

ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ АТМОСФЕРЫ, ГИДРОСФЕРЫ И ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

УДК 551.510.42

Исследование мезомасштабных (β и γ) особенностей распределения газового состава воздуха в районе г. Томска

М.Ю. Аршинов, Б.Д. Белан[✉], С.Б. Белан, Д.К. Давыдов,
А.В. Козлов, О.О. Марченко*

*Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1*

Поступила в редакцию 23.03.2025;

после доработки 01.04.2025;

принята к печати 09.04.2025

По заключению Международной группы экспертов по изменению климата ООН (IPCC), для определения основных причин глобального потепления, обусловленного увеличением содержания парниковых газов, требуется точная оценка их выбросов и стоков, так как все еще сохраняется значительная неопределенность в оценке их баланса. Для уточнения баланса в настоящей работе исследуются неоднородности в распределении потоков и стоков парниковых газов на мезомасштабном уровне. С учетом того, что в процессах газового обмена значительную роль играет почва, такой подход представляется весьма перспективным. В работе используются данные ежечасных измерений газового состава воздуха с трех постов комплексного мониторинга состава воздуха: TOR-станции, обсерватории «Фоновая» и Базового экспериментального комплекса ИОА СО РАН. Показано, что различия средних многолетних (2013–2017 гг.) концентраций между станциями лежат в пределах 116–195 мкг/м³ для CO; 3,3–8,3 млн⁻¹ для CO₂; 0,4–0,8 мкг/м³ для NO; 4,6–15,5 мкг/м³ для NO₂; 8,1–14,3 мкг/м³ для O₃ и 2,3–6,9 мкг/м³ для SO₂. Впервые выявлено, что у разницы концентраций имеются годовые и суточные вариации. Полученные результаты расширяют знания о динамике парниковых и окисляющих газов в атмосфере и могут быть полезны при выработке требований к точности их измерений.

Ключевые слова: атмосфера, диоксид серы, метан, озон, оксиды азота, оксиды углерода, перенос, состав; atmosphere, sulfur dioxide, methane, ozone, nitrogen oxides, carbon oxides, transport, composition.

Введение

Одной из основных причин глобального потепления, по заключению Международной группы экспертов по изменению климата ООН (МГЭИК, IPCC), является увеличение концентрации парниковых и других газов, поступающих как от антропогенных, так и природных источников [1]. Поэтому точная оценка их выбросов и стоков, перераспределения между атмосферой, океаном и земной биосферой имеет решающее значение для разработки климатической политики и прогнозирования будущих изменений климата. Несмотря на большой объем выполненных исследований бюджета парниковых газов на планете, в его оценке все еще сохраняется значительная неопределенность [2–4]. Это говорит о том, что не все источники и стоки полностью учтены в ходе проведенных расчетов.

В поисках причин неполного учета баланса парниковых газов в окружающей среде ряд ученых обращает внимание на неоднородность распределения их потоков и стоков на мезомасштабном [5, 6] и даже на микромасштабном уровнях [7, 8]. Учитывая, что в процессах газового обмена значительную роль играет почва и ее свойства существенно отличаются на обоих масштабах [9], такой подход представляется весьма перспективным. Еще одним фактором, который может влиять на распределение газового состава, является растительность. Она, с одной стороны, определяет альбедо местности и приток тепла [10], с другой – может выступать в качестве источника или стока различных газов [11] или быть их прекурсором, например для озона [12]. Помимо гетерогенности свойств почвы и растительности на распределение газового состава могут влиять расчлененность рельефа и параметры ветра [13, 14].

Еще одна возможная причина мезомасштабной гетерогенности распределения газового состава в атмосфере, – циркуляция [15]. Она вызывается двумя видами неоднородности подстилающей поверхности: орографической (рельеф) и термической. Орографическая обуславливает, в частности, склоновые и горно-долинные ветры, фены (в том

* Михаил Юрьевич Аршинов (michael@iao.ru); Борис Денисович Белан (bbd@iao.ru); Сергей Борисович Белан (bsb@iao.ru); Денис Константинович Давыдов (denis@iao.ru); Артем Владимирович Козлов (artem@iao.ru); Олеся Олеговна Марченко (marchenko@nnc.kz).

числе знаменитая бора), подветренные вихревые цепочки (Кармана) и подветренные роторы. Термическая создается различием радиационных (альбедо), теплофизических (коэффициент теплопроводности, теплоемкость) и аэродинамических (шероховатость) характеристик между контрастными типами подстилающей поверхности. Эти различия вызывают разную скорость нагревания и охлаждения этих поверхностей в суточном ходе и, как следствие, разную суточную амплитуду температуры поверхности. Классическим примером мезомасштабной циркуляции, развивающейся над термически неоднородной подстилающей поверхностью, является бризовая (или просто бриз). Таким образом, в природной среде имеются все предпосылки для создания мезомасштабной неоднородности в распределении газового состава воздуха.

Исследование таких мезомасштабных неоднородностей осложняется тем, что станции мониторинга концентрации газов рассредоточены по земле крайне неравномерно и находятся на большом расстоянии друг от друга. Например, на территории РФ, согласно докладу Росгидромета [16], анализ изменчивости концентрации парниковых газов в приземном слое атмосферы выполняется на четырех станциях наблюдений, входящих в Глобальную службу атмосферы (ГСА) ВМО. Станции Териберка (Кольский полуостров, побережье Баренцева моря) и Тикси (Арктическое побережье, море Лаптевых, залив Сого) расположены в условиях, близких к фоновым; станции Новый Порт (полуостров Ямал, берег Обской губы) и Воейково (пригород Санкт-Петербурга) — в районах крупномасштабных антропогенных источников парниковых газов. Следовательно, на всю огромную страну приходится только две государственные фоновые станции.

Решение проблемы мониторинга состава воздуха ранее связывали с развитием систем спутникового зондирования. Так, по данным обзора [17], в 2007 г. уже функционировали 15 типов космических аппаратов, измеряющих аэрозольный и газовый состав воздуха. Однако точность спутниковых данных пока не достаточна [18, 19]. Численное моделирование распределения концентрации и потоков парниковых газов говорит о том, что их неоднородность может быть значительной [20, 21], соизмеримой с крупномасштабными вариациями [22].

Авторами настоящей статьи было создано несколько стационарных и мобильных комплексов для измерения концентрации парниковых газов на территории Западной Сибири с точностью, соответствующей требованиям ВМО. Их расположение позволяет проводить не только крупномасштабные, но и мезомасштабные исследования распределения парниковых газов. Изучение мезомасштабных неоднородностей распределения газового состава и является целью настоящей работы. Рассматриваются следующие вопросы: в каком масштабе наблюдаются значимые различия в концентрации парниковых газов в приземном слое воздуха? При наличии значимых различий какую они имеют динамику во времени?

1. Материалы и методы

В настоящем исследовании используются данные трех постов комплексного мониторинга состава воздуха: ТОР-станции (56°28' с.ш., 85°03' в.д.), обсерватории «Фоновая» (56°25' с.ш., 84°04' в.д.) и Базового экспериментального комплекса (БЭК 56°28' с.ш., 85°06' в.д.) ИОА СО РАН. Их взаимное расположение показано на рис. 1.



Рис. 1. Схема расположения постов мониторинга в районе г. Томска (см. цветной рисунок на сайте <http://iao.ru/ru/content/vol.38-2025/iss.7>)

Все посты находятся в одинаковых условиях — в окружении смешанного леса. Они достаточно удалены от мощных источников антропогенного загрязнения, что позволяет в большинстве случаев не учитывать их влияние на данные измерений. На рис. 1 видно, что посты находятся на одной линии, при наличии западно-восточного переноса воздушных масс это позволяет оценивать антропогенный вклад г. Томска в формирование поля атмосферных примесей.

