

## 5. МОНИТОРИНГ ОЗОНОВОГО СЛОЯ

Согласно п. 4 Положения о порядке проведения в составе НСМОС мониторинга озонового слоя и использования его данных, мониторинг озонового слоя – система наблюдений за состоянием озонового слоя, оценки и прогнозирования его изменений в целях своевременного выявления негативных воздействий природных и антропогенных факторов [13].

Общее содержание озона (далее – 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 2013 г. основной (базовый) мониторинг ОСО проведен на Минской озонометрической станции (Минск 27.47E, 53.83N) с помощью ультрафиолетового спектрорадиометра ПИОН-УФ, разработанного в Национального научно-исследовательского центра мониторинга озоносферы Белгосуниверситета (далее – ННИЦ МО БГУ) и предназначенного для измерения спектральной плотности энергетической освещенности (далее – СПЭО) в диапазоне 285–450 нм. Определение ОСО из данных СПЭО осуществлено модифицированным методом Стамнеса.

Дополнительный (параллельный) мониторинг ОСО осуществлен экземплярами модернизированного в ННИЦ МО БГУ фильтрового озонометра М-124М, реализующего методики измерений «по прямому солнцу» (Direct-Sun) и «из зенита неба» (Zenith-Sky), а также узкополосным фильтровым фотометром ПИОН-Ф, позволяющим проводить измерения ОСО по отношению интегральных освещенностей земной поверхности в двух спектральных интервалах.

В 2013 г. мониторинг ОСО в атмосфере над территорией Республики Беларусь проведен также на метеорологических площадках г. Гомеля и биостанции БГУ на оз. Нарочь.

Для сравнительного анализа состояния озоносферы использованы данные наземных измерений и системы орбитального базирования ОМІ (рисунок 5.1). Среднеквадратическое отклонение данных наземных измерений от спутниковых данных составляет ~4%.

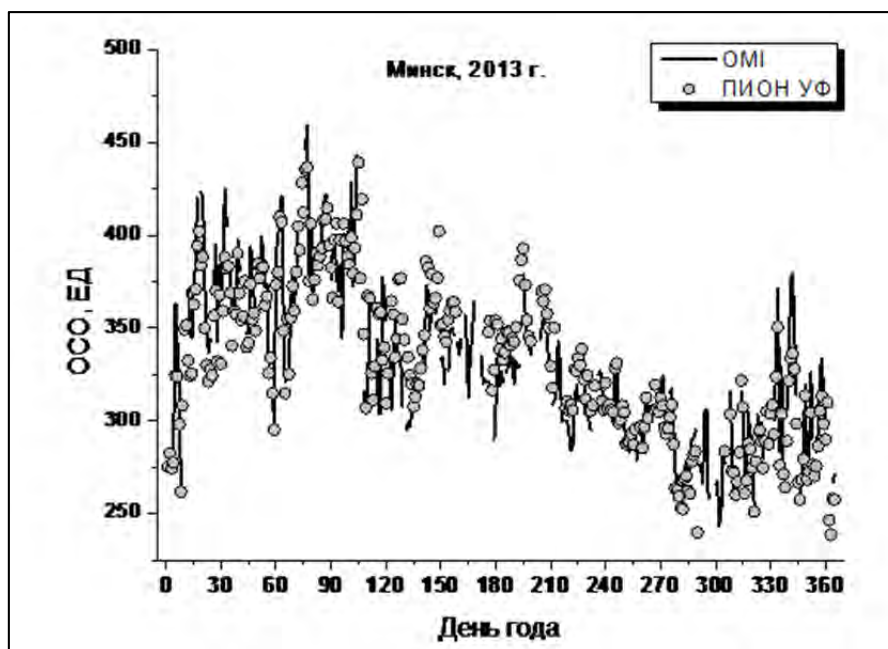


Рисунок 5.1 – Сопоставление результатов наземных (ПИОН-УФ) и спутниковых (ОМІ) измерений ОСО в атмосфере над г. Минском в 2013 г.

### Состояние озонового слоя в атмосфере.

Интересной особенностью весеннего периода является полное отсутствие положительных аномалий ОСО и фактически одна отрицательная озонная аномалия, продолжавшаяся несколько дней и сильно понизившая величину среднемесячного значения ОСО в мае (рисунок

5.2). Остальные среднемесячные значения заметно приблизились к прогнозной (рассчитанной по данным за 1979 – 2011 гг.) климатической норме, несмотря на ее продолжающийся рост, начиная с 2005 г.

Максимальное среднедневное значение ОСО отмечено 18 марта и составило, по данным ОМІ, 459 ЕД (по данным наших наземных измерений в этот день зарегистрировано значение 437 ЕД). Этому же месяцу соответствует и максимальное среднемесячное значение.

