



# **5 Мониторинг ОЗОНОВОГО СЛОЯ**

**Мониторинг озонового слоя** – система наблюдений за состоянием озонового слоя, оценки и прогнозирования его изменений. Общее содержание озона (ОСО) в вертикальном столбе атмосферы определяет уровень и спектральный состав приземного биологически активного солнечного ультрафиолетового излучения на поверхности Земли, что является жизненно важным для существования человека и разнообразных форм жизни.

В 2012 г. основной (базовый) *мониторинг ОСО* проводился на Минской озонометрической станции (Минск 27.47E, 53.83N) с помощью ультрафиолетового спектрометра ПИОН-УФ, разработанного в НИИЦ МО БГУ и предназначенного для измерения спектральной плотности энергетической освещенности (СПЭО) в диапазоне 285–450 нм. Определение ОСО по данным СПЭО осуществлялось методом Стамнеса. Дополнительно мониторинг ОСО осуществлялся фильтровым озонометром М-124М, реализующим методики измерений «по прямому солнцу» и «из зенита неба», а также узкополосным фильтровым фотометром ПИОН-Ф, позволяющим проводить измерения ОСО по отношению интегральных освещенностей земной поверхности в двух спектральных интервалах. ПИОН-Ф предназначен также для ведения мониторинга биологически активного ультрафиолетового излучения и измерения значений ультрафиолетового индекса (УФИ).

Для сравнительного анализа состояния озоносферы использовались также данные системы орбитального базирования ОМІ.

Результаты мониторинга ОСО методом СПЭО спектрометром ПИОН-УФ представлены на рисунке 5.1.

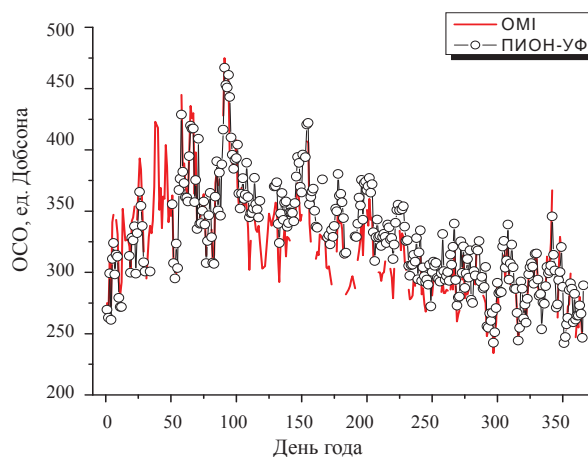


Рисунок 5.1 – Сопоставление результатов спутниковых (ОМІ) и наземных (ПИОН-УФ) измерений ОСО в атмосфере над г. Минск, 2012

Многолетний опыт проведения мониторинга ОСО на Минской озонометрической станции показывает, что реализация метода Стамнеса на базе ультрафиолетового спектрометра ПИОН-УФ, даже в «классическом варианте» – без специального учета влияния атмосферных параметров (например, наличия облачности, аэрозолей и т.п.), позволяет обеспечить точность измерения среднедневных значений ОСО в пределах  $\pm 3 \div 4\%$  (достаточно для ряда приложений, в частности, для разработки климатических моделей и прогноза УФ-индекса).

Согласно оценке ВМО (Всемирная Метеорологическая Организация), снижение содержания озона в атмосфере в глобальных масштабах значительно замедлилось в середине 90-х годов прошлого столетия и практически остановилось после 2000 г. Численные эксперименты, проведенные с помощью различных моделей глобальной и региональной циркуляции, сходятся на том, что восстановление озонового слоя до уровня 80-х продлится до 2050 г.

На сегодняшний день общее содержание озона в атмосфере на 3,5% и 2,5% ниже уровня 80-х годов для высоких и средних широт, соответственно. В северном полушарии в среднем наблюдается некоторое увеличение содержания озона на высотах 35–40 км и в нижней стратосфере – на 12–15 км. Однако рост концентрации озона в стратосфере обнаружен далеко не во всех регионах, на некоторых станциях данные озонзондов свидетельствуют даже о наличии

небольшого отрицательного тренда стратосферного озона.

При общей положительной динамике содержания озона в стратосфере отмечается, что за период, в течение которого наблюдался отрицательный тренд, стратосфера стала в среднем холоднее, особенно в полярных районах обоих полушарий. Это может повлиять на сроки восстановления озонового слоя, так как низкие температуры в полярной стратосфере могут создавать условия для разрушения молекул озона.

Ежегодно, начиная с 80-х гг. прошлого века, значительные потери озона происходят весной в Южном полушарии над Антарктидой (явление, получившее название Антарктической озоновой дыры). Причиной разрушения озона над Антарктидой считают химические реакции озона и озоноразрушающих веществ на частицах стратосферных полярных облаков, которые формируются при низких температурах в стратосфере. Разрушение озона за счет химических реакций возможны и в области Северного полюса, однако в силу циркуляционных особенностей существующих в Северном полушарии условия для разрушения озона по «антарктическому» сценарию не носят регулярного характера. Такие ситуации возникали в марте 2000 и марте 2007 гг., однако существовали непродолжительное время.