Для исследования динамики состава воздуха в приземном слое были использованы ряды наблюдений среднечасовых значений анализируемых газов за 2013–2017 гг. Такой выбор обусловлен тем, что в этот период посты функционировали в полном объеме. В 2018 г. из-за попадания молнии измерительный комплекс БЭКа вышел из строя и его по разным причинам не удается восстановить в прежнем виде.

На всех трех постах установлены автоматические комплексы для измерения метеорологических величин, концентраций газовых примесей и аэрозолей в приземном слое атмосферы. Кроме того, обсерватория «Фоновая» и БЭК оборудованы вантовыми мачтами «Унжа-2» с соответствующими датчиками на нескольких высотных уровнях. Пробы воздуха отбираются на ТОР-станции на 10 м от поверхности земли, на «Фоновой» и БЭКе — на 10 и 30 м. Измерения на всех пунктах осуществляются ежедневно и круглосуточно.

Поскольку посты комплексного мониторинга, данные которых использовались в настоящем исследовании, создавались в разное время и по различным

программам, состав применяемого на них оборудования отличается. Перечень приборов приведен в табл. 1. Для регистрации шести газовых компонентов воздуха применялись 12 различных приборов. На постах TOR и БЭК концентрации O₃ и NO/NO₂ измерялись газоанализаторами одного типа. И только один газ (CO) измерялся на всех постах одинаковым прибором.

Важным аспектом изучения мезомасштабных различий в составе воздуха является точность (неопределенность), с которой измеряются концентрации анализируемых газов. Точностные характеристики приборов приведены в табл. 2.

Для снижения неопределенности измерений CO₂ и CH₄ в соответствии с требованиями ВМО в обсерватории «Фоновая» проводились ежедневные калибровки поверочными газовыми смесями, изготовленными компанией Deuste Steininger GmbH, а на TOR-станции и БЭКе — произведенными в Национальном институте исследований окружающей среды (NIES, Япония). Калибровки газоанализаторов NO, NO₂ и SO₂ осуществлялись ежедневно с помощью капсул микропотока, изготовленных во ВНИИМ им. Д.И. Менделеева, методом введения генерируемого ими потока примеси в очищенный воздух. Газоанализаторы озона ОП-ТЭК 3.02-П и Model 49 калибровались с использованием генератора озона GC-024 (ЗАО «ОПТЭК») один раз в месяц.

Еще в XX в. ВМО установила однозначные требования к неопределенностям измерения многих гидрометеорологических параметров. Эти требова-

ния основаны на многолетних исследованиях их пространственно-временной изменчивости, обобщенных в [23], действуют до сих пор и приведены в [24]. К неопределенностям измерения газовых компонентов воздуха таких однозначных требований не имеется, за исключением рекомендаций для мониторинга парниковых газов [25]. Как следует из данных табл. 2, большинство анализируемых газовых компонентов измерялись с неопределенностями, близкими к рекомендациям ВМО. На двух постах неопределенности концентраций CO и O₃ значительно превышают рекомендованные значения.

Важно также остановиться на особенностях исследования разности анализируемых атмосферных параметров, отмеченных в [23]. Поскольку при нахождении различий в двух рядах, имеющих периодическую изменчивость, характерную для атмосферы, их разности при нормальном распределении будут иметь разные знаки на соответствующих отрезках времени, при расчете среднего значения разность концентраций одного газа будет стремиться к нулю. Поэтому при анализе мезомасштабных разностей сопоставление должно проводиться с абсолютными значениями их средних величин в соответствующий период. Поясним это на примере рис. 2.

Из рис. 2, а видно, что в течение суток содержание SO₂ в воздухе обсерватории «Фоновая» изменялось противоположно по отношению к TOR-станции и БЭКу. Соответствующие разности концентраций, приведенные на рис. 2, б, имеют совершенно разный ход. Так, разность TOR – БЭК в течение

Таблица 1

Приборы, используемые на постах комплексного мониторинга газового состава воздуха

Измеряемый газ	TOR	БЭК	«Фоновая»
CO ₂	LGR FGGA Model 907-0010	LI-COR LI-820	Picarro G2301-m
CH ₄	LGR FGGA Model 907-0010	Figaro TGS-2611	Picarro G2301-m
O ₃	ОПТЭК 3.02-П	ОПТЭК 3.02-П	Thermo Model 49
NO/NO ₂	Teledyne API 200E	Teledyne API 200E	Model 42i-TL
CO	ОПТЭК К-100	ОПТЭК К-100	ОПТЭК К-100
SO ₂	Teledyne API 100E	ME 9850B	Model 43i-TLE

Таблица 2

Технические характеристики приборов

Прибор	Газ	Диапазон измерения концентрации	Неопределенность
LGR FGGA Model 907-0010	CO ₂ , млн ⁻¹	20...10000	± 0,2 млн ⁻¹
LGR FGGA Model 907-0010	CH ₄ , млн ⁻¹	0,005...50	± 0,001 млн ⁻¹
Picarro G2301-m	CO ₂ , млн ⁻¹	0...1000	< 0,2 млн ⁻¹
Picarro G2301-m	CH ₄ , млн ⁻¹	0...20	< 0,0015 млн ⁻¹
LI-COR LI-820	CO ₂ , млн ⁻¹	0...1000	< 0,2* млн ⁻¹
Figaro TGS-2611	CH ₄ , млн ⁻¹	1...10	< 0,007* млн ⁻¹
ОПТЭК 3.02-П	O ₃ , мкг/м ³	0...500	± 20%
Thermo Model 49	O ₃ , млрд ⁻¹	0...1000	± 1 млрд ⁻¹
Teledyne API 200E	NO/NO ₂ , млн ⁻¹	0...20	± 0,5%
Model 42i-TL	NO/NO ₂ , мкг/м ³	0...10/500	± 1%
ОПТЭК К-100	CO, мкг/м ³	0...50	± 20%
Teledyne API 100E	SO ₂ , млн ⁻¹	0...20	± 0,5%
ME 9850B	SO ₂ , млн ⁻¹	0...20	± 1%
Model 43i-TLE	SO ₂ , мкг/м ³	0...20/2000	± 1%

* При калибровке поверочными газовыми смесями.

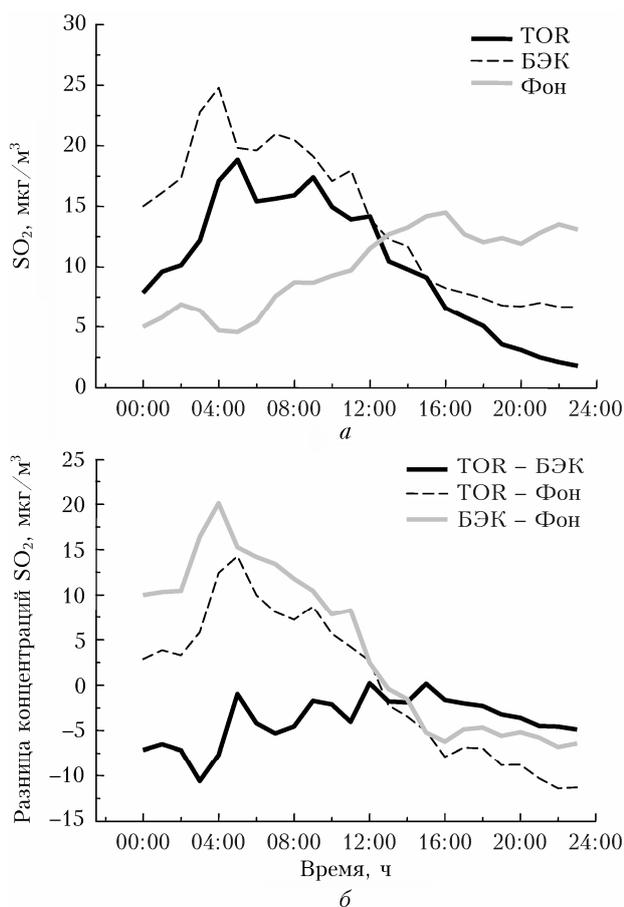


Рис. 2. Концентрации SO_2 (а) и их разности (б) на TOR-станции, БЭК и обсерватории «Фоновая» (Фон) 7.01.2013 г.