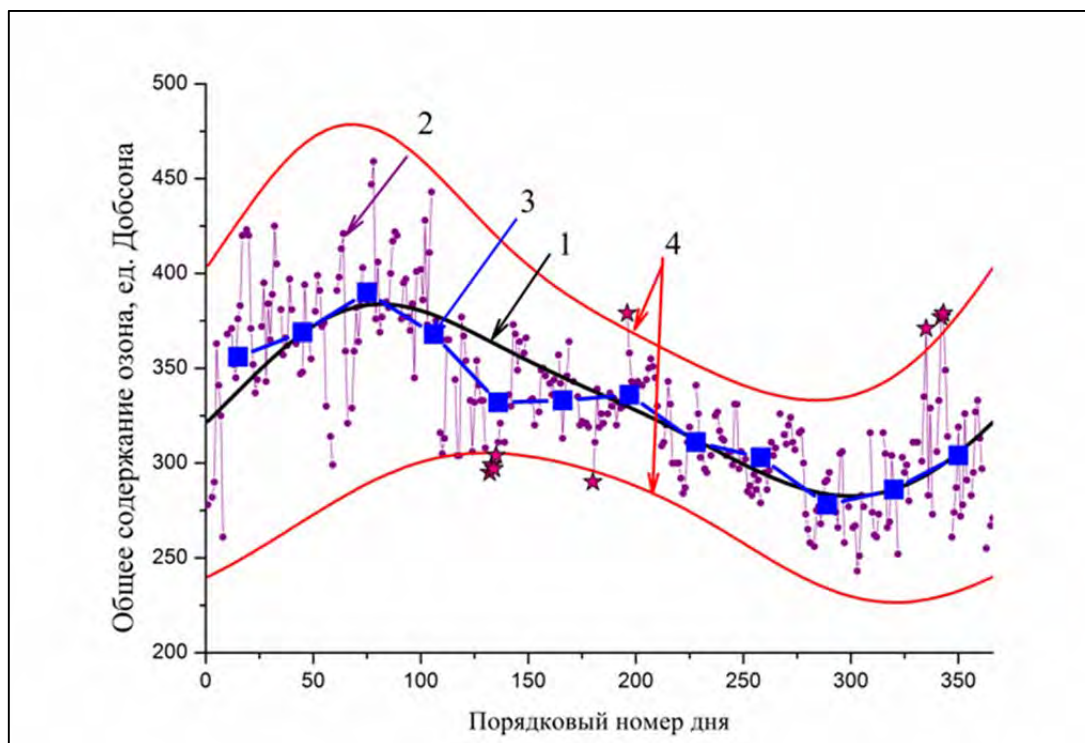


Рисунок 5.2 – Общее содержание озона над г. Минском в 2013 г.

(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)

Выполненный в 2011 г. расчет нормы ОСО с учетом его многолетнего тренда указывает на начало восстановления озонового слоя над Беларусью после 2005 г. Между тем, результаты наблюдений в 2011 и 2012 гг. оказались заметно меньше ожидаемых и лишь в 2013 г. ОСО приблизилось к своим прогнозным значениям. В связи с этим возникают вопросы об адекватности модельных прогнозов состояния озоносферы.

Накопленные данные за 2012 – 2013 гг. позволяют уточнить климатическую норму ОСО, ее многолетний тренд, и оценить качество сделанного ранее прогноза. Установлено, что повторяющаяся из года в год циклическая составляющая климатической нормы после пересчета практически не изменилась (рисунок 5.3). Однако учет данных 2012-2013 гг. приводит к несколько менее оптимистичному прогнозу восстановления озонового слоя.

Очевидно, что полученный результат является следствием имевшего место дефицита ОСО над Республикой в 2011-2012 гг. Несмотря на это, статистически значимая на уровне  $\alpha=0,05$  тенденция к росту ОСО сохраняется.

Согласно спутниковым данным, площадь озоновой дыры над Антарктидой в 2013 г. достигла максимума (24,0 млн. км<sup>2</sup>) 16 сентября. Размеры области с дефицитом озона в 2013 г. больше, чем в 2012 г. и 2010 г., но меньше, чем в 2011 г. Дефицит массы озона, усредненный за последнюю декаду сентября, составил 19,59 мегатонн, что больше, чем в 2010 г. и 2012 г., но меньше, чем в 2011 г.. За весь период наблюдения данного явления только в течение 2002 г., 2004 г., 2010 г., 2012 г. наблюдались меньшие по площади и глубине аномалии.

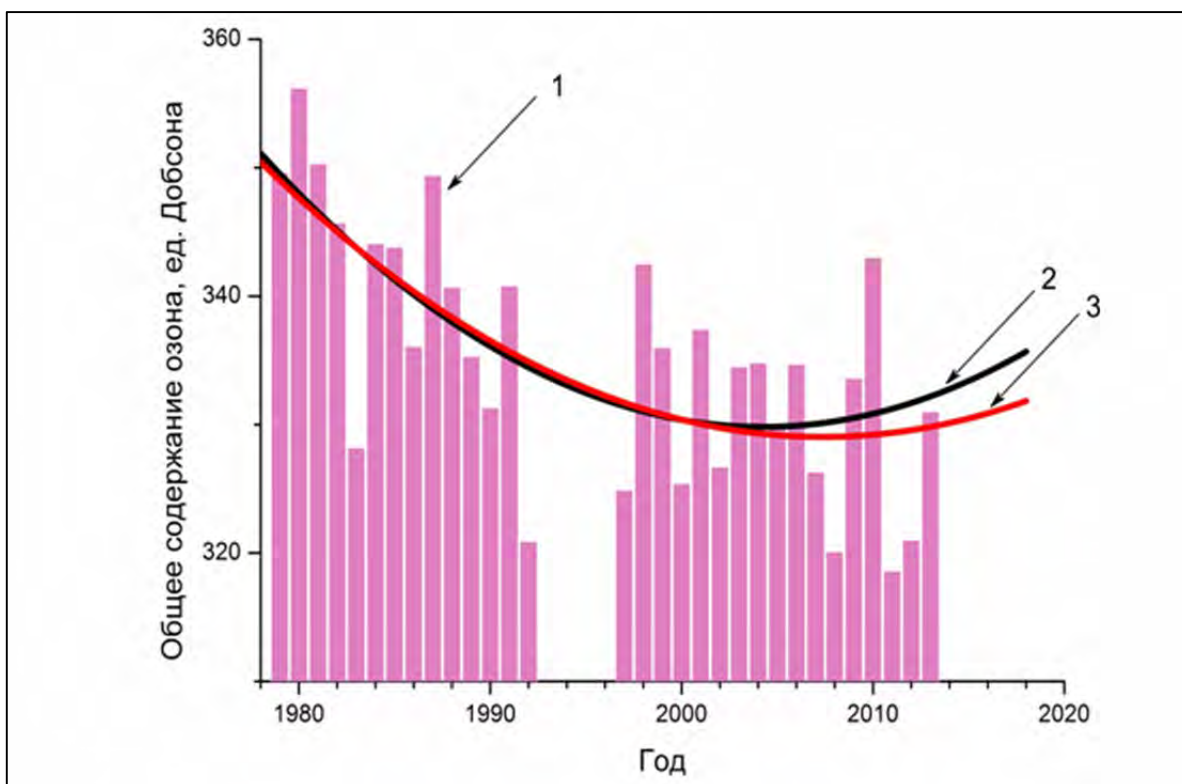


Рисунок 5.3 – Среднегодовые значения ОСО по данным спутниковых наблюдений над г. Минском (1) и многолетние тренды, определенные на основании данных за период 1979–2011 гг. (2) и 1979–2013 гг. (3)

В Северном полушарии полярный вихрь более подвижен и менее стабилен, чем в Южном. Поэтому весенние озоновые дыры над Северным Полюсом наблюдаются реже. Наибольшие потери озона в полярной области северного полушария наблюдались в феврале–апреле 2011 г.