Для Северного полушария более характерно возникновение другого явления – озоновых мини-дыр (отрицательных озоновых аномалий – пространственных областей с дефицитом ОСО), формирование которых обусловлено циркуляционными процессами в верхней тропосфере и стратосфере. Образование таких областей происходит особенно часто в зимне-весенний период, частота их появления испытывает значительные межгодовые вариации.

По данным наблюдений в 2012 г. годовой ход ОСО над территорией республики был близок к многолетнему среднему в отличие от 2011 г., когда отсутствовал характерный весенний максимум. Такой, довольно необычный, годовой ход возможно был обусловлен значительными «химическими» потерями озона в арктической стратосфере весной 2011 г.

В 2012 г. циркуляционные процессы в атмосфере над территорией Беларуси складывались таким образом, что над ней наблюдался небольшой дефицит озона, хотя на других долготах в средних и высоких широтах, напротив, имело место превышение многолетних средних значений (избыток ОСО).

Среднемесячные значения общего содержания озона над территорией республики в течение всего года были на 6% (май, декабрь) – 2% ниже многолетних средних среднемесячных значений. Соответствие наблюдалось только в ноябре (рис. 5.2).

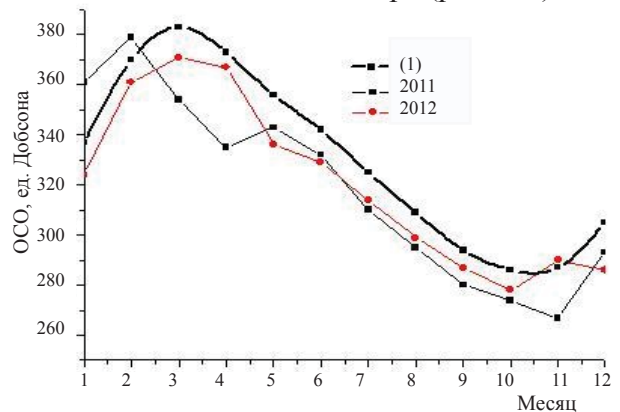


Рисунок 5.2 – Среднемесячные значения общего содержания озона за 2011, 2012 гг., зарегистрированные над территорией Республики Беларусь. (1) – многолетние средние среднемесячные значения ОСО

Годовые максимум и минимум отмечены в обычное время – в марте и в октябре, соответственно. Максимальное значение ОСО составило 475 ЕД (31.03.12, +30%) и было связано с положительной озоновой аномалией, минимальное – 234 ЕД (23.10.12, – 18%) – с отрицательной озоновой аномалией, затронувшей территорию республики. Среднегодовое значение – 321 ЕД (на 7 ЕД меньше многолетних среднегодовых значений).

В 2012 г. территорию Европы затронули 17 глубоких (с дефицитом более 25%) отрицательных аномалий. В отличие от предыдущих лет в 2012 г. большие и глубокие отрицательные аномалии наблюдались не только над Европейским сектором Атлантического океана и Европой, но и над северной частью Азии, включая территорию от Урала до Дальнего Востока. Некоторые европейские отрицательные аномалии затронули территорию нашей страны.

Всего над территорией Республики Беларусь наблюдалось 7 отрицательных

аномалий, вызвавших снижение (до -21%) ОСО в отдельные периоды. Большая часть отрицательных аномалий наблюдалась в зимнее время и ранней весной, но снижение ОСО из-за озоновых «мини-дыр» отмечено также и в мае (рис. 5.3).

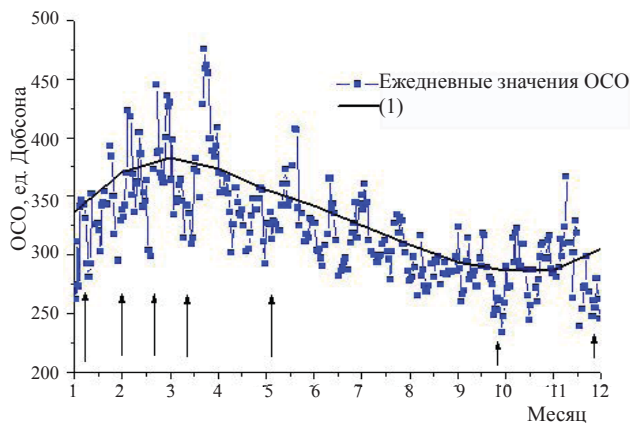


Рисунок 5.3 – Ежедневные (средние за день) значения ОСО для г. Минск

Стрелками отмечены отрицательные озоновые аномалии. (1) – многолетние средние среднемесячных значений ОСО

Так, 11-12 мая дефицит ОСО над территорией республики составил 20-21% по сравнению с климатической нормой (рис. 5.4а).

Следует отметить, что отрицательным озоновым аномалиям сопутствует повышение уровня биологически активного приземного ультрафиолетового излучения, которое особенно опасно в теплое время года при малых значениях солнечного зенитного угла ( $SZA \sim 30 \div 40^\circ$ ).