суток отрицательная, а TOR – Фон и БЭК – Фон в первой половине положительные, а затем отрицательные. Это приводит к значительным различиям в оценке среднесуточных разностей и среднеквадратического отклонения (табл. 3).

Данные табл. 3 показывают, что средние разности концентраций между станциями, рассчитан-

Таблица 3

Среднесуточные значения \pm СКО разности концентраций диоксида серы на трех станциях с учетом и без учета знака

Расчет	TOR – БЭК	TOR – Фон	БЭК – Фон
С учетом знака	$-3,84 \pm 2,65$	$0,25 \pm 8,06$	$4,09 \pm 9,04$
Без учета знака	$3,87 \pm 2,60$	$7,17 \pm 3,37$	$8,49 \pm 4,90$

ные с учетом знака, занижены в разы (TOR – БЭК и БЭК – Фон) и даже десятки (TOR – Фон) раз. Неучет знака снижает и значение СКО.

В рядах данных многолетнего мониторинга состава воздуха могут возникать разрывы из-за отключения электричества, выхода из строя оборудования, его снятия в ремонтных и калибровочных целях. Если в какой-то период отсутствовало более 20% данных, то он исключался из обработки.

2. Результаты и обсуждение

2.1. Многолетние различия

В табл. 4 представлены средние за весь рассматриваемый период (2013–2017 гг.) разности концентраций между тремя постами, а также максимальные и минимальные разности для отдельных часовых отсчетов для всего анализируемого временного отрезка. Плюс означает, что концентрация выше на первом посту, минус – на втором.

Видно, что средние многолетние разности концентраций значительно больше, чем неопределенности разовых измерений, приведенные в табл. 2. В зависимости от расположения пунктов измерений они могут различаться по некоторым компонентам до трех раз. Очевидно, что это является отражением действия местных факторов: свойств подстилающей поверхности и особенностей находящейся на ней растительности, локальной циркуляции воздуха, наличия источников и стоков отдельных газов или их предшественников и т.п. Это говорит

Таблица 4

Средние многолетние (2013–2017 гг.) разности концентраций газов на TOR-станции, обсерватории «Фоновая» и БЭК

Газ	TOR – Фон		БЭК – Фон		TOR – БЭК	
	Среднее \pm СКО	Диапазон	Среднее \pm СКО	Диапазон	Среднее \pm СКО	Диапазон
CO , $\text{мкг}/\text{м}^3$	195 ± 146	-2658 +2457	116 ± 135	-1887 +1670	155 ± 134	-1819 +2394
CO_2 , млн^{-1}	$8,3 \pm 9,2$	-137 +217	$5,5 \pm 7,5$	-155 +165	$3,3 \pm 3,0$	-164 +136
NO , $\text{мкг}/\text{м}^3$	$0,8 \pm 0,9$	-21 +23	$0,7 \pm 1,1$	-20 +35	$0,4 \pm 1,0$	-29 +21
NO_2 , $\text{мкг}/\text{м}^3$	$7,4 \pm 6,5$	-109 +96	$4,6 \pm 6,0$	-117 +100	$15,5 \pm 7,6$	-83 +90
O_3 , $\text{мкг}/\text{м}^3$	$13,4 \pm 10,7$	-116 +116	$8,1 \pm 7,0$	-95 +88	$14,3 \pm 10,6$	-94 +117
SO_2 , $\text{мкг}/\text{м}^3$	$6,9 \pm 3,5$	-97 +63	$2,3 \pm 2,4$	-92 +32	$5,7 \pm 2,8$	-40 +84

о том, что имеются реальные мезомасштабные различия в составе воздуха в исследуемом регионе. Поскольку для оценки использовались ежечасные данные за пятилетний период (> 43000 значений), то СКО оказываются достаточно большими, соизмеримыми со средними. Это характерно и для других атмосферных параметров [23, 24]. Максимальные и минимальные отклонения концентраций от средних почти симметричны, что свидетельствует об отсутствии постоянной разности между измерительными пунктами. Величина разностей на порядок и даже больше превышает средние разности концентраций. Однако при этом надо учесть, что из массива не удалялись ситуации с прохождением атмосферных фронтов, когда скачкообразно и значительно изменялся вклад в концентрацию воздуха, прошедшего через город, вызывающего рост содержания примесей [26], пожары и др.

Приведенные в табл. 4 средние разности концентраций не противоречат имеющимся в литературе оценкам. По данным [27], где сравнивалось содержание CO₂ на четырех фоновых станциях в Китае, среднегодовая разность между ними в 2011 г. достигала 13 млн⁻¹. Разность содержания CO₂ на пяти финских станциях в зимнее время составляла в среднем 5–10 млн⁻¹ [28]. Для территории Западной Сибири среднегодовая разность в 2016 г. по шести постам была равной 11 млн⁻¹ [29]. В работе [30] было выявлено, что на расстоянии 50 км разности концентраций составляли для NO – 157 мкг/м³, NO₂ – 43 мкг/м³, SO₂ – 11 мкг/м³ зимой и NO – 47 мкг/м³, NO₂ – 31 мкг/м³ и SO₂ – 12 мкг/м³ летом. Результаты исследования [31] показывают, что различия в концентрациях озона могут достигать 50 мкг/м³ на расстоянии 50 км, а соотношение их среднемесячных значений может изменяться от двух до четырех раз.

Приведенные в табл. 4 разности концентраций, так же как и в процитированных работах, рассчитаны без учета расстояний между пунктами TOR и Фон (56 км), БЭК и Фон (60 км), TOR и БЭК (4 км). Это затрудняет их сопоставимость. Поэтому в табл. 5 эти данные приведены к единому расстоянию. Напомним, что, согласно [15], мезомасштаб подразделяется на три категории: мезо-α (200–2000 км), мезо-β (20–200 км) и мезо-γ (2–20 км). Следовательно, первые две разности (TOR – Фон и TOR – БЭК) относятся к мезомасштабу β, а третья – к мезомасштабу γ.

Таблица 5

Средние многолетние градиенты концентраций газов (С/км) на TOR-станции, обсерватории «Фоновая» и БЭКе

Газ	TOR – Фон	БЭК – Фон	TOR – БЭК
CO, мкг/м ³	3,48	1,93	38,75
CO ₂ , млн ⁻¹	0,15	0,09	0,83
NO, мкг/м ³	0,014	0,012	0,100
NO ₂ , мкг/м ³	0,13	0,08	3,88
O ₃ , мкг/м ³	0,24	0,14	3,58
SO ₂ , мкг/м ³	0,12	0,04	1,43

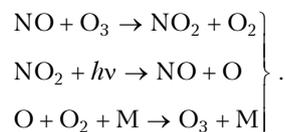
Данные табл. 5 показывают, что градиенты разности концентраций сопоставимы на мезомасштабе β и резко увеличиваются на мезомасштабе γ. Является ли это закономерным, пока сказать затруднительно. В литературе удалось обнаружить только одну публикацию на эту тему [32], в которой получен градиент озона 8–23 млрд⁻¹/км. Но этот результат относится к особым условиям: убыванию концентрации в системе бриза при удалении от берега.

2.2. Годовой ход

Данные об временной изменчивости разности концентраций между постами наблюдений в районе Томска приведены на рис. 3. Из рис. 3, а видно, что разности концентраций оксида углерода имеют два максимума в годовом ходе – зимой и летом, а также два минимума – весной и осенью. Это значительно отличается от годовой динамики концентрации CO в приземном слое воздуха. В работах [33–35] показано, что наибольшее его содержание наблюдается в весенний период, а наименьшее – в летний. Пока сложно объяснить такое поведение разностей концентраций на мезомасштабном уровне. Можно только отметить, что различия в концентрациях и амплитуда отклонений здесь не зависят от расстояния. Возможно, на TOR-станции сказывается действие антропогенных источников, так как она находится в пригородном районе. На этот вопрос мы надеемся получить ответ в следующем исследовании.

