO_{O_3} при уменьшении на 100% эмиссий NO_x в макрорегионе Евразия.

Средняя величина ЭПО за рассматриваемые летние периоды представлена на Рис.7, пунктиром обозначена изолиния средней концентрации $\text{NO}_x=0.3$ ppbv, примерно соответствующая границе применимости использованного подхода к оцениванию данной величины

Величина $\Delta[\text{O}_3]/\Delta[\text{NO}_z]$ уменьшается с ростом NO_x ввиду увеличения вклада последних в суммарный сток водородных радикалов и

пропорциональному уменьшению длины цепи механизма окисления ЛОС. Сравнительно низкие концентрации NO_x в рассматриваемом макрорегионе обуславливают высокие (>20 мол./мол.) значения ЭПО в умеренных и высоких широтах над континентом, при этом пространственное распределение поля $\Delta[\text{O}_3]/\Delta[\text{NO}_z]$ имеет отчетливо выраженную зональность, обусловленную широтной зависимостью притока солнечной радиации, интенсивность которой определяет скорость образования молекул гидроксила ОН.

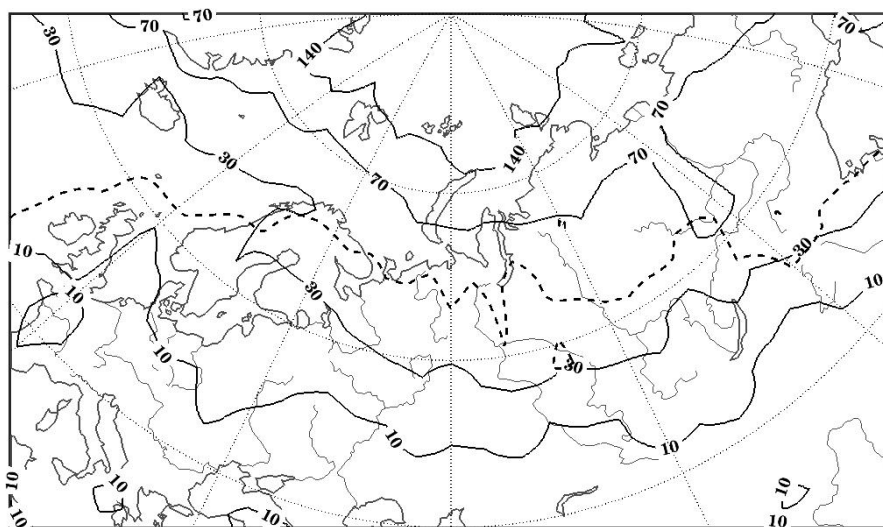


Рис.7. Средняя за летние месяцы 2007–2012 гг. эффективность производства озона (поле $\Delta[\text{O}_3]/\Delta[\text{NO}_z]$).

Полученная величина ЭПО хорошо коррелирует с возрастом воздушной массы, устанавливаемым по отношению NO_x к суммарному реактивному азоту NO_y , при среднем вкладе региональных источников на уровне 20% от фоновой концентрации озона ($\Delta\text{O}_3 \sim 10\text{--}15$ ppbv). Количественные оценки величины $\Delta[\text{O}_3]/\Delta[\text{NO}_z]$ за летние месяцы указанного периода ($\sim 10\text{--}30$ мол. $\text{O}_3/\text{мол. NO}_x$) находятся в хорошем соответствии с выводами фотохимической теории тропосферного озона для условий слабо загрязненного воздуха.

Зависимость величины ЭПО от отношения NO_x/NO_y , которое можно рассматривать в качестве меры фотохимического возраста воздушной массы;

представлена на Рис.8. Наблюдается устойчивая тенденция роста ЭПО с увеличением фотохимического возраста во всех регионах, при этом характерные значения $\Delta[O_3]/\Delta[NO_z]$ при фиксированном NO_x/NO_y в Западной Европе заметно ниже, чем на ЕТР и в Сибири, ввиду сравнительно бóльших объемов эмиссий и сопутствующих приземных концентраций NO_x .