#### **Мониторинг приземных концентраций озона.**

Приземный озон, в отличие от стратосферного озона, защищающего живые организмы на Земле от биологически вредного воздействия солнечного ультрафиолетового излучения, относится к загрязнителям атмосферы первого класса опасности, поскольку, являясь сильным окислителем, отрицательно влияет на здоровье человека и животных, на состояние и развитие лесных растений и сельскохозяйственных культур.

Приземные концентрации озона в крупных городах, в результате воздействия антропогенных факторов могут достигать значений, в десятки раз превышающих естественный уровень, и достаточных для ощутимого негативного влияния на живые организмы.

Мониторинг концентраций приземного озона в Беларуси начат в 2004 г. и регулярно проводится на озонметрической станции ННИЦ МО БГУ (филиал БГУ, г. Минск, ул. Курчатова), а также на других станциях в рамках мониторинга атмосферного воздуха (ГУ «РЦРКМ») – см. главу 4.

Полуденные значения концентраций приземного озона хорошо коррелируют со среднесуточными значениями (рисунок 5.4). Весенний озонный максимум в 2013 г. пришелся на апрель, а летний максимум выражен весьма слабо. Ввиду сильной чувствительности озона к метеоусловиям и загрязнению воздуха, результаты измерений даже в пределах одного города несколько различаются. Анализ показывает, что на концентрацию приземного озона определяющее влияние оказывают оксиды азота: чем выше концентрация последних, тем меньше концентрация озона у поверхности земли.

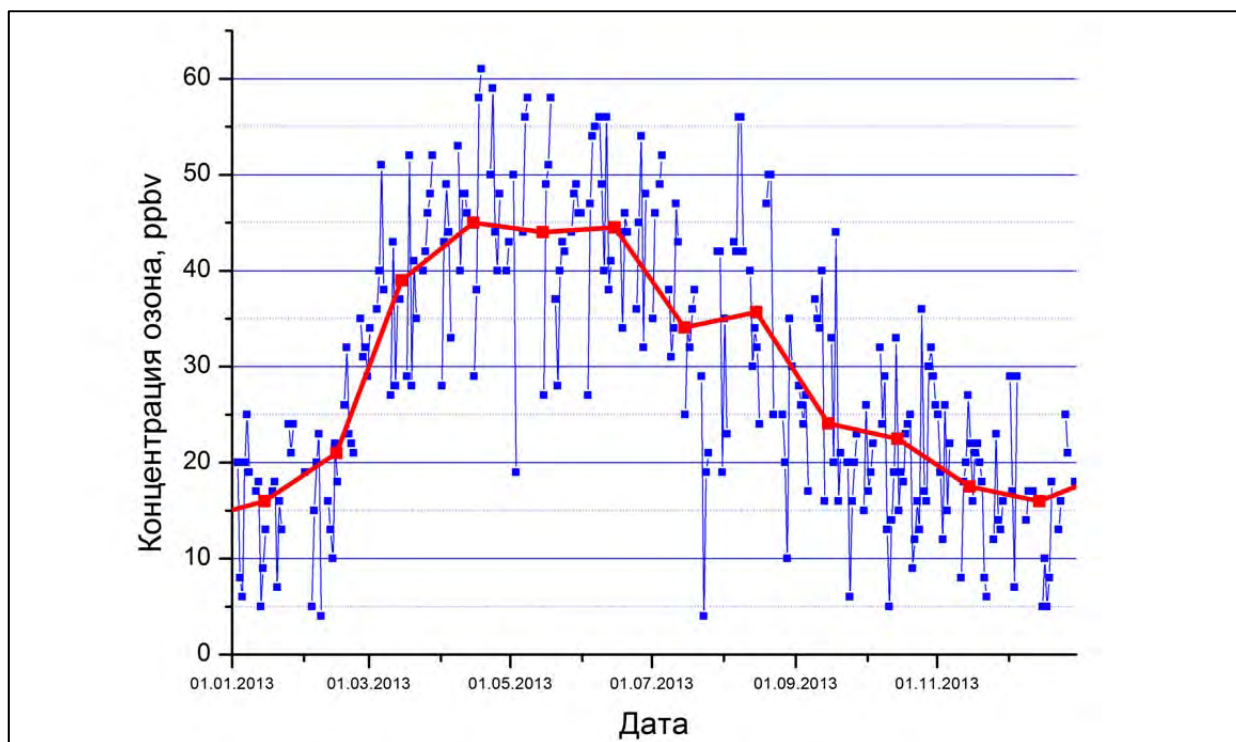


Рисунок 5.4 – Полуденные и среднемесячные концентрации приземного озона, 2013 г., станция ННИЦ МО БГУ

Летучие органические соединения (бензол, толуол, ксилол и др.) также взаимодействуют с озоном и в присутствии интенсивной солнечной радиации способны приводить к генерации озона и повышению его концентрации. Однако наблюдения на территории Беларуси до сих пор не выявили случаев увеличения концентрации озона в условиях антропогенного загрязнения воздуха, несмотря на возможность такого явления.