Сильнее всего содержание диоксида углерода в регионе варьирует летом, что обусловлено интенсивным поглощением CO₂ растительностью в дневное время при фотосинтезе и значительным ростом выбросов при дыхании в ночной период [29]. Это отражается и в разностях концентраций, показанных на рис. 3, б. Видно, что максимальные разности наблюдаются в летнее время. Разность амплитуд можно объяснить различием видового состава растений вокруг пунктов наблюдений.

Прежде чем перейти к анализу разностей концентраций следующих газовых компонентов, напомним, что в чистой тропосфере, как правило, устанавливается фотохимическое равновесие NO – O₃ – NO₂ [36–38]:



Выполненное нами ранее исследование [39] выявило, что в регионе наблюдается низкое содержание оксидов азота. Это обусловлено очень малыми потоками N₂O из почвы в атмосферу [40]. В подобных случаях небольшое количество поступившего N₂O, переходящее в атмосферу в NO, в ходе фотохимических процессов быстро переводится в NO₂. В результате в фоновых районах фиксируются очень низкие значения NO, поскольку основная

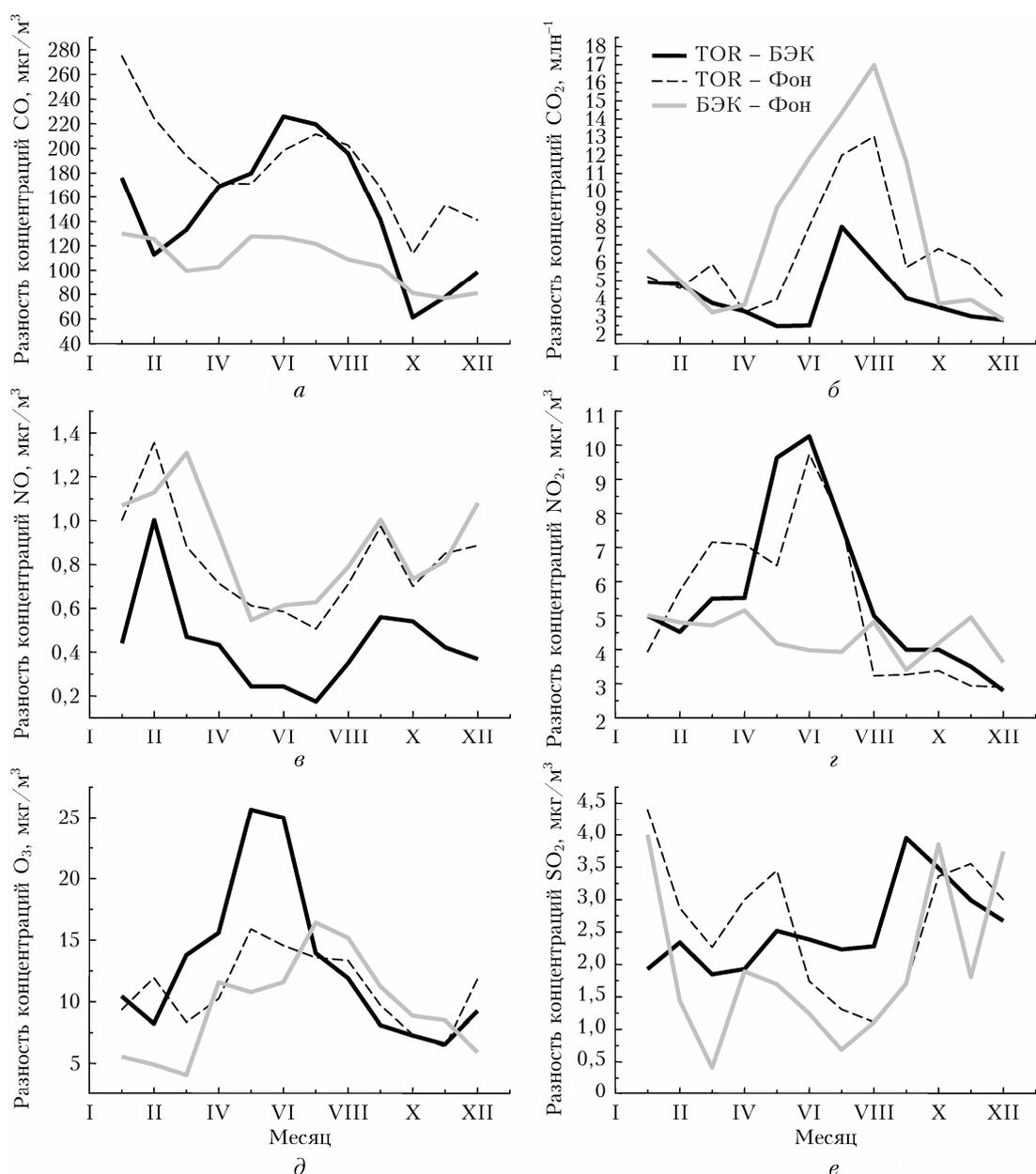


Рис. 3. Средний многолетний годовой ход разности концентраций CO (а); CO₂ (б); NO (в); NO₂ (г); O₃ (д); SO₂ (е) на TOR-станции, БАКе и обсерватории «Фоновая»

его часть переходит в NO₂, а количество озона определяется выделением углеводородов в основном природного происхождения. В годовом ходе концентрация NO имеет максимум в холодное время года, а NO₂ и O₃ – весной/летом, когда наиболее интенсивно проходят фотохимические процессы.

Все вышеизложенное находит отражение на рис. 3, в–д. Так, для NO (рис. 3, в) характерны небольшие разности в теплый период и их увеличение в холодный. Максимальные различия в концентрациях NO₂ (рис. 3, г) и O₃ (рис. 3, д) на станциях наблюдаются весной или летом.

Низкие концентрации SO₂ в регионе обуславливают небольшие разности между станциями (рис. 3, е). Для этого газа, так же как и для NO,

характерны уменьшение разностей в теплый период и увеличение в холодный, хотя однозначного годового хода не просматривается.

Несколько отмеченные выше тенденции устойчивы во времени, можно проследить, на примере разности БАК – Фон, показанной на рис. 4. Видно, что имеются вариации разностей как внутри года, так и между годами, но общая тенденция сохраняется.

Необходимо также остановиться на вопросе о том, как изменяются разности концентраций в течение года (рис. 5). Очевидно, что увеличение среднемесячных значений разности концентраций углекислого газа и озона обусловлено ростом размаха отклонений от среднего.

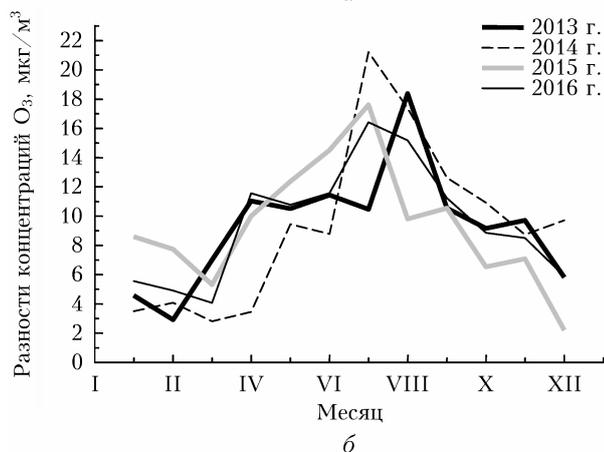
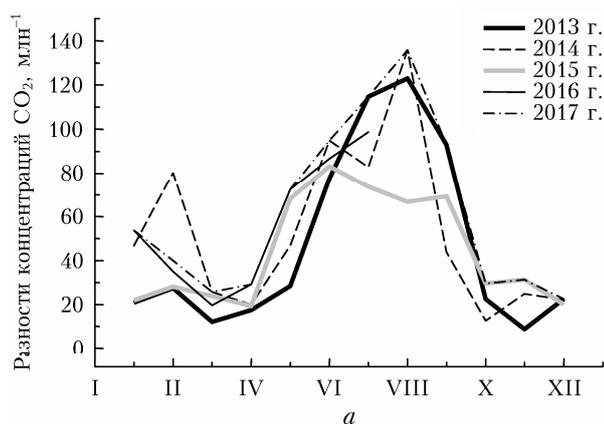


Рис. 4. Среднемесячные разности концентраций CO_2 (а) и O_3 (б) на пунктах БЭК и «Фоновая»

Ввиду того, что подобных исследований для газового состава ранее не выполнялось, провести сопоставление с другими результатами пока не представляется возможным.