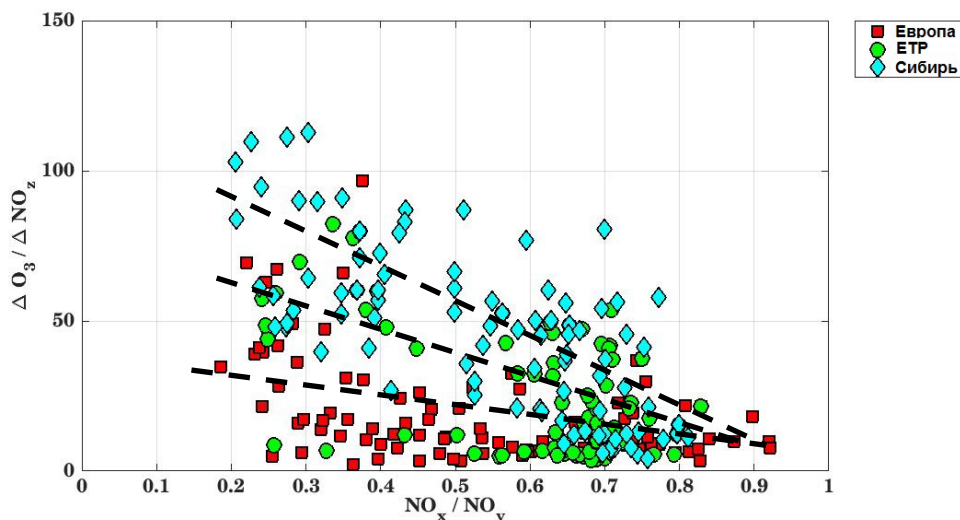


Рис.8. Средние за теплый период 2007 г. величины ЭПО для модельных регионов в зависимости от отношения NO_x/NO_y .

Природные и антропогенные факторы изменчивости приземного содержания тропосферного озона в Центральной Сибири рассмотрены в **разделе 3.4**. Количественные оценки чувствительности приземного озона к биогенным эмиссиям ЛОС и антропогенным NO_x и CO были выполнены для определенных выше модельных регионов (см. Рис. 5). Для проведения модельного эксперимента был выбран 2007 год, который для всех обозначенных регионов характеризуется как теплый с нормальным количеством осадков и сравнительно невысокой пожарной активностью (По данным Гидрометеоцентра, <http://meteoinfo.ru>). Была проведена серия расчетов с последовательным уменьшением эмиссий NO_x , CO и биогенных ЛОС на 50 и 100% от исходной величины.

Среднесезонные величины AO_{O_3} (см. формулу (3)) для ZOTTO за рассматриваемый период приведены на сводной диаграмме (Рис. 9). Вклад

дальнего переноса воздушных масс составляет в летний период более 5 ppbv, или около 15% от среднесезонного значения (~37 ppbv). В зимний период в связи с изменением режима генерации озона (с NO_x-чувствительный на NO_x-чувствительный) выбросы NO_x приводят к его разрушению (до -4 ppbv) в реакции титрования NO+O₃. В целом, вклад региональных эмиссий в годовой цикл озона в отдельные сезоны достигает 15 – 17% от содержания O₃, но определяющим его назвать нельзя.