#### **Климатология приземного озона.**

Анализ динамики изменения параметра состояния атмосферы за конкретный период базируется на сравнении результатов наблюдений с климатической нормой рассматриваемого параметра. Традиционно под климатической нормой параметра атмосферы подразумевается его многолетнее среднее значение за период в 30 лет.

К настоящему времени концепция климатической нормы претерпела изменения и включает в себя составляющую, характеризующую изменение нормы со временем. Такая модификация обладает существенно лучшей прогностической особенностью в условиях изменяющегося климата.

Совокупность исходных данных, использованных для расчета нормы приземного озона для г. Минска, включает в себя результаты измерений (2004–2013 гг.) на озонометрической станции ННИЦ МО БГУ в местный полдень (10.00 Greenwich Mean Time) прибором ТрИО-1 и результаты менее регулярных измерений прибором ТЕI-49С, охватывающих, однако, более длительные промежутки времени; иногда непрерывные измерения велись в течение нескольких суток. В расчет также включены непрерывные измерения на 4-х пунктах ГУ «РЦРКМ» в г. Минске (2011–2013 гг.). В качестве дополнительных использованы данные литовской станции Прейла (LT15 по классификации ЕМЕР) за период 2000–2010 гг. Положительный эффект использования дополнительных данных сводится к стабилизации поведения климатической нормы приземного озона при экстраполяции в прошлое (годы, предшествующие началу измерений в г. Минск) и практически не сказывается на поведении рассчитанной нормы в будущем.

В многолетнем среднем отчетливо проявляются весенний и летний максимумы, в то время как рассчитанная климатическая норма для г. Минска показывает наличие ярко выраженного летнего максимума только в начале периода наблюдений (рисунок 5.5). Затем летний максимум становится менее заметным и исчезает к концу периода. Многолетний тренд (линей-

ная аппроксимация) имеет отрицательный знак и отражает постепенное снижение полуденной концентрации приземного озона.

Такое поведение нормы и ее динамика согласуются с наблюдениями и обусловлены климатическими изменениями и ростом уровня загрязнения атмосферного воздуха в городе.

Концентрация приземного озона подвержена сильным и быстрым изменениям, так как:

– озон переносится с тропосферными воздушными массами, поэтому его концентрация у поверхности земли оказывается зависимой не только от местных условий, но и от направления движения воздушных масс;

– на концентрацию озона влияет ряд местных факторов: погодные условия (в дождливую погоду концентрация резко снижается), загрязнение атмосферы антропогенными выбросами (наибольшее воздействие оказывают оксиды азота и летучие органические соединения), интенсивность вертикального перемешивания атмосферы (в более высоких слоях тропосферы концентрация озона выше) и скорость осаждения на подстилающую поверхность (снежный покров способствует более медленному стоку озона).

Под действием названных факторов концентрация приземного озона часто испытывает значительные по амплитуде случайные флуктуации даже в течение одних суток. В результате говорить о воспроизводимом суточном ходе приземного озона можно только в отношении усредненных за достаточно длительный период значений. Поэтому обычно относительная дисперсия отклонений наблюдаемых концентраций от рассчитанной климатической нормы оказывается достаточно высокой, а суточный ход нормы весьма редко совпадает с реальными результатами наблюдений. Рассчитанная норма приземного озона соответствует некоей средней погоде в данный период и среднему уровню загрязнения приземного воздуха, характерному для данного периода и данной местности.

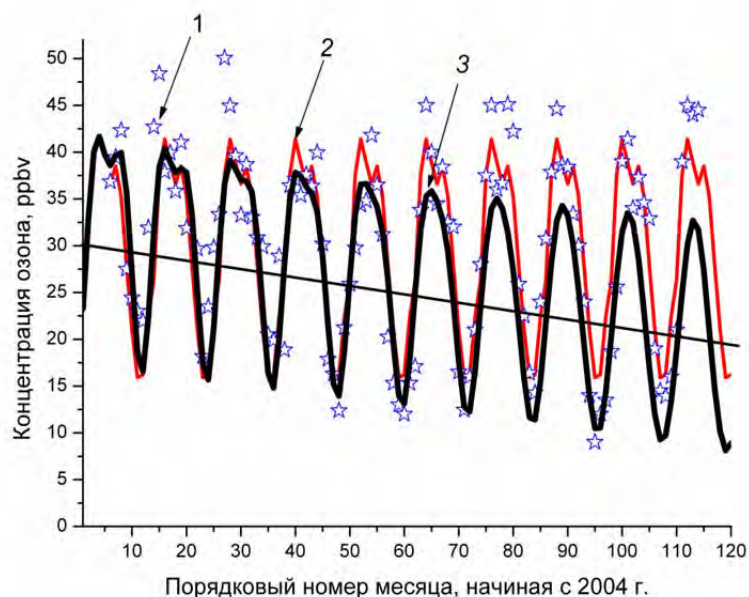


Рисунок 5.5 – Среднемесячные значения полуденных измерений концентрации приземного озона на станции ННИЦ МО в г. Минске за весь период наблюдений (1), многолетние среднемесячные значения полуденных концентраций (2) и климатическая норма полуденной концентрации приземного озона (3). Прямой линией показан линейный тренд

На рисунке 5.6 показан случай достаточно хорошего соответствия измеренных концентраций полученной климатической норме.