В январе-феврале 2012 г. над территорией Северного Ледовитого океана время от времени формировалась значительная по величине и дефициту озона область (23.01.12 дефицит составил -50%). Располагалась эта

аномалия преимущественно у северного побережья азиатской части Евразии (рис. 5.4б).

Характерно, что одновременно с данной отрицательной аномалией в высоких широтах наблюдались также значительные положительные озоновые аномалии над Северной Америкой и Азией.

Динамика развития «отрицательной» и «положительной» озоновых аномалий, а также продолжительность отдельных эпизодов их существования позволяют сделать заключение скорее о динамической, чем «фотохимической» природе данного явления (в отличие от аномалии, образовавшейся над полярной областью в 2011 г.).

Начиная с 1980-х гг., над Антарктидой стала ежегодно появляться «озоновая дыра» – область, в которой наблюдается значительный дефицит ОСО. Размеры этой области и дефицит озона в ней год от года увеличивались. Было установлено, что причиной дефицита озона в антарктической стратосфере является химическое разрушение озона с участием веществ антропогенного происхождения (фреонов) и которое происходит при очень низких температурах, характерных для антарктической стратосферы.

В 2012 г. более высокие по сравнению с предыдущими годами температуры стратосферы над Антарктикой привели к снижению размеров области с дефицитом озона. За 20 лет наблюдений это была вторая «маленькая озоновая дыра». Средний размер этой области в 2012 г составил 17,9 млн км<sup>2</sup> (самая большая по площади «озоновая дыра» наблюдалась в 2000 г., средние размеры ее составили 29,9 млн км<sup>2</sup>).

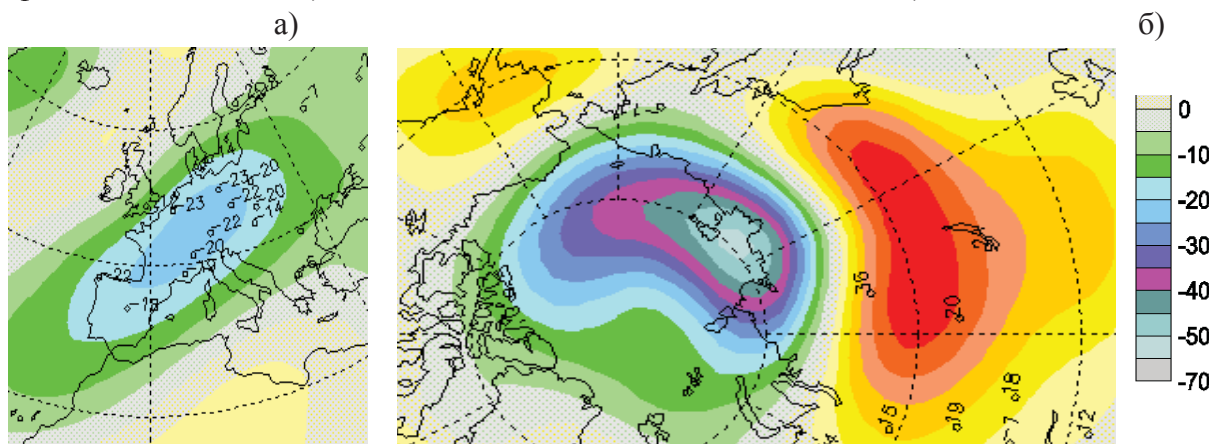


Рисунок 5.4 – Отрицательная озоновая аномалия над территорией республики 11.05.12 г. (а) и над Арктикой 23.01.12 г. (б)

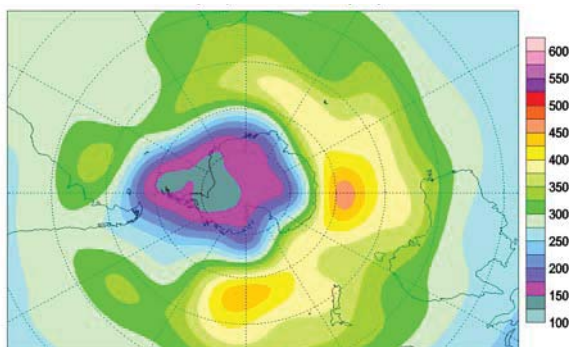
Обычно максимальных размеров область с дефицитом озона достигает в начале сентября, а наибольший дефицит озона в ней отмечается в конце сентября – начале октября. В 2012 г самое низкое значение ОСО (132 ЕД) отмечено 7 октября и максимальные размеры области с дефицитом ОСО составили 21,2 млн км<sup>2</sup> 22 сентября.

Фазы развития Антарктической озоновой дыры сезона 2012 г. представлены на рисунке 5.5.

В НИИЦ МО БГУ в течение ряда лет проводятся работы по уточнению климатической нормы общего содержания озона в столбе атмосферы (ОСО). Этот параметр важен для оценки состояния озоносферы над территорией республики, а также для построения климатических и других прогностических моделей.

На рисунке 5.6 вместе с данными спутниковых наблюдений за общим содержанием озона в атмосфере над г. Минск (2) и

Total ozone (DU) / Ozone total (UD), 2012/09/22



среднемесячными значениями (3) показаны климатическая норма общего содержания озона (1) и ее 95% доверительный интервал (4). Заполненный ряд данных дает хорошую картину годовой динамики озонового слоя: результаты наблюдений ОСО в общем повторяют ход климатической нормы.