2.3. Суточный ход

В течение суток качественно изменяется характер атмосферных процессов, определяющих состав воздуха. Так, в дневное время растительность в результате фотосинтеза поглощает углекислый газ. Ночью при отсутствии освещения она переходит в режим дыхания и возвращает его обратно в атмосферу. Днем запускаются фотохимические процессы, в ходе которых не только образуется озон, но и изменяется баланс концентрации оксидов азота. Нагрев почвы в светлое время суток и ее выхолаживание в ночное время заметно влияют на обмен газовыми компонентами с атмосферой. Поэтому интересно, как они влияют на разность концентраций, которые должны отражать местные особенности. Такие данные представлены на рис. 6.

Из рис. 6, а следует, что разности концентраций монооксида углерода на всех станциях ведут себя не одинаково. За исключением разности концентраций на станции TOR и обсерватории «Фоновая»

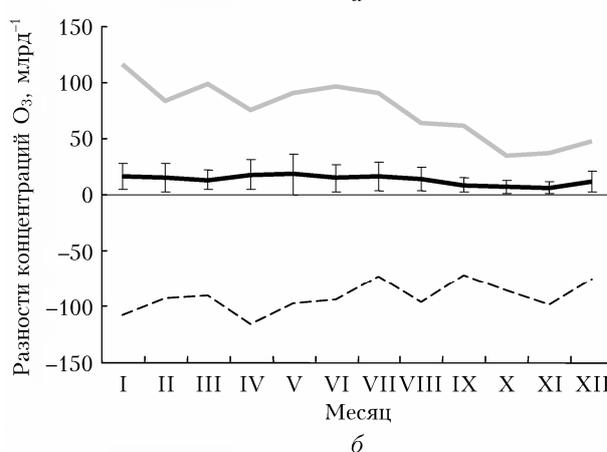
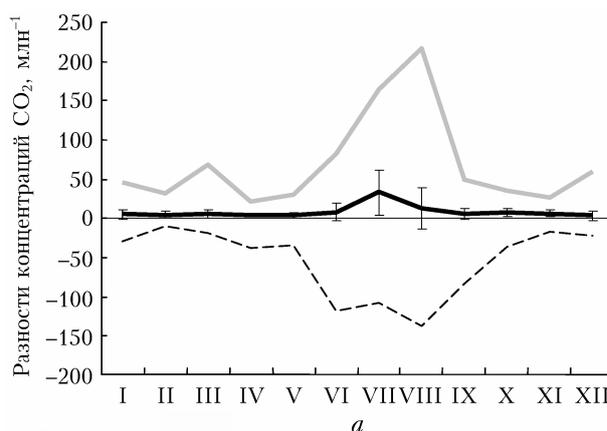


Рис. 5. Среднемесячные разности, СКО, положительные и отрицательные отклонения CO_2 (а) и O_3 (б) на TOR-станции и обсерватории «Фоновая»

ва», можно выделить их общую тенденцию уменьшения в светлое время суток и уменьшение в темное. Следует также отметить значительную разницу между TOR-станцией и БЭКом в ночное время, что, возможно, обусловлено влиянием городских выбросов.

Для диоксида углерода (рис. 6, б) характерно увеличение разностей концентраций на всех станциях в ночное время и уменьшение в дневное. Особенно сильно это проявляется для близко расположенных TOR-станции и БЭКа. Такое поведение разности концентраций можно объяснить только видовым различием растений, окружающих пункты наблюдений, некоторые из которых в процессе дыхания выделяют большее количество CO_2 .

Разности концентраций оксида азота на всех трех станциях в суточном ходе ведут себя одинаково (рис. 6, в). Утренний максимум концентрации N_2O обусловлен переходом NO в NO_2 в утренние часы в связи с началом фотохимического образования озона [41]. Такой ход разности концентраций NO происходит из-за низкой скорости поступления его предшественника N_2O в регионе [40].

Различие в суточном ходе диоксида азота (рис. 6, г) отражает, с одной стороны, вышеупомянутый утренний переход NO в NO_2 , который

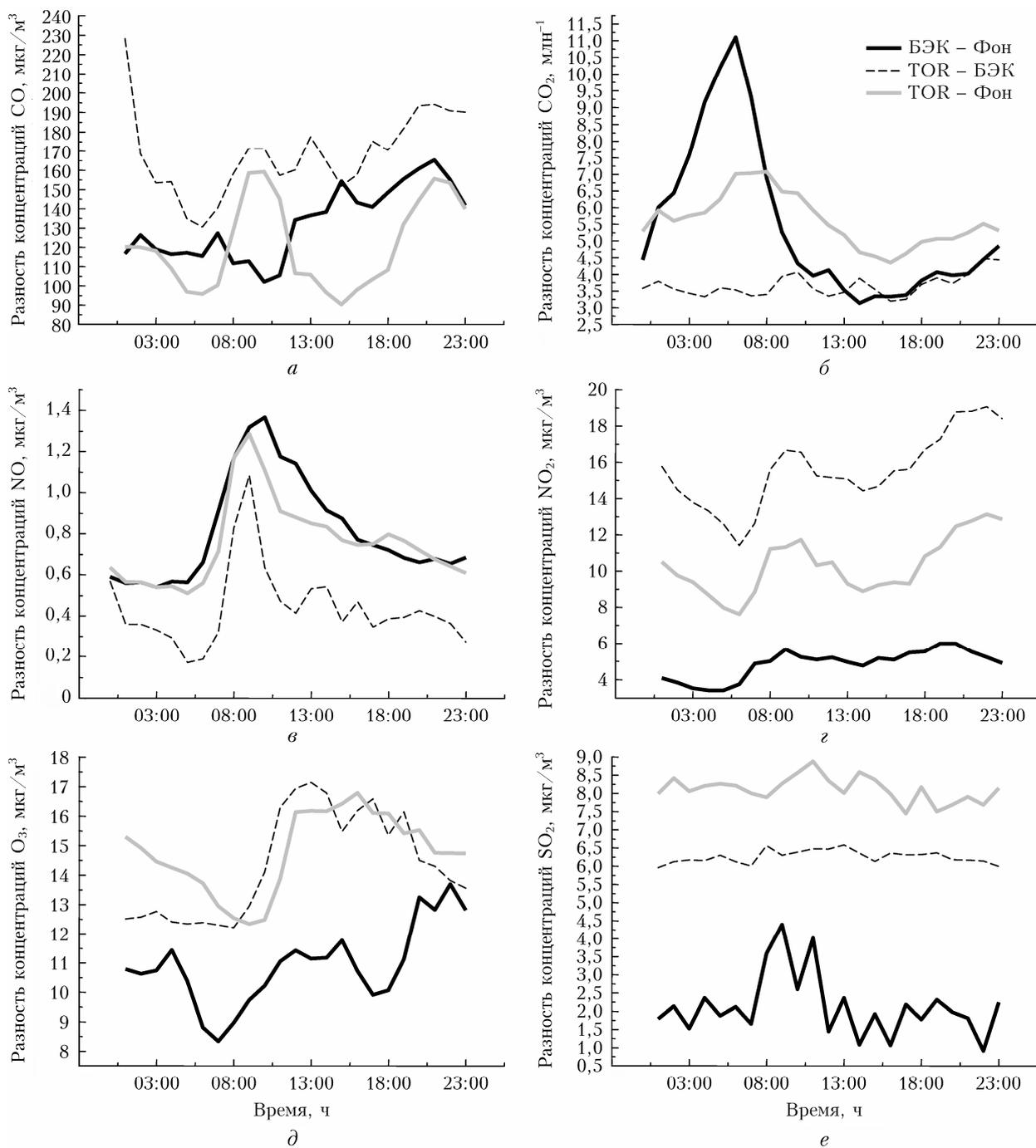


Рис. 6. Многолетний среднесуточный ход разности концентраций CO (а); CO₂ (б); NO (в); NO₂ (г); O₃ (д); SO₂ (е) на TOR-станции, БАКе и обсерватории «Фоновая»