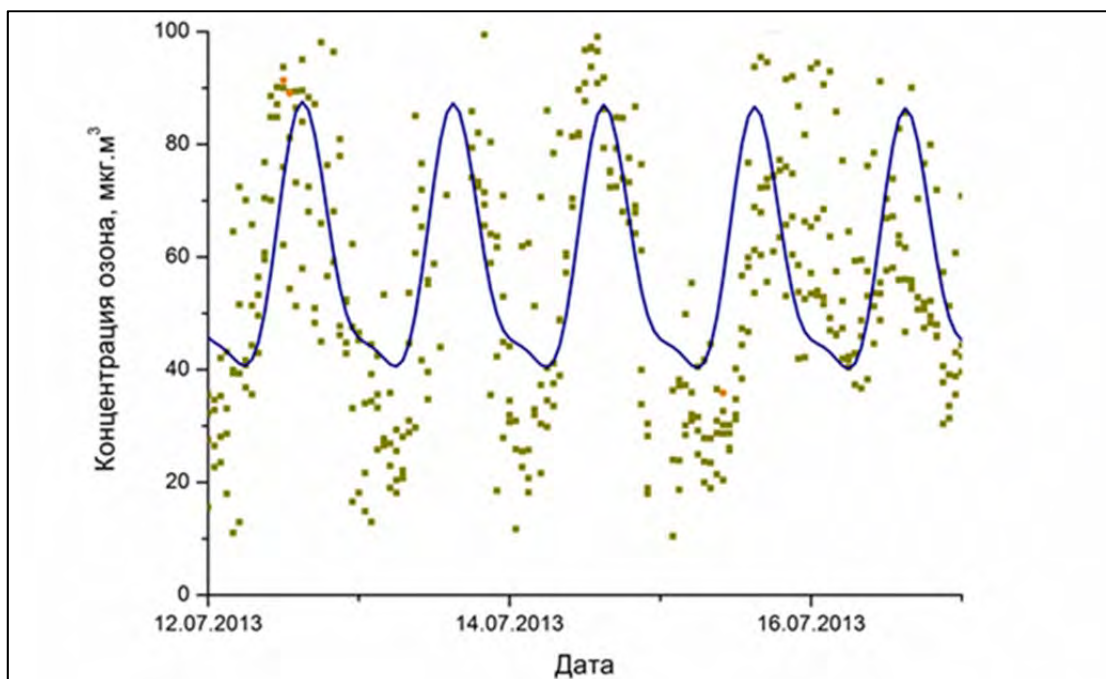


Рисунок 5.6 – Климатическая норма приземного озона в июле 2013 г. и результаты измерений различными приборами

Озонная климатическая норма демонстрирует выраженную изменчивость сезонного хода концентрации озона в течение периода наблюдений (рисунок 5.7, а). В 2004 г. четко выражены два сезонных максимума, в 2008 г. отсутствует второй максимум в полуденное время (10.00 GMT), в 2013 г. второй сезонный максимум сохраняется только ранним утром (3.00 GMT) и отсутствует во все другие сроки.

Утренний весенний максимум концентрации в 2004 г. приходится на конец февраля и постепенно смещается к концу марта по мере перехода к концу периода наблюдений. Полуденный и послеполуденный (13.00 GMT) весенние максимумы озона также смещаются на более позднее время (от начала апреля к концу мая). Более стабилен полуночный максимум, однако и он перемещается к середине мая в 2013 г.

Заметные изменения происходят также и с суточным ходом концентрации приземного озона (рисунок 5.7, б).

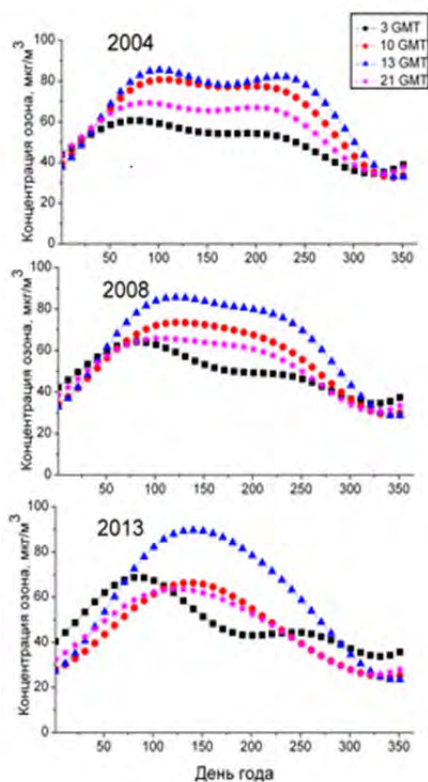
Зимой наиболее низкие концентрации озона фиксируются в дневное время, что может объясняться спецификой фотохимических процессов, приводящих в основном к разрушению озона в загрязненном городском воздухе, и заторможенной термической конвекцией вследствие характерных для зимнего периода температурных инверсий.

О разрушительном влиянии на озон возрастающего за период наблюдений уровня антропогенного загрязнения воздуха можно также судить по постоянно снижающейся среднесуточной концентрации озона в зимнее время.

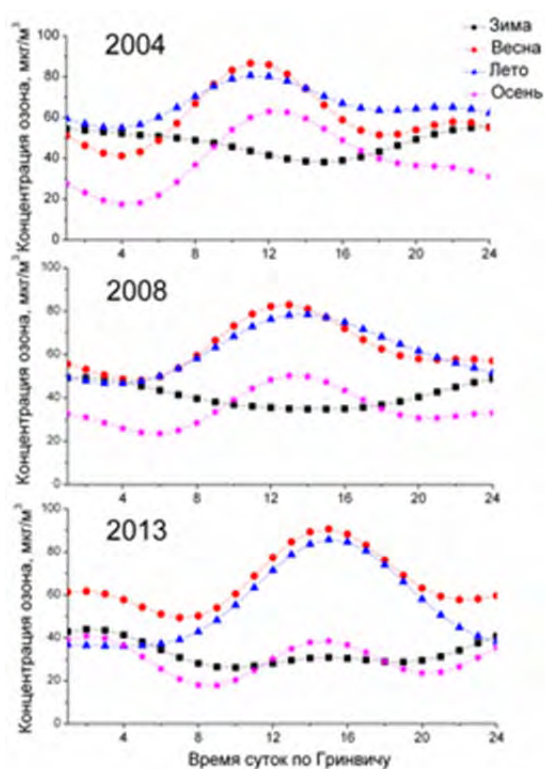
Весной, летом и осенью дневной максимум концентрации четко выражен и приходится на послеполуденное время суток, что объясняется продолжающимся после полудня ростом температуры и вызванной этим интенсификацией вертикального перемешивания в пограничном слое атмосферы.