#### **Мониторинг спектров и доз биологически активного солнечного УФ-излучения**

В 2012 г. измерения спектров плотности энергетической освещенности (СПЭО) земной поверхности солнечным излучением в спектральном диапазоне 285-450 нм проводились с помощью ультрафиолетового спектрометра ПИОН-УФ.

Измерения производились в автоматическом режиме с восхода до захода солнца. При этом в течение светового дня регистрировалось от 100 спектров в зимние месяцы до 200 и более – в летние.

По измеренным спектрам в соответствии с требованиями ВМО рассчитывались

Total ozone (DU) / Ozone total (UD), 2012/10/07

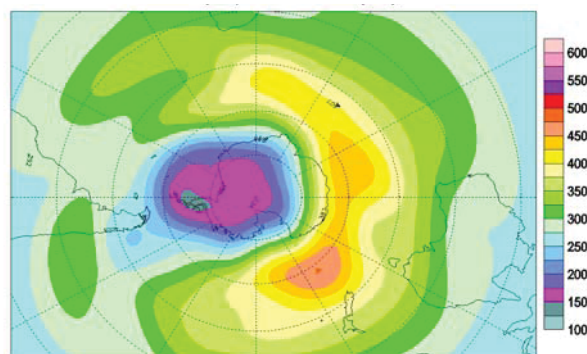


Рисунок 5.5 – Распределение полей озона над Антарктидой 22.09.2012 г. (слева) и 07.10.2012 г. (справа) (шкала значений ОСО в ЕД)

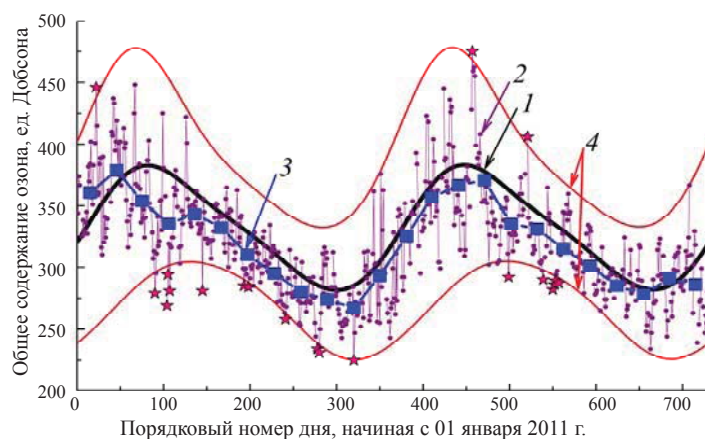


Рисунок 5.6 – Общее содержание озона над г. Минск в 2011-2012 гг.

Звездочками отмечены озонные аномалии. 1 - климатическая норма общего содержания озона с учетом многолетнего тренда; 2 - результаты наблюдений; 3 - среднемесячные значения общего содержания озона по данным наблюдений; 4 - 95%-й доверительный интервал для значений общего содержания озона

значения суточных доз различных биоэффектов (эритемы, повреждения ДНК и т.п.), а также значения УФ-индекса.

Результаты обработки данных мониторинга в течение 2012 г. частично представлены на рисунках 5.7-5.9. На рисунке 5.7 показано распределение суточных доз биоэффекта «эритема», полученное обработкой измеренных на Минской озонометрической станции спектров.

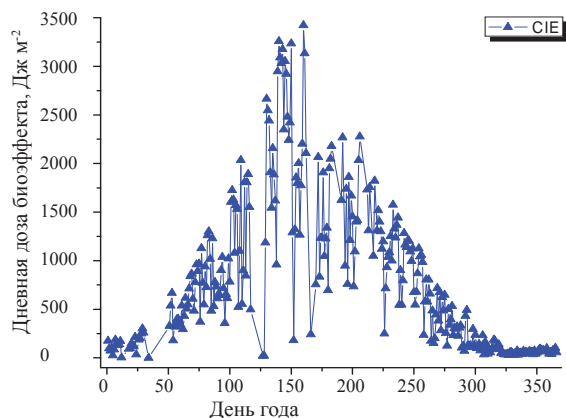


Рисунок 5.7 – Экспериментальные значения суточных эритемных доз солнечного УФ излучения в 2012 г.

Аналогичные измерения мощностей и доз биологического эффекта «эритема» проводились на биостанции оз. Нарочь с помощью фильтрового фотометра ПИОН-Ф. Результаты измерений представлены на рисунке 5.8.

На рисунке 5.9 представлены результаты сравнения годового распределения значений УФ индекса в минском регионе и в районе рекреационной зоны оз. Нарочь.