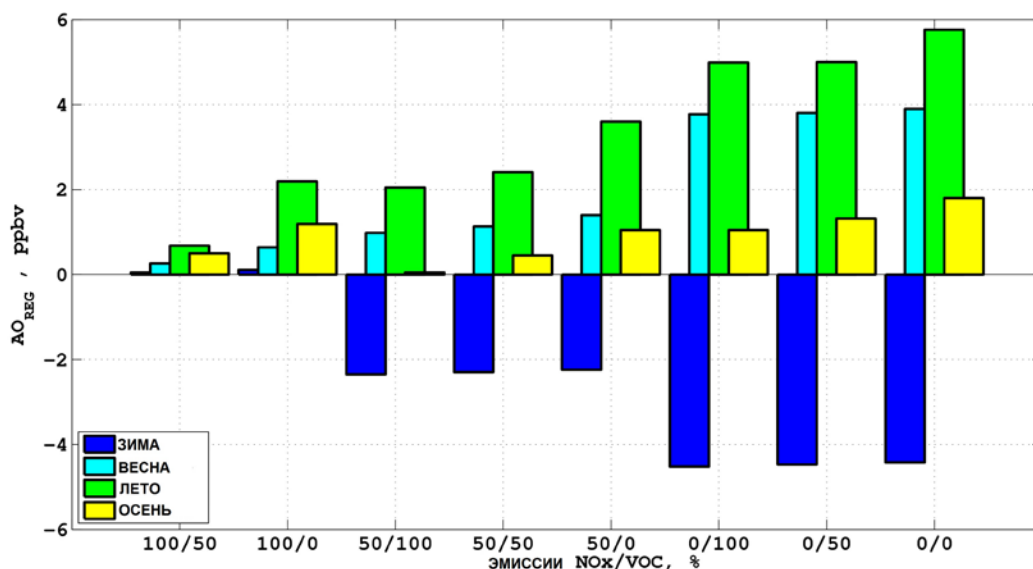


Рис.9. Сводная диаграмма величин AO_{O₃} для станции ZOTTO при разных значениях величин эмиссий биогенных ЛОС и NO_x в Сибири, на ЕТР и в Европе. Приведены средние значения для всех сезонов 2007 года.

Рассчитанные величины ЭПО хорошо согласуются с независимыми оценками, выполненными на основе данных прямых измерений O₃ и NO_x на высотной мачте ZOTTO в 2007–2015 гг. Среднее за летние месяцы значение ΔP ~30.0–43.7 [мол.O₃/мол.NO_x], рассчитанное на основе данных измерений ZOTTO, хорошо согласуется с величиной ЭПО 39.8 [мол.O₃/мол.NO_x], полученной из численных экспериментов с TXM GEOS-Chem.

В разделе 3.5 представлены количественные оценки суммарного бюджета озона в каждом из трех рассматриваемых регионов (ЗЕ, ЕТР и СИБ, рис. 5), рассчитанные интегрированием по пространству и времени конечно-

разностного аналога модельного уравнения адвекции/диффузии с правой частью, описывающей источники и стоки. Итоговое выражение имеет вид

$$\Delta M(O_3) = P_x + L_x + V_d + Z + H + W, \quad (4)$$

где все величины имеют размерность Тг ($=10^{12}$ г), $\Delta M(O_3) = M(O_3)|_{t_2} - M(O_3)|_{t_1}$ – разность между конечным и начальным значениями суммарной массы озона в данном регионе за временной интервал от t_1 до t_2 , P_x и L_x – фотохимическое производство и сток озона, V_d – суммарный сток на подстилающую поверхность, Z , W , H – величины зонального, меридионального и вертикального переноса, соответственно.

Основные результаты расчетов представлены в Таблице 4, в которой компоненты баланса (4) сгруппированы в соответствии с их ролью в глобальной фотохимии тропосферного озона. Для удобства восприятия все величины усреднены в слое толщиной от поверхности земли до 850 мбар (средняя толщина слоя конвективного перемешивания в летние месяцы над континентом) и представлены в единицах измерения, эквивалентных ppbv.

Таблица 4. Сводный баланс озона для регионов Западная Европа (ЗЕ), Европейская территория России (ЕТР) и Сибирь (СИБ) (см. Рис. 5). Расчеты по модели GEOS-Chem.