Суточный ход летом мало отличается от весеннего (рисунок 5.7, б), и происходит постепенное смещение суточного максимума концентрации озона на более позднее время суток. Еще одной заметной особенностью является уменьшение осеннего дневного максимума и постепенное приближение осеннего суточного хода концентрации озона к зимнему ходу.

В ряде случаев климатическая норма указывает на существование ночного максимума концентрации озона. Наиболее ярко ночной максимум выражен в весеннее и зимнее время и существует в течение всего периода наблюдений.



а)



б)

Рисунок 5.7 – Изменение нормы сезонного (а) и суточного (б) хода концентрации приземного озона

Ночной максимум летом характерен только для начала периода наблюдений и исчезает к концу его. Однако осенний ночной максимум наблюдается в течение всего периода, хотя и существенно меняет свое положение и амплитуду.

Объяснить механизм образования ночного максимума весьма затруднительно. Фотохимические процессы, способные генерировать озон в приземном слое, в ночное время выключены. Интенсификация вертикального перемешивания, способная опустить к земле воздух с более высокими концентрациями озона, также маловероятна. И также маловероятен горизонтальный перенос в город воздуха с более высоким содержанием озона из сельской местности, поскольку обычно к ночи ветры ослабевают.

Многолетний тренд полуденных концентраций озона во все сезоны отрицателен и приблизительно одинаков (рисунок 5.8). В отличие от него, среднесуточная концентрация озона испытывает заметный отрицательный тренд только летом, осенью и зимой. Возможно, практически отсутствующий тренд весной обусловлен постоянным появлением весеннего максимума концентрации в последние годы, в то время как в начале периода весенние максимумы наблюдались не каждый год.

Усиление весеннего тренда для полуденных значений по сравнению со среднесуточными значениями обусловлено постепенным смещением суточного максимума концентрации озона на более позднее время (удалением от полудня). При этом полуденные концентрации оказываются дальше от максимума и меньшими по величине. Что касается абсолютной величины полуденных концентраций озона, то ее тренд отрицателен во все сезоны, приблизительно одинаков по величине и составляет около  $-20 \text{ мкг/м}^3$  за десятилетие.

Линейная аппроксимация тренда показывает устойчивое постепенное снижение концентрации приземного озона в г. Минске. Такое поведение свойственно как полуденным, так и среднесуточным значениям концентраций и наблюдается во все сезоны года. Снижение кон-

центрации приземного озона в городе фиксируется на протяжении всего периода наблюдений и обусловлено ухудшением экологической обстановки и изменением климата.

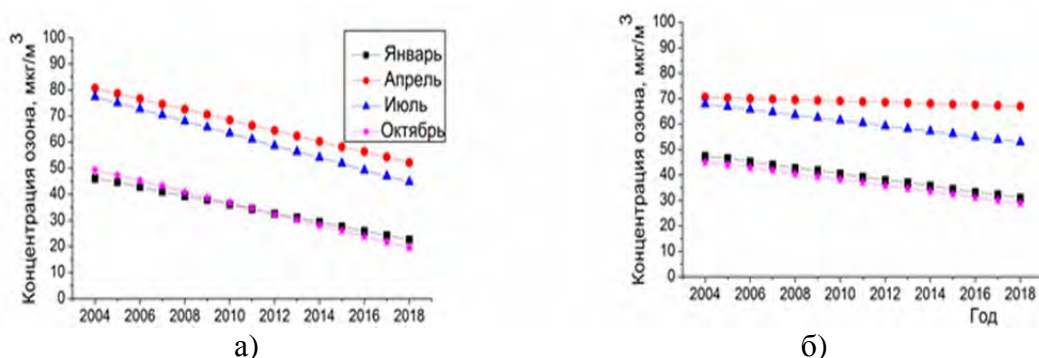


Рисунок 5.8 – Тренды многолетних полуденных концентраций (а) и среднесуточных концентраций (б) приземного озона в различные сезоны

Анализ коэффициентов корреляции концентрации приземного озона, оксидов азота и летучих органических соединений в течение 2011–2013 гг. и динамики уровня загрязнения воздуха в городе позволяет дать объяснение наблюдаемому в последнее десятилетие отрицательному тренду концентрации приземного озона в виде достаточно устойчивой закономерности: в условиях Минска продолжающийся рост уровня загрязнения атмосферного воздуха приводит к снижению концентрации приземного озона.

Основными причинами такого явления являются: 1) высокое отношение концентрации выбрасываемых оксидов азота к концентрации летучих органических соединений, характерные для Беларуси, 2) умеренная интенсивность коротковолнового солнечного излучения, 3) умеренная температура воздуха и 4) повышенная влажность воздуха. Концентрация приземного озона в г. Минске в течение всего периода наблюдений (с 2004 г.) уменьшается (тренд отрицательный).

При существующей структуре антропогенных загрязнителей в атмосфере города и динамике изменения их концентраций имеет место  $\text{NO}_x$ -насыщенная (ЛОС-чувствительная) химия приземного озона, при которой увеличение антропогенных выбросов в атмосферу приводит к уменьшению концентрации приземного озона.

Сравнение концентраций озона в условиях города и в чистых районах (Березинский биосферный заповедник) подтверждает предложенный механизм взаимодействия приземного озона с другими загрязнителями атмосферы: чем выше концентрация оксидов азота, тем ниже концентрация приземного озона (рисунок 5.9). Концентрация озона в заповеднике весьма плавно меняется в течение суток, в то время как в городе глубокие провалы обусловлены дневным повышением загрязненности воздуха. Свидетельством принадлежности озона к одной и той же воздушной массе является общее подобие хода измеренных концентраций и их синхронное уменьшение после 13 апреля с последующим таким же синхронным возрастанием.