проявляется в виде максимума. Второй максимум, в вечернее время, обусловлен стоком озона из атмосферы [41]. Устойчивое различие между станциями в течение суток, скорее всего, связано с разной мощностью источников газов-предшественников озона, в механизме генерации которого оксиды азота выполняют роль «переключателя» цепей [42, 43].

Суточный ход разностей концентраций озона (рис. 6, д) показывает его максимальное содержание

в каждом пункте в дневное и ночное время [41]. Различия в величине, очевидно, обусловлены количеством газов-предшественников органического происхождения, выделяемых в каждом из пунктов разной по видовому составу растительностью.

Разности концентраций SO₂ (рис. 6, е) во всех пунктах имеют нейтральный суточный ход. Правда, разность TOR – БАК имеет небольшой утренний

максимум, природу которого еще предстоит выяснить. Также наблюдается устойчивое в течение суток различие между тремя кривыми, что, возможно, связано с разным характером обмена SO_2 между почвой и атмосферой.

На большинстве станций отмеченные выше различия сохраняются в течение всего года. Покажем это на рис. 7. Из рис. 7, а видно, что в течение всего года суточный ход NO имеет такой же вид, как и средний многолетний (рис. 6, в). Аналогичным образом ведут себя разности концентраций SO_2 (рис. 7, б). Их суточные вариации совпадают по характеру с данными рис. 6, е. На рис. 7 хорошо прослеживается изменение разности концентраций, ранее отмеченное в разделе 2.2.

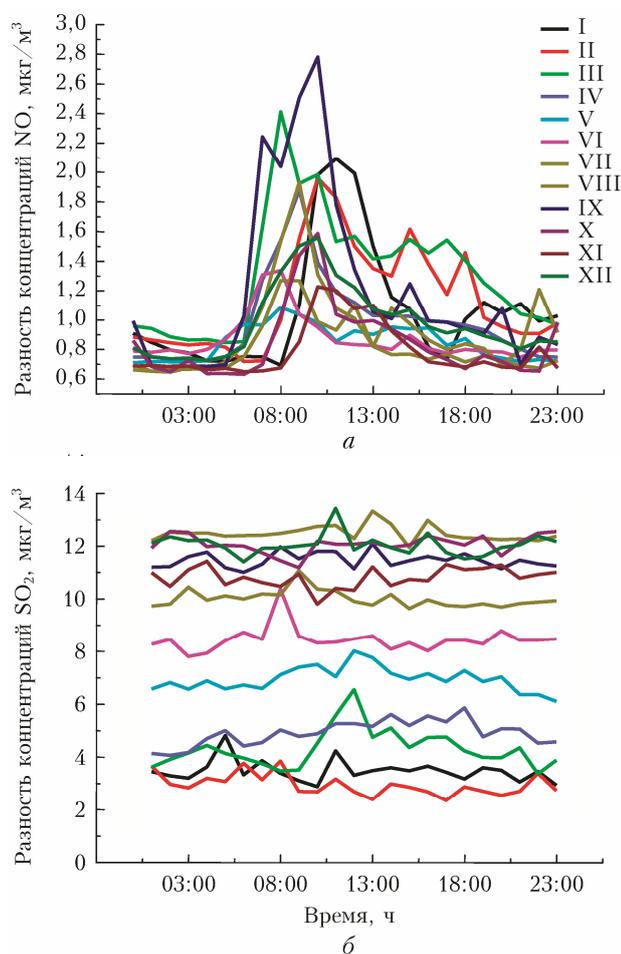


Рис. 7. Многолетний среднесуточный ход разности концентраций NO (а) и SO_2 (б) на пунктах БЭК и «Фоновая» в разные месяцы (см. цветной рисунок на сайте <http://iao.ru/ru/content/vol.38-2025/iss.7>)

Подобным же образом изменяется суточный ход разности концентраций и в межгодовом разрезе. Из рис. 8 видно, что по внешнему виду характер изменения разностей концентраций в отдельные годы похож, отличаются амплитуды вариаций.

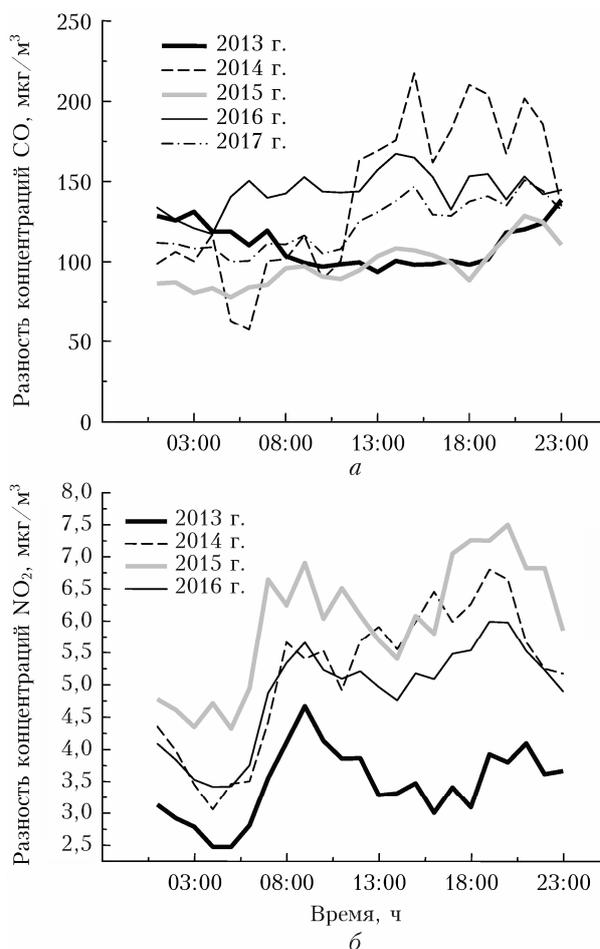


Рис. 8. Среднесуточный ход разности концентраций CO (а) и NO_2 (б) на пунктах БЭК и «Фоновая» для разных лет

Заключение

Результаты исследования показывают, что имеются реальные мезомасштабные различия в составе воздуха в исследуемом регионе, что отражает действие местных факторов: свойств подстилающей поверхности и особенностей растительности, локальной циркуляции воздуха, наличия источников и стоков отдельных газов или их предшественников и т.п.

Средние многолетние разности концентраций значительно больше, чем неопределенности разовых измерений. В зависимости от расположения пунктов измерений они могут различаться по некоторым газовым компонентам до трех раз. Оценка градиентов разностей концентраций показывает, что они сопоставимы на мезомасштабе β и резко увеличиваются на мезомасштабе γ .

В годовом ходе разности концентраций CO_2 , NO_2 и O_3 максимальны в теплый период года, NO и SO_2 — в холодный. Динамика концентрации оксида углерода отражает местные особенности действия источников и стоков газовых компонентов. Выявленные закономерности оказываются устойчивыми в многолетнем разрезе.