Вклад, ppbv/день	Апрель – Сентябрь					
	2007 г.			2012 г.		
	ЗЕ	ЕТР	СИБ	ЗЕ	ЕТР	СИБ
Хим. источники ($PO_{x_net} = P_x - L_x$)	2.80	3.20	1.76	2.80	3.27	1.96
Вертикальный перенос $V_d + H$	-0.65	-2.11	-1.55	-0.81	-2.11	-1.31
Горизонтальный перенос $W + Z$	-2.18	-1.09	-0.26	-2.02	-1.18	-0.72
Среднее содержание озона	40.8	39.5	36.7	43.5	36.7	37.5
Вклад, ppbv/день	Октябрь – Март					
	2007 г.			2012 г.		
	ЗЕ	ЕТР	СИБ	ЗЕ	ЕТР	СИБ
Хим. источники $PO_{x_net} = P_x - L_x$	0.75	0.54	0.13	0.69	0.48	0.13
Вертикальный перенос $V_d + H$	0.20	-0.80	0.70	0.25	-1.21	1.64
Горизонтальный перенос $W + Z$	-0.97	1.28	-0.82	-0.94	0.72	-1.73
Среднее содержание озона	39.8	35.5	34.6	40.1	35.3	35.4

В теплый период для всех регионов процесс фотохимической наработки озона выступает единственным его источником, горизонтальный и вертикальный перенос являются стоками. Наибольшая интенсивность фотохимической наработки ($PO_{x_{net}}$) достигается на ЕТР (до 3.27 ppbv/день), наименьшая – в Сибири (до 1.96 ppbv/день). Вертикальный перенос ($V_d + H$) также достигает наибольшей интенсивности на ЕТР (-2.11 ppbv/день), а горизонтальный ($Z+W$) – в Западной Европе (до -2.18 ppbv/день).

В холодный период величина фотохимической наработки озона убывает от Западной Европы (до 0.75 ppbv/день) к Сибири (0.13 ppbv/день). Последовательная смена знаков величин горизонтальной адвекции и вертикального переноса при смещении к востоку может отражать волновой характер макроциркуляционных процессов, определяющих, в том числе и условия вертикального переноса озона для нижней тропосферы в целом.

Стоит отметить, что среднее содержание озона в 2012 году в Сибири выше, чем на ЕТР и в теплый, и в холодный период. Это может быть объяснено высокой чувствительностью фотохимической системы в Сибири (см. рис. 8), а также очень жарким и сухим летом, в которое происходило активное накопление в воздухе веществ–предшественников озона, в том числе в результате природных пожаров.

Основные выводы третьей главы сформулированы в **разделе 3.6**.

Основные результаты диссертационной работы приведены в **заключении**:

По результатам численного моделирования установлен среднеширотный крупномасштабный шлейф антропогенно загрязненного воздуха, формируемый антропогенными источниками эмиссий в наветренной зоне: промышленные регионы Сибири, ЕТР и Западной Европы. Наличие данного шлейфа контролирует основные свойства ФХС нижней тропосферы над континентом до Восточной Сибири включительно, в то время как далее к востоку (Приморский Край) преобладающую роль начинают играть эмиссии

северного Китая и промышленных районов Юго-Восточной Азии в целом.

- Согласно расчетам по ТХМ GEOS-Chem, на оси шлейфа превышение приземного содержания CO над соответствующей фоновой концентрацией, обусловленной региональными природными эмиссиями, в холодный период составляет от 20 ppbv в Забайкалье до 100 ppbv и более в Западной Европе, на ЕТР и на юге Западной Сибири. В теплый период вклад антропогенных эмиссий превышает 20 ppbv только вблизи источников антропогенного загрязнения.