#### Мониторинг спектров и доз биологически активного солнечного УФ излучения.

В 2013 г. измерения спектров плотности энергетической освещенности (далее – СПЭО) земной поверхности солнечным излучением в спектральном диапазоне 285–450 нм проводились с помощью ультрафиолетового спектрорадиометра ПИОН-УФ и его полярной модификации ПИОН-УФ-II, разработанных в НИИЦ МО БГУ.

Измерения производились в автоматическом режиме от 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 Всемирной метеорологической организации рассчитаны значения мощностей и суточных доз различных биоэффектов (эритемы, повреждения ДНК и т.п.), а также значения УФ-индекса (рисунок 5.10).



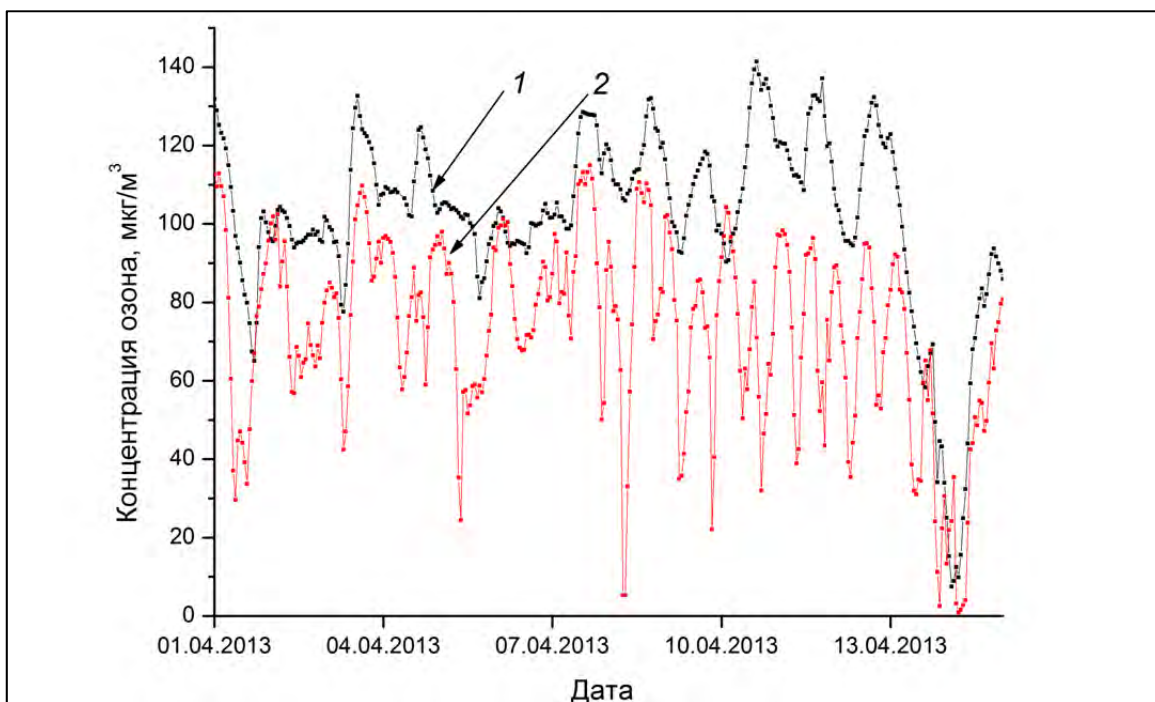


Рисунок 5.9 – Концентрация приземного озона в Березинском биосферном заповеднике (1) и в г. Минск (2) в апреле 2013 г.

#### Мониторинг общего содержания двуокиси азота в вертикальном столбе атмосферы.

С 2011 г. в Беларуси кроме измерения приземных концентраций двуокиси азота ( $\text{NO}_2$ ) проводят постоянные наблюдения за общим содержанием  $\text{NO}_2$  в столбе пограничного слоя атмосферы по спектральным измерениям рассеянного в зените солнечного излучения.

Измерения осуществляют в г. Минск (N53.85, E27.47) с помощью спектрометра изображения Oriel MS-260i, используемого в модификации, позволяющей регистрировать солнечное излучение, рассеянное из зенита атмосферы.

Годовой ход содержания  $\text{NO}_2$ , зарегистрированный в 2013 г., типичен для двуокиси азота в г. Минск. Так, зимой содержание  $\text{NO}_2$  в среднем составляет  $1,2 \cdot 10^{16}$  мол/см<sup>2</sup>, превышает летние значения ( $\sim 0,3 \cdot 10^{16}$  мол/см<sup>2</sup>) примерно в 4 раза (рисунок 5.11).

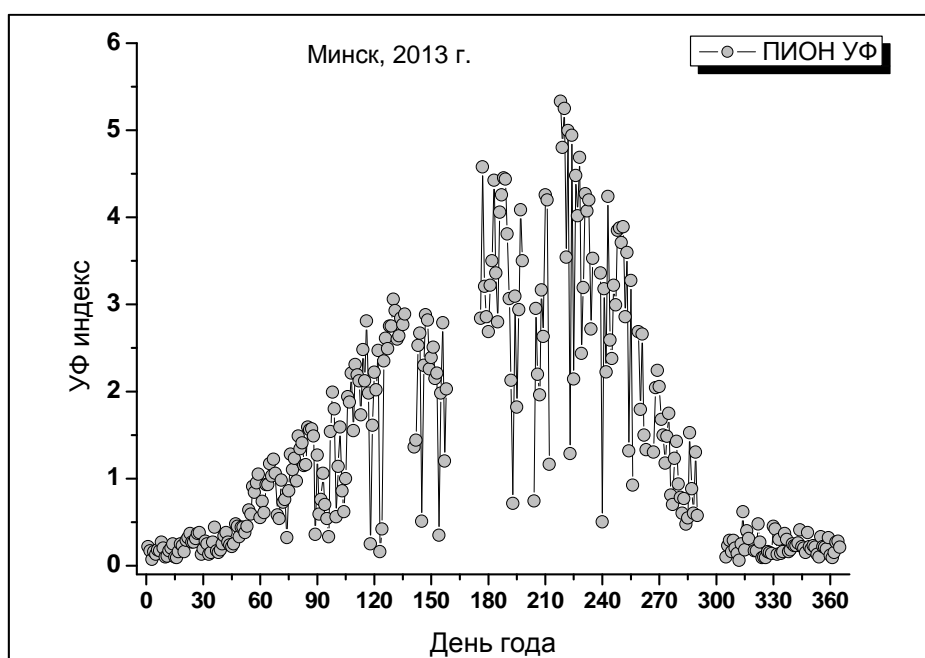


Рисунок 5.10 – Экспериментальные значения УФ-индекса, г. Минск, 2013 г.