Для разности концентраций монооксида углерода в суточном ходе на всех станциях можно выделить общую тенденцию их увеличения в светлое время суток и уменьшение в темное. У CO₂ характерно увеличение разности концентраций на всех станциях в ночное время и уменьшение в дневное, что можно объяснить только видовым различием растений, окружающих пункты наблюдений, некоторые из которых в процессе дыхания выделяют большее количество CO₂. Разности концентраций оксида азота на всех трех станциях в течение суток ведут себя одинаково: зафиксирован утренний максимум, который обусловлен переходом NO в NO₂ в утренние часы в связи с началом фотохимического образования озона. Такой ход разности концентраций NO обусловлен низкой скоростью поступления его предшественника N₂O в регионе. Различия в величине O₃, очевидно, обусловлены количеством газов-предшественников органического происхождения, выделяемых отличающейся по видовому составу растительностью в каждом из пунктов. Разности концентраций диоксида серы во всех пунктах имеют нейтральный суточный ход. На большинстве станций отмеченные выше различия сохраняются в течение всего года. Подобным же образом изменяется суточный ход разностей концентраций и в межгодовом разрезе.

Финансирование. Работа выполнена в рамках госзадания ИОА СО РАН.

Список литературы

1. *Summary for policymakers* // Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II, and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Switzerland: Geneva, 2023. P. 1–34. DOI: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.
2. *Ramonet M., Ciais Ph., Sha M.K., Steinbacher M., Sweeney C.* CO₂ in the atmosphere: Growth and trends since 1850 // Oxford Research Encyclopedias of Climate Science. 2023. P. 1–44. DOI: 10.1093/acrefore/9780190228620.013.863.
3. *Киселев А.А., Кароль И.Л.* С метаном по жизни. СПб.: Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова, 2019. 73 с.
4. *Thompson R.L., Lassaletta L., Patra P.K., Wilson C., Wells K.C., Gressent A., Koffi E.N., Chipperfield M.P., Winiewarter W., Davidson E.A., Tian H., Canadell J.G.* Acceleration of global N₂O emissions seen from two decades of atmospheric inversion // Nat. Clim. Change. 2019. V. 9, N 12. P. 993–998. DOI: 10.1038/s41558-019-0613-7.
5. *Desai A.R., Paleri S., Mineau J., Kadum H., Wanner L., Mauder M., Butterworth B.J., Durden D.J., Metzger S.* Scaling land-atmosphere interactions: Special or fundamental? // J. Geophys. Res. Biogeosci. 2022. V. 127, N 9. P. e2022JG007097. DOI: 10.1029/2022JG007097.
6. *Deak B., Botta-Dukat Z., Radai Z., Kovacs B., Apostolova I., Batori Z., Kelemen A., Lukacs K., Kiss R., Palpurina S., Sopotlieva D., Valko O.* Meso-scale environmental heterogeneity drives plant trait distributions in fragmented dry grasslands // Sci. Total Environ. 2024. V. 947. P. 174355. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.174355.
7. *Lembrechts J.J. Nijs I.* Microclimate shifts in a dynamic world // Science. 2020. V. 368, N 6492. P. 711–712.
8. *Zellweger F., De Frenne P., Lenoir J., Vangansbeke P., Verheyen K., Bernhardt-Römermann M., Baeten L., Hédl R., Berki I., Brunet J., Van Calster H., Chudomelová M., Decocq G., Dirnböck T., Durak T., Heinken T., Jaroszewicz B., Kopecký M., Máliš F., Macek M., Malicki M., Naaf T., Nagel T.A., Ortman-Ajkai A., Petrik P., Pielech R., Reczynska K., Schmidt W., Standovář T., Swierkosz K., Teleki B., Vild O., Wulf M., Coomes D.* Forest microclimate dynamics drive plant responses to warming // Science. 2020. V. 368, N 6492. P. 772–775. DOI: 10.1126/science.aba6880.
9. *Алферов А.М., Блинов В.Г., Гитарский М.Л., Грабар В.А., Замолодчиков Д.Г., Зинченко А.В., Иванова Н.П., Ивахов В.М., Карабаню Р.Т., Карелин Д.В., Калюжный И.Л., Кашин Ф.В., Коношников Д.Е., Коротков В.Н., Кровотынцев В.А., Лавров С.А., Марунич А.С., Парамонова Н.Н., Романовская А.А., Трунов А.А., Шилкин А.В. Юзбеков А.К.* Мониторинг потоков парниковых газов в природных экосистемах. Саратов: Амрит, 2017. 279 с.
10. *Shi D., Jiang Y., Li W., Wen Y., Wu F., Zhao S.* Spatial-temporal heterogeneity of spring phenology in boreal forests as estimated by satellite solar-induced chlorophyll fluorescence and vegetation index // Agric. Forest Meteorol. 2024. V. 346. P. 109888. DOI: 10.3390/ijerph182413031.
11. *Ольчев А.В., Мухартова Ю.В., Левашова Н.Т., Волкова Е.М., Рыжова М.С., Мангура П.А.* Влияние пространственной неоднородности растительного покрова и рельефа на вертикальные потоки CO₂ в приземном слое атмосферы // Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана. 2017. Т. 53, № 5. С. 612–623.
12. *Cao Y., Yue X., Liao H., Wang X., Lei Y., Zhou H.* Impacts of land cover changes on summer surface ozone in China during 2000–2019 // Sci. Total Environ. 2024. V. 948. P. 174821. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.174821.
13. *Смагин А.В., Карелин Д.В.* О влиянии ветра на газообмен почвы и атмосферы // Почвоведение. 2021, № 3. С. 327–337. DOI: 10.31857/S0032180X21030138.
14. *Acevedo O.C., Osvaldo Moraes O.L.L., Degrazia G.A., Fitzjarrald D.R., Manzi A.O., Campos J.G.* Is friction velocity the most appropriate scale for correcting nocturnal carbon dioxide fluxes? // Agric. Forest Meteorol. 2009. V. 149, N 1. P. 1–10. DOI: 10.1016/j.agrformet.2008.06.014.
15. *Степаненко С.Н.* Мезометеорология: учеб. пособие. Одесса: ОГМИ, 2001. 223 с.
16. *Обзор состояния и загрязнения окружающей среды в Российской Федерации за 2019 год.* Росгидромет, 2020. 217 с.
17. *Burrows J.P., Martin R.* Satellite observations of tropospheric trace gases and aerosols. Introduction // IGAC Newsletter. 2007. N 35. P. 2–7. DOI: 10.1007/978-94-011-4353-0_27.