- Наибольший вклад в приземное содержание озона вносят антропогенные эмиссии NO_x на фоне локальных выбросов биогенных ЛОС, их суммарное влияние превышает 13 ppbv на оси шлейфа антропогенного загрязнения в теплый период, при этом основной эффект дают региональные источники атмосферного загрязнения. В холодный период интенсивные антропогенные выбросы NO_x приводят к разрушению озона (до -9 ppbv на оси шлейфа). Вклад в приземное содержание O₃ от эмиссий CO не превышает 1 ppbv даже вблизи источников эмиссий.

- Средние за летние месяцы 2007–2012 гг. значения эффективности производства озона в расчете на единицу содержания NO_x в приземном слое атмосферы составляют до 50 ppbv O₃/ppbv NO_x в пределах рассматриваемой теории (NO_x>0.3 ppbv). Наибольшая чувствительность приземного поля озона к антропогенному загрязнению наблюдается вблизи региональных источников эмиссий NO_x (АО до 13 ppbv), в то время как эффективность производства озона в расчете на одну молекулу NO_x возрастает по мере удаления от источников вместе с фотохимическим возрастом воздушной массы. Характерная величина ЭПО в нижней тропосфере над континентом составляет ~ 35 на ЕТР, ~ 20 в Западной Европе и ~ 45 в Сибири.

- В теплый период года (1 апреля - 30 сентября) в Европе, ЕТР и Сибири имеет место фотохимическая наработка озона, которая оказывается наибольшей на ЕТР (3.2–3.3 ppbv/день) и наименьшей – в Сибири (1.8–2.

ppbv/день). Величина суммарного источника озона (фотохимическая наработка + вертикальный перенос) наибольшая в Западной Европе (2.0–2.1 ppbv/день), далее – на ЕТР (~1.1 ppbv/день), и наименьшей – в Сибири (0.2–0.6 ppbv/день). Суммарный источник озона компенсируется горизонтальным переносом, при этом все рассматриваемые регионы являются регионами–донорами для областей подветренного сноса. В холодный период (1 октября – 31 марта) величина фотохимической наработки озона закономерно убывает от Западной Европы (до 0.75 ppbv/день) к Сибири (0.13 ppbv/день) и для регионов ЕТР и Сибири оказывается примерно на порядок ниже по сравнению с летними значениями.

- Эмиссии CO от природных пожаров составляют 0.1–9.5 (GFED 3) Тг С/год в зависимости от конкретного региона. Антропогенные эмиссии по данным EDGAR 3.2 составляют 0.1–38.1 Тг С/год. Наиболее интенсивные очаги природных пожаров наблюдаются в Восточной Сибири, наиболее активные антропогенные эмиссии – в Европе и на южной части ЕТР.
- Эмиссии NO_x от горения биомассы составляют в зависимости от региона 0.05–0.18 Тг N/год (GFED 4). Эмиссии от растительности и почв дают 0.28–0.50 Тг N/год (MEGAN 2.1). Антропогенные выбросы составляют 0.6–3.5 Тг N/год (EDGAR 4.2). Наибольшего значения антропогенные эмиссии достигают в Европе, наименьшего – в Сибири, где выше всего эмиссии от пожаров. Эмиссии от растительности и почв наиболее интенсивны на ЕТР.

Цитируемая литература

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.*, 116, D07301, 2011, doi:10.1029/2010JD014571.