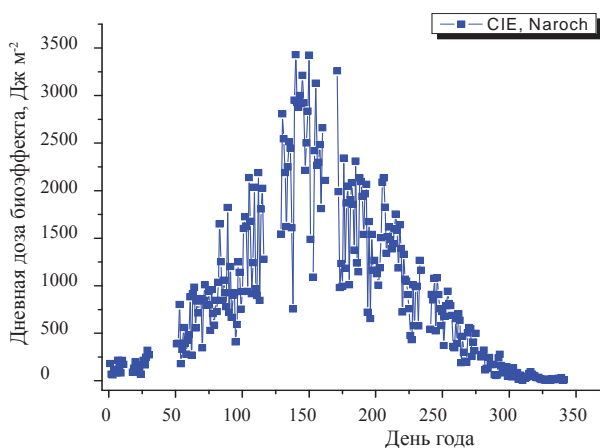


Рисунок 5.8 – Мониторинг суточных доз биологически активного (эффект эритема) УФ излучения в районе оз. Нарочь в 2012 г.

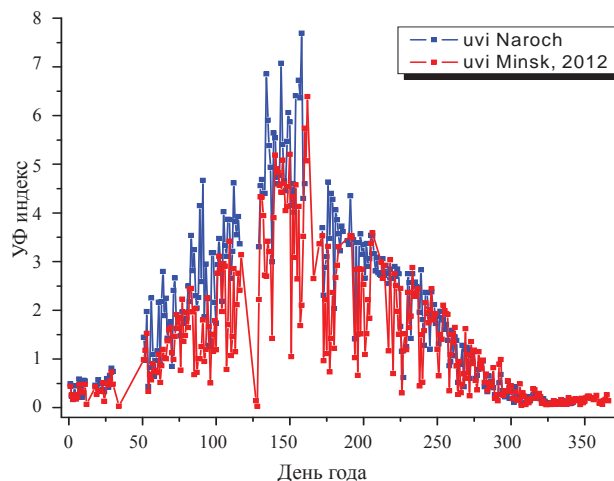


Рисунок 5.9 – Годовые распределения значений УФ индекса в районах Минской озонометрической станции и биостанции БГУ на оз. Нарочь в 2012 г.

### Мониторинг приземных концентраций озона

В отличие от стратосферного озона, защищающего живые организмы на Земле от разрушающего действия солнечного ультрафиолетового излучения, приземный озон является загрязняющим веществом, отрицательно влияющим на здоровье человека и животных, оказывающим угнетающее воздействие на леса и сельскохозяйственные культуры. Озон относится к загрязнителям атмосферы первого класса опасности.

В результате антропогенного воздействия происходит увеличение концентрации приземного озона. Особенно заметно это в Северном полушарии. Концентрация озона в крупных городах в условиях сильно загрязненной атмосферы может достигать уровней, в десятки раз превышающих естественные и достаточных для ощутимого воздействия на живые организмы.

Мониторинг концентрации приземного озона в Беларуси начался в 2004 г. на озонометрической станции НИИЦ МО Белгосуниверситета с использованием, созданного в Центре, оптического трассового измерителя озона ТриО-1.

Озонометрическая станция НИИЦ МО расположена на территории филиала БГУ (ул. Курчатова).

На рисунке 5.10 представлены результаты измерений концентрации приземного озона в местный полдень на озонометрической

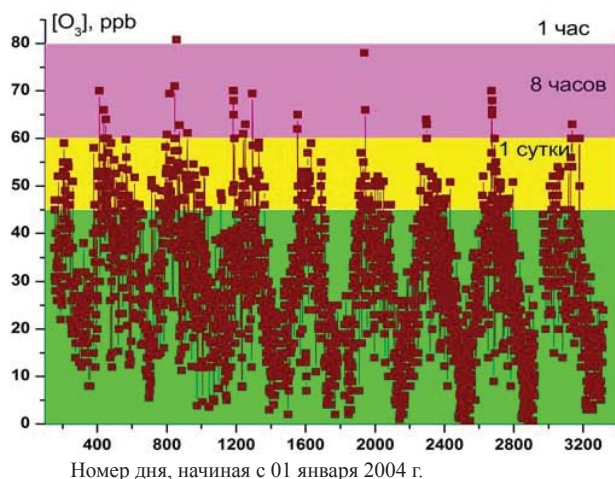


Рисунок 5.10 – Изменение концентраций приземного озона в г. Минск в 2004-2012 гг. (Данные измерений в верхней закрашенной полосе превышают 8-ми часовую ПДК)

станции НИИЦ МО в г. Минск за весь период наблюдений. Цветом выделены случаи превышения суточного и 8-часового ПДК. Значительное количество превышений ПДК убедительно показывает актуальность мониторинга озона в Беларуси.

Результаты измерений концентраций приземного озона в 2011-2012 гг. и среднемесячные значения (красная линия) приведены на рисунке 5.11.

В 2012 г. весенний максимум концентрации приземного озона проявился нечетко, что обусловлено ранним сходом снежного покрова и его появлением снова в конце марта.