18. Tollefson J. Carbon-sensing satellite system faces high hurdles // *Nature*. 2016. V. 533, N 7604. P. 446–447. DOI: 10.1038/533446a.
19. Popkin G. Commercial space sensors go high-tech // *Nature*. 2017. V. 545, N 7655. P. 397–398.
20. Гибадуллин Р.Р., Мухартова Ю.В., Кочкина М.В., Сатосина Е.М., Степаненко В.М., Керимов И.А., Гулев С.К., Ольчев А.В. Моделирование пространственной изменчивости полей ветра и потоков CO₂ и CH₄ над неоднородной подстилающей поверхностью // *Метеорол. и гидрол.* 2024. № 9. С. 93–100.
21. Berchet A., Pison I., Chevallier F., Paris J.-D., Bousquet P., Bonne J.-L., Arshinov M.Yu., Belan B.D., Cressot C., Davydov D.K., Dlugokencky E.J., Fofonov A.V., Galanin A., Lavrič J., Machida T., Parker R., Sasakawa M., Spahn R., Stocker B.D., Winderlich J. Natural and anthropogenic methane fluxes in Eurasia: A meso-scale quantification by generalized atmospheric inversion // *Biogeosci.* 2015. V. 12, N 18. P. 5393–5414. DOI: 10.5194/bg-12-5393-2015.
22. Антохина О.Ю., Антохин П.Н., Аршинова В.Г., Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Белан С.Б., Давыдов Д.К., Дудорова Н.В., Ивлев Г.А., Козлов А.В., Рассказчикова Т.М., Савкин Д.Е., Симоненков Д.В., Складнева Т.К., Толмачев Г.Н., Фофанов А.В. Исследование состава воздуха в различных воздушных массах // *Оптика атмосф. и океана*. 2018. Т. 31, № 9. С. 752–759. DOI: 10.15372/AOO20180909; Antokhina O.Yu., Antokhin P.N., Arshinova V.G., Arshinov M.Yu., Belan B.D., Belan S.B., Davydov D.K., Dudorova N.V., Ilev G.A., Kozlov A.V., Rasskazchikova T.M., Savkin D.E., Simonenkov D.V., Sklyadneva T.K., Tolmachev G.N., Fofonov A.V. Study of air composition in different air masses // *Atmos. Ocean. Opt.* 2019. V. 32, N 1. P. 72–79.
23. Решетов В.Д. Изменчивость метеорологических элементов в атмосфере. Л.: Гидрометеиздат, 1973. 215 с.
24. О составе, точности и пространственно-временном разрешении информации необходимой для гидрометеорологического обеспечения народного хозяйства и службы гидрометеорологических прогнозов / под ред. М.А. Петросяни, В.Д. Решетова. Л.: Гидрометеиздат, 1975. 220 с.
25. WMO GAW (2018). 19th WMO/IAEA Meeting of Experts on Carbon Dioxide, Other Greenhouse Gases And Related Tracers Measurement Techniques. GAW Report № 242. WMO, 2018. 150 p.
26. Антонов К.Л., Гуляев Е.А., Маркелов Ю.И., Поддубный В.А. Закономерности изменения концентраций CO₂ и CH₄ по результатам измерений в приземном слое атмосферы городской и загородной территорий в 2021–2022 годах // *Метеорол. и гидрол.* 2024. № 5. С. 111–124.
27. Fang S.X., Zhou L.X., Tans P.P., Ciais P., Steinbacher M., Xu L., Luan T. In situ measurement of atmospheric CO₂ at the four WMO/GAW stations in China // *Atmos. Chem. Phys.* 2014. V. 14, N 5. P. 2541–2554. DOI: 10.5194/acpd-13-27287-2013.
28. Kilkki J., Aalto T., Hatakka J., Portin H., Laurila T. Atmospheric CO₂ observations at Finnish urban and rural sites // *Boreal Environ. Res.* 2015. V. 20, N 2. P. 227–242.
29. Belikov D., Arshinov M., Belan B., Davydov D., Fofonov A. Analysis of the diurnal, weekly, and seasonal cycles and annual trends in atmospheric CO₂ and CH₄ at tower network in Siberia during 2005–2016 // *Atmosphere*. 2019. V. 10, N 11. P. 698. DOI: 10/3390/atmos10110689.
30. Оболкин В.А., Шаманский Ю.В., Ходжер Т.В., Фалиц А.В. Мезомасштабные процессы переноса атмосферных загрязнений в районе Южного Байкала // *Океанологические исследования*. 2019. Т. 47, № 3. С. 104–113.
31. Stockwell W.R., Fitzgerald R.M., Lu D., Perea R. Differences in the variability of measured and simulated tropospheric ozone mixing ratios over the Paso del Norte Region // *J. Atmos. Chem.* 2013. V. 70, N 1. P. 91–104.
32. Huang Y.Y., Donaldson D.J. Measurement report: Observations of ground-level ozone concentration gradients perpendicular to the Lake Ontario shoreline // *Atmos. Chem. Phys.* 2024. V. 24, N 4. P. 2387–2398.
33. Yurganov L.N., Jaffe D.A., Pullman E., Novelli P.C. Total column and surface densities of atmospheric carbon monoxide in Alaska, 1995 // *J. Geophys. Res.* 1998. V. 103, N D15. P. 19337–19345.
34. Barret B., De Maziere M., Mahieu E. Ground-based FTIR measurements of CO from the Jungfrauoch: Characterization and comparison with in situ surface and MOPITT data // *Atmos. Chem. Phys. Discuss.* 2003. V. 3, N 5. P. 4857–4878. DOI: 10.5194/acp-3-2217-2003.
35. Tarasova O.A., Brennkmeijer C.A.M., Assonov S.S., Elansky N.F., Röckmann T., Sofiev M.A. Atmospheric CO along the Trans-Siberian Railroad and River Ob: Source identification using isotope analysis // *J. Atmos. Chem.* 2007. V. 57, N 2. P. 135–152.
36. Chameidas W.L., Davis D.D., Bradshaw J., Sandholm J., Rodgers M., Baum B., Ridley B., Madronich S., Carrol M.A., Gregory G., Schiff H.I., Hastle D.R., Torres A., Condon E. Observed and model-calculated NO₂/NO ratios in tropospheric air sampled during the NASA GTE/CITE-2 field study // *J. Geophys. Res.* 1990. V. 95, N D7. P. 10235–10247.
37. De Arellano J.V.-G., Duynkerke P.G. Influence of chemistry on the flux-gradient relationships for the NO–O₃–NO₂ system // *Bound.-Lay. Meteorol.* 1992. V. 61, N 4. P. 375–387.
38. Duyzer J.H., Deinum G., Baak J. The interpretation of measurements of surface exchange of nitrogen oxides: Correction for chemical reactions // *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A*. 1995. V. 351, N 1696. P. 231–248.
39. Белан Б.Д., Ковалевский В.К., Плотников А.П., Складнева Т.К. Временная динамика озона и оксидов азота в приземном слое в районе г. Томска // *Оптика атмосф. и океана*. 1998. Т. 11, № 12. С. 1325–1327.
40. Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Давыдов Д.К., Козлов А.В., Фофанов А.В. Эмиссия и поглощение парниковых газов луговой экосистемой южной тайги Западной Сибири: оценка вклада почвенной составляющей по данным наблюдений 2023 г. // *Оптика атмосф. и океана*. 2024. Т. 37, № 9. С. 760–772. DOI: 10.15372/AOO20240906; Arshinov M.Yu., Belan B.D., Davydov D.K., Kozlov A.V., Fofonov A.V. Emission and sink of greenhouse gases in the grassland ecosystem of southern taiga of Western Siberia: Estimates of the

- contribution of soil flux component from observations of 2023 // Atmos. Ocean. Opt. 2024. V. 37, N 6. P. 865–880.
41. Белан Б.Д. Озон в тропосфере. Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2010. 488 с.
42. Семенов Н.Н. Цепные реакции. М.: Наука, 1986. 535 с.
43. Марчук Г.И. Численное моделирование в задачах охраны окружающей среды. М.: ОВМ АН СССР, 1989. 36 с.

M.Yu. Arshinov, B.D. Belan, S.B. Belan, D.K. Davydov, A.V. Kozlov, O.O. Marchenko. **Mesoscale (β and γ) features of the distribution of gas composition of air in the region of Tomsk.**

According to the conclusion of the UN Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), in order to determine the main causes of global warming caused by the increase in greenhouse gas content, an accurate assessment of their emissions and sinks is required, since there is still significant uncertainty in assessing their balance. To clarify this, the present work studies the heterogeneity in the distribution of their flows and sinks at the mesoscale level. Considering that soil plays a significant role in gas exchange processes, which significantly differ in properties on both scales, this approach seems very promising. The work uses hourly measurement data from three posts of integrated air composition monitoring: TOR station, the “Fonovaya” observatory, and the Basic Experimental Complex (BEC). It is shown that the differences in long-term (2013–2017) average concentrations between stations are within the ranges 116–195 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ for CO, 3.3–8.3 ppm for CO₂, 0.4–0.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ for NO, 4.6–15.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ for NO₂, 8.1–14.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ for O₃, and 2.3–6.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ for SO₂. Annual and daily variations in the concentration differences have been revealed for the first time. The results expand our knowledge of the dynamics of greenhouse and oxidizing gases in the atmosphere and can be useful in developing requirements for their measurement accuracy.