Список публикаций автора по теме диссертации

Публикации в изданиях, входящих в список ВАК и базы данных WoS и Scopus

1. **Штабкин Ю.А., Моисеенко К.Б., Скороход А.И., Васильева А.В. и Хайманн М.** Источники и вариации тропосферного СО в центральной Сибири: численные эксперименты и наблюдения на высотной мачте ZOTTO // Известия РАН. Физика Атмосферы и Океана. 2016. Т. 52. № 1. С. 51-63. DOI: 10.7868/S0002351516010090
2. **Моисеенко К.Б., Штабкин Ю.А., Березина Е.В., Скороход А.И.** Региональные фотохимические источники приземного озона в Европе и западной Сибири // Известия РАН. Физика Атмосферы и Океана. 2018. №6. С.654-658. DOI: 10.1134/S000235151806010X
3. **Моисеенко К.Б., Березина Е.В., Васильева А.В., Штабкин Ю.А., Скороход А.И., Еланский Н.Ф., Беликов И.Б.** NO_x -лимитирующий режим фотохимической генерации озона в слабо загрязнённом конвективном пограничном слое: наблюдения на высотной мачте ZOTTO в центральной Сибири в 2007-2015 гг // Доклады Академии Наук. 2019. Т. 487. № 6. С. 669-673.
4. **Shtabkin Yu.A., Moiseenko K.B., Skorokhod A.I., Berezina E.V., Vasileva A.V.** Sources and variations of tropospheric ozone in central Siberia: observations and model simulations // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2020. 606(1). 012058.
5. **Wang, P. Elansky, N.F., Timofeev, Y.M., Wang, G., Golitsyn, G.S., Makarova, M.V., Rakitin, V.S., Shtabkin, Y., Skorokhod, A.I., Grechko, E.I., Fokeeva, E.V., Safronov, A.N., Ran, L., Wang, T.** Long-Term Trends of Carbon Monoxide Total Columnar Amount in Urban Areas and Background Regions: Ground- and Satellite-based Spectroscopic Measurements // Advances in Atmospheric Sciences. 2018. V. 35(7), pp. 785-795. DOI: 10.1007/s00376-017-6327-8
6. **Ракитин В.С., Еланский Н.Ф., Панкратова Н.В., Скороход А.И., Джола А.В., Штабкин Ю.А., Ван П., Ван Г., Васильева А.В., Макарова М.В., Гречко Е.И.** Исследование трендов общего содержания СО и СН₄ над Евразией на основе анализа наземных и орбитальных спектроскопических измерений // Оптика атмосферы и океана. 2017. Т. 30. № 6. С. 449-456. DOI: 10.15372/AOO20170601
7. **Safronov A.N., Shtabkin Y.A., Berezina E.V., Skorokhod A.I., Rakitin V.S., Belikov I.B., Elansky N.F.** Isoprene, methyl vinyl ketone and methacrolein from TROICA-12 measurements and WRF-CHEM and GEOS-CHEM simulations in the far east region // Atmosphere. 2019. V.10(3). № 152.
8. **Ракитин В.С., Штабкин Ю.А., Еланский Н.Ф., Панкратова Н.В., Скороход А.И., Гречко Е.И., Сафронов А.Н.** Результаты сопоставления спутниковых измерений общего содержания СО, СН₄ и СО₂ с наземными спектроскопическими данными // Оптика атмосферы и океана. 2015. Т. 28. № 9. С. 816-824. DOI: 10.15372/AOO20150907

В нерецензируемых изданиях

1. **Штабкин Ю.А., Моисеенко К.Б.** Сезонные вариации приземной концентрации СО и озона в Центральной Сибири: наблюдения и численное моделирование // XIV Конференция молодых ученых «Взаимодействие полей и излучения с веществом». 14 – 18 сентября 2015 года. Иркутск. Сборник трудов, с. 352 – 354.