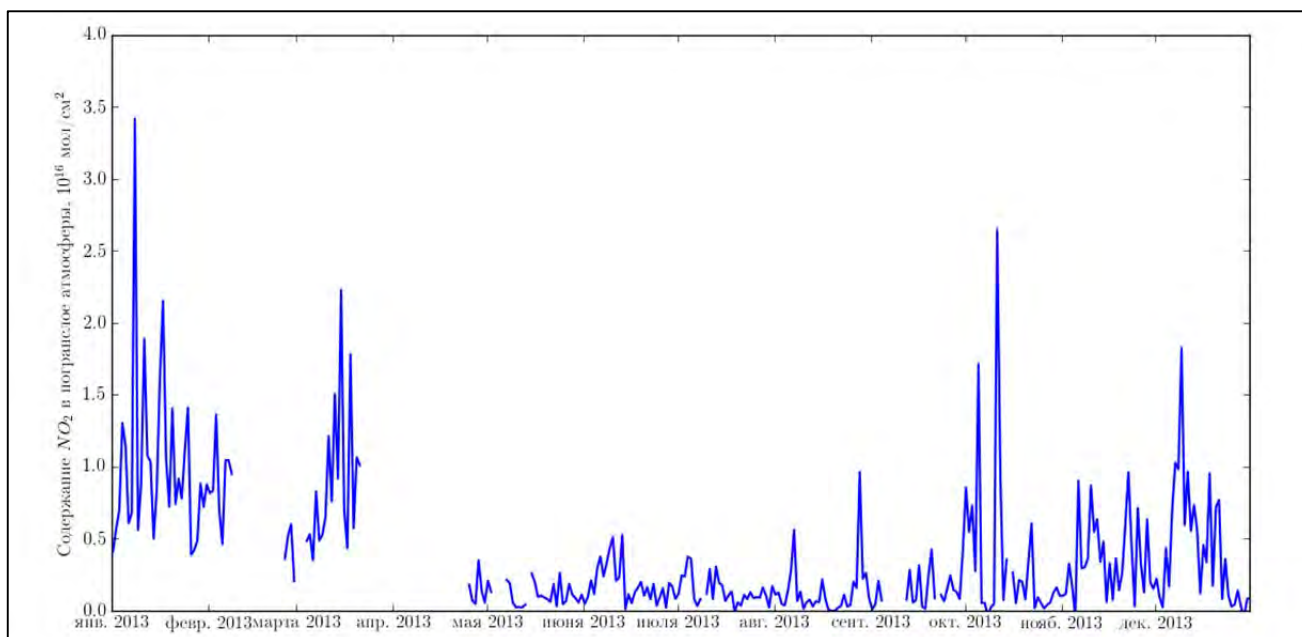


Рисунок 5.11 – Годовой ход общего содержания  $\text{NO}_2$  в вертикальном столбе атмосферы, г. Минск, 2013 г.

Повышенное содержание  $\text{NO}_2$  в зимний период обусловлено тем, что:

1. Двоокись азота – газ преимущественно антропогенного происхождения (90% выбросов которого, приходится на автотранспорт и предприятия энергетики). Поэтому, зимой, когда возрастает спрос на тепловую и электрическую энергию, резко возрастают выбросы двуокиси азота.

2. В зимний период, когда температура воздуха ниже  $0^\circ\text{C}$ , время жизни двуокиси азота значительно (3–4 раза) превышает время ночного простоя автотранспорта (6–8 часов). В результате происходит накопление окислов азота в атмосфере.

Среднее содержание  $\text{NO}_2$  за 2013 г., составляющее  $0,5 \cdot 10^{16}$  мол/см<sup>2</sup>, с точностью до погрешности измерения ( $\pm 0,1 \cdot 10^{16}$  мол/см<sup>2</sup>) совпадает со среднегодовыми значениями общего содержания  $\text{NO}_2$  в вертикальном столбе атмосферы, наблюдавшимися в предыдущие годы (2011, 2012 гг.).

#### **Выводы.**

Массив накопленных об общем содержании озона данных позволил уточнить климатическую норму ОСО и ее многолетний тренд, скорректировать прогнозный период восстановления озонового слоя – период восстановления будет продолжительнее, чем предполагалось в 2011 г.

Приземные концентрации озона в крупных городах, в результате воздействия антропогенных факторов (например, выбросов оксидов азота, летучих органических соединений: бензол, толуол, ксилол и др.) могут достигать значений, в десятки раз превышающих естественный уровень, и достаточных для ощутимого негативного влияния на живые организмы. Однако подобные случаи до настоящего времени не зафиксированы.

Анализ данных за многолетний период наблюдений (2004–2013 гг.) выявил изменчивость сезонного хода климатической нормы концентрации приземного озона. Линейная аппроксимация тренда многолетних полуденных концентраций и среднесуточных концентраций приземного озона в различные сезоны показывает устойчивое постепенное снижение концентрации приземного озона в г. Минске. Указанная закономерность свойственна как полуденным, так и среднесуточным значениям концентраций и наблюдается во все сезоны года. Снижение концентрации приземного озона в городе фиксируется на протяжении всего периода наблюдений и обусловлено ухудшением экологической обстановки и изменением климата.