Концентрация озона у поверхности земли определяется не только эффективностью его переноса из верхних слоев тропосферы,

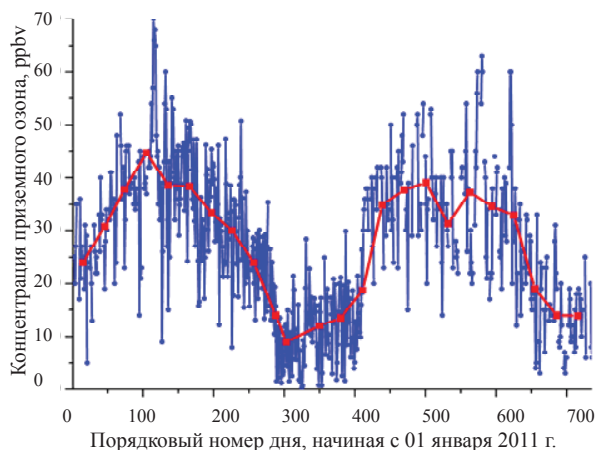


Рисунок 5.11 – Результаты измерений концентрации приземного озона на станции НИИЦ МО в 2011-2012 гг.

процессами фотохимической генерации озона или его разрушения, но также и эффективностью осаждения на подстилающую поверхность. Скорость разрушения озона на подстилающей поверхности существенно зависит от наличия или отсутствия снега. В первом случае она заметно меньше, чем во втором. Поэтому при прочих равных условиях следует ожидать более высоких концентраций приземного озона при наличии снега.

Являясь сильнейшим окислителем, озон вступает в реакции со многими загрязнителями атмосферы, разрушаясь в таких реакциях и приводя к образованию вторичных загрязнителей. С другой стороны, в сильно загрязненном воздухе при определенных условиях возможна генерация озона у поверхности Земли. Данные параллельных измерений озона и других антропогенных загрязнителей в различных районах г. Минск позволяют оценить характер их взаимодействия. Косвенно о результатах такого взаимодействия можно судить по коэффициентам корреляции наблюдаемых концентраций газов, представленных в таблице 5.1 (расчитаны по результатам измерений на пункте № 11 Департамента по гидрометеорологии в июне 2012 г.).

В подавляющем большинстве случаев повышение уровня загрязнения атмосферы в г. Минск приводит к уменьшению концентрации приземного озона (коэффициенты корреляции концентрации озона с концентрациями оксидов азота, оксида углерода и ЛОС отрицательны). При этом концентрации названных загрязнителей хорошо коррелируют друг с другом, что указывает на, возможно, общие источники их выбросов. Анализ результатов свидетельствует о том, что определяющее влияние на концентрацию приземного озона оказывает загрязнение воздуха оксидами азота. Хотя другие загрязнители также снижают концентрацию озона, но существенно повлиять на уровень приземного озона они не могут. В частности, на рисунке 5.12 показан пример четкой антикорреляции концентраций оксидов азота ( $\text{NO}_x = \text{NO} + \text{NO}_2$ ) и приземного озона по результатам наблюдений на пункте № 4 (г. Могилев, апрель 2012 г.).

Таблица 5.1 – Коэффициенты корреляции между загрязнителями атмосферы по данным наблюдений в июне 2012 г. на пункте № 11 в г. Минск

	O <sub>3</sub>	SO <sub>2</sub>	CO	NO+NO <sub>2</sub>	ЛОС
O <sub>3</sub>	-	0,06	-0,5	-0,55	-0,37
SO <sub>2</sub>		-	0,01	0,1	0,01
CO			-	0,76	0,52
NO+NO <sub>2</sub>				-	0,6

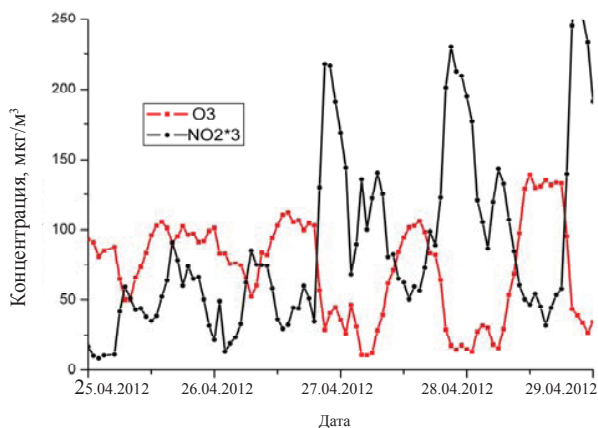


Рисунок 5.12 – Анतिकорреляция концентраций приземного озона и двуокиси азота (г. Могилев, апрель 2012 г.).

Еще одним доводом в пользу определяющей роли оксидов азота в снижении концентрации приземного озона служат результаты сравнения наблюдений на всех 4-х пунктах Департамента по гидрометеорологии, расположенных в разных районах г. Минск.

На рисунках 5.13-5.14 представлены среднесуточные концентрации оксидов азота и приземного озона в июне 2012 г. Максимальные среднесуточные концентрации озона и минимальные среднесуточные концентрации оксидов азота чаще всего регистрируются на пункте № 1 (Обсерватория). Результаты измерений показывают, что эта ситуация характерна как для летних месяцев, так и для зимнего периода.