2. *Штабкин Ю.А., Моисеенко К.Б.* Количественные оценки природных и антропогенных факторов, определяющих баланс приземного озона в Северной Евразии // 19-я Международная школа-конференция молодых учёных «Состав атмосферы. Атмосферное электричество. Климатические процессы». 25–29 мая 2015 года. Шепси. Сборник тезисов докладов, с. 56.
3. *Штабкин Ю.А., Моисеенко К.Б.* Вклад природных и антропогенных факторов в приземное содержание озона в Северной Евразии // Международная конференция и школа молодых ученых по измерениям, моделированию и информационным системам для изучения окружающей среды «ENVIROMIS-2016». 11 – 16 июля 2016 года. Томск. Сборник избранных трудов, с. 292 – 295.
4. *Shtabkin Yu.A., Moiseenko K.B.* Contribution of natural and anthropogenic factors into near-surface ozone in the Northern Eurasia // Международная конференция и школа молодых ученых по измерениям, моделированию и информационным системам для изучения окружающей среды «ENVIROMIS-2016». 11 – 16 июля 2016 года. Томск.
5. *Shtabkin Yu. A., Moiseenko K. B., Skorokhod A. I., and Berezina E. V.* Regional sources of near-surface ozone in the Northern Eurasia // Proceedings of the 3rd Pan-Eurasian Experiment (PEEX) Conference and the 7th PEEX Meeting. Moscow, 19 – 22 September 2017. P. 453
6. *Штабкин Ю.А., Моисеенко К.Б., Березина Е.В., Скороход А.И.* Региональные источники тропосферного озона в Европе и западной Сибири // Международная конференция, посвященная столетию со дня рождения академика Александра Михайловича Обухова «Турбулентность, динамика атмосферы и климата». Сборник тезисов докладов. 2018. С. 171.
7. *Штабкин Ю.А., Моисеенко К.Б., Васильева А.В., Березина Е.В., Скороход А.И.* Сезонные вариации приземного содержания СО в центральной Сибири: наблюдения ZOTTO и численное моделирование // Международная конференция, посвященная столетию со дня рождения академика Александра Михайловича Обухова «Турбулентность, динамика атмосферы и климата». Сборник тезисов докладов. 2018. С. 172.
8. *Shtabkin Yu., Moiseenko K., Skorokhod A., and Berezina E.* Regional sources of tropospheric ozone // Geophysical Research Abstracts. Vol. 20. EGU2018-1153. 2018
9. *Штабкин Ю.А., Моисеенко К.Б.* Региональные источники тропосферного озона в Северной Евразии // Сборник тезисов докладов 22-й Международной школы-конференции молодых учёных САТЭП-2018, г. Майкоп, 23–29 сентября 2018
10. *Штабкин Ю.А., Моисеенко К.Б., Скороход А.И., Березина Е.В.* Природные и антропогенные факторы сезонной изменчивости приземного озона в Центральной Сибири // V Международная научно-практическая конференция «Фундаментальные и прикладные аспекты геологии, геофизики и геоэкологии с использованием современных информационных технологий». 20 – 24 мая 2019 года, Майкоп, Россия. Сборник трудов, с. 291 – 298.
11. *Shtabkin Yu., Moiseenko K., Skorokhod A., Berezina E., and Vasileva A.* Natural and anthropogenic factors of near-surface ozone seasonal variations in the Northern Eurasia // Geophysical Research Abstracts. Vol. 21. EGU2019-2525. 2019.
12. *Штабкин Ю.А., Моисеенко К.Б., Скороход А.И., Березина Е.В.* Региональные фотохимические источники тропосферного озона в Сибири и на ЕТР // Международная молодежная школа и конференция по вычислительно-информационным технологиям для наук об окружающей среде: “СITES-2019”. 27 мая – 6 июня 2019 года, Москва, Россия. Сборник избранных трудов, с. 202 – 204.
13. *Штабкин Ю.А., Моисеенко К.Б., Скороход А.И., Березина Е.В.* Сезонные вариации приземного содержания озона в Северной Евразии: наблюдения и численное моделирование // Всероссийская конференция с международным участием «Турбулентность, динамика атмосферы и климата», Москва 10 – 12 ноября 2020 г. Сборник трудов. С. 133.
14. *Штабкин Ю.А., Моисеенко К.Б., Скороход А.И., Березина Е.В., Васильева А.В.* Влияние дальнего переноса воздушных масс на сезонные вариации и региональный баланс тропосферного озона // Всероссийская конференция с международным участием «Турбулентность, динамика атмосферы и климата», Москва 10 – 12 ноября 2020 г. Сборник трудов. С. 134.