**Мониторинг общего содержания диоксида азота в атмосфере (ОСДА)**

Двуокись азота (NO<sub>2</sub>) относится к химически активным газовым составляющим атмосферы: в тропосфере участвует в образовании кислотных дождей, оказывающих негативное воздействие на функционирование экосистем. Поскольку не менее 45% тропосферных эмиссий NO<sub>2</sub> имеют антропогенное происхождение, NO<sub>2</sub> является хорошим индикатором локального и регионального

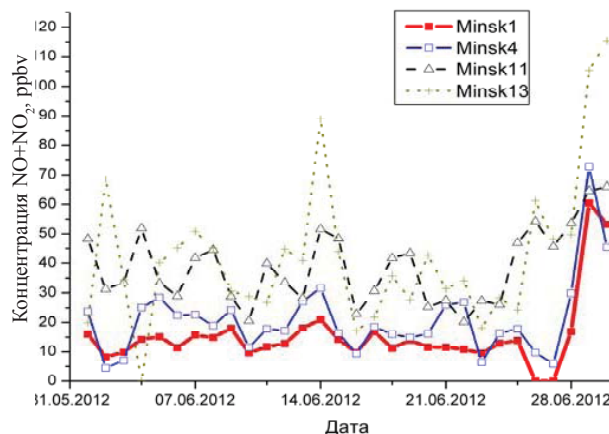


Рисунок 5.13 – Среднесуточные концентрации оксидов азота NO<sub>x</sub>=NO+NO<sub>2</sub>, зарегистрированные в июне в разных районах г. Минск, 2012 г.

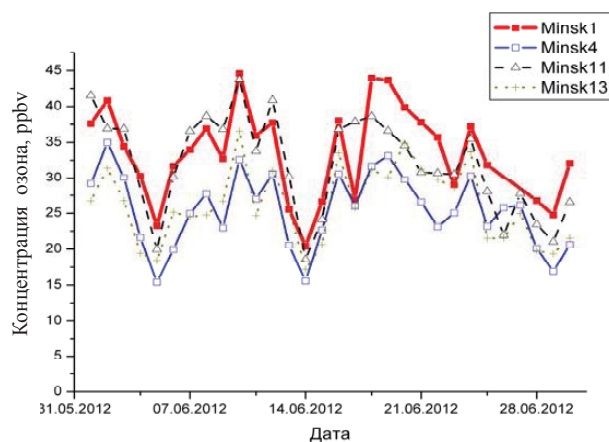


Рисунок 5.14 – Среднесуточные концентрации приземного озона, зарегистрированные в июне в разных районах г. Минск, 2012 г.

загрязнения атмосферы антропогенными газами. И хотя в глобальном масштабе NO<sub>2</sub> не является парниковым газом, внося у поверхности земли в среднем в радиационный баланс атмосферы только 0,05 Вт/м<sup>2</sup>, в загрязненных регионах вклад NO<sub>2</sub> в радиационный баланс достигает 30 Вт/м<sup>2</sup>.

Измерения общего содержания NO<sub>2</sub> ведутся на Минской озонометрической станции (N53.85, E27.47) с 2010 г. по рассеянному в зените солнечному излучению.



В городах пространственное распределение и временная изменчивость содержания  $\text{NO}_2$  в приземном слое атмосферы (ПСА) связаны с городской жизнедеятельностью и расположением потенциальных источников  $\text{NO}_2$ . К основным источникам  $\text{NO}_2$  в городах относятся промышленные предприятия, предприятия энергетики и автотранспорт. Ниже приводятся численные характеристики суточного и недельного циклов, а также сезонного хода содержания  $\text{NO}_2$  в ПСА над г. Минск.

Сезонный ход содержания  $\text{NO}_2$  в ПСА, зарегистрированный в 2012 г. на Минской озонометрической станции, имеет несколько характерных особенностей (рис. 5.15):

- в холодный сезон года (температура воздуха ниже  $0\text{ }^\circ\text{C}$ ) над Минском формируется смоговая ситуация с характерным содержанием  $\text{NO}_2$  около  $2 \times 10^{16}$  мол/см<sup>2</sup> из-за значительного превышения времени жизни  $\text{NO}_2$  над ночной паузой в работе автотранспорта;

- в жаркий сезон года (температурой воздуха выше  $20\text{ }^\circ\text{C}$ ) из-за значительной адвекции воздушных масс с территории города наблюдаются минимальные дневные и среднемесячные значения содержания  $\text{NO}_2$  в ПСА.

Аналогичный относительный сезонный ход содержания  $\text{NO}_2$  проявляется в данных прибора OMI, спутника Aura.

Расхождение в абсолютных значениях между наземным и спутниковым прибором связано со следующими причинами:

- слой аэрозоля, возникающий над городом, значительно отражает солнечное излучение назад в космос, из-за чего отношение сигнал/шум для низких слоев близко к 1 и можно говорить о том, что спутники не чувствительны к слою атмосферы ниже 1000 м атмосферы, где сосредоточено основное содержание  $\text{NO}_2$ ;

- размер пикселя OMI составляет  $25 \times 25$  км, что намного больше характерных размеров источников выбросов  $\text{NO}_2$ . Для зенитных измерений с входной апертурой 7 градусов и альбедо земной поверхности 0,05 характерная площадь, с которой проводятся измерения, составляет  $0,5 \times 0,5$  км;

- кроме того, наблюдения с OMI проводятся в дневное время около полудня, а измерения содержания  $\text{NO}_2$  с поверхности Земли проводятся в течение суток. Как будет показано ниже, содержание  $\text{NO}_2$  в полдень неадекватно.

В суточном ходе содержания  $\text{NO}_2$ , представленном на рисунке 5.16, имеется два характерных временных периода:

- с 5 до 16 часов по местному (минскому) времени содержание  $\text{NO}_2$  не меняется и составляет  $0,75 \times 10^{16}$  мол/см<sup>2</sup>;

- после 16 начинается резкое увеличение содержания  $\text{NO}_2$  до  $1,5 \times 10^{16}$  мол/см<sup>2</sup>.

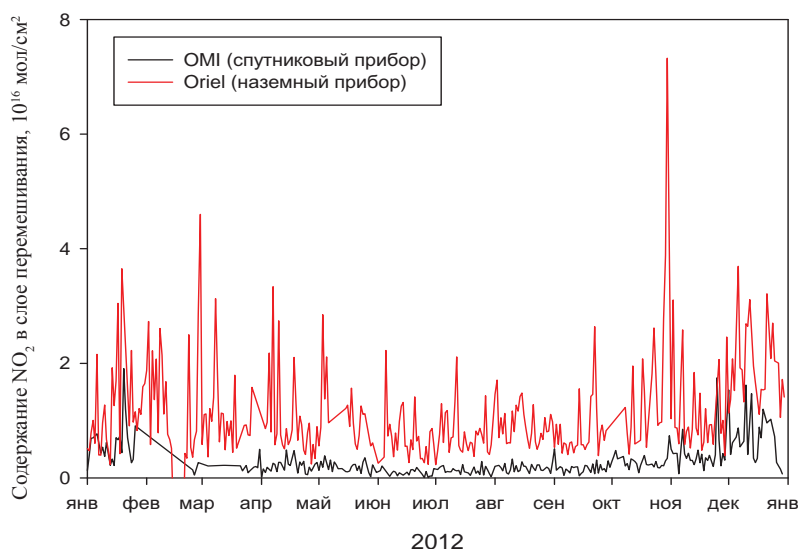


Рисунок 5.15 – Сезонный ход содержания  $\text{NO}_2$  по данным Минской озонометрической станции ННИЦ МО БГУ и орбитальной системы OMI, 2012 г.

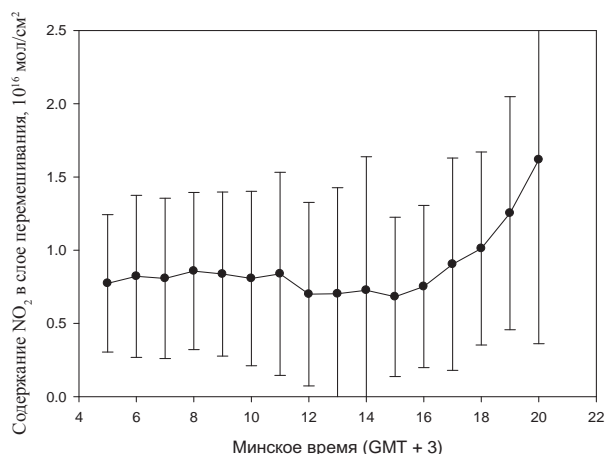


Рисунок 5.16 – Суточный цикл вариации содержания NO<sub>2</sub> в ПСА г. Минск, 2012 г.

Наблюдающийся «вечерний рост» содержания NO<sub>2</sub> вероятно связан с вечерним «часом пик» в городе, не исключено также и наличие суточной зависимости направления ветра (этот факт требует дальнейшего систематического изучения).

По данным за 2012 г. недельный ход содержания NO<sub>2</sub> в г. Минск практически не изменяется: среднее значение для всех дней недели близко к 1 x 10<sup>16</sup> мол/см<sup>2</sup> (рис. 5.17). Однако для обоснованного вывода необходимо провести более подробный анализ с учетом метеоусловий, а также общей картины образования и переноса NO<sub>2</sub> в городе.

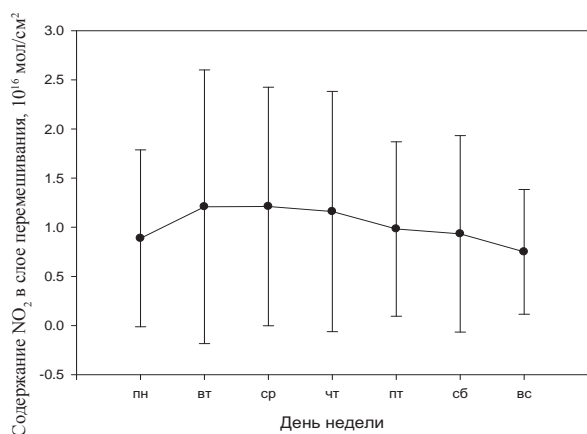


Рисунок 5.17 – Недельный цикл содержания NO<sub>2</sub> в г. Минск по данным Минской озонометрической станции, 2012 г.