



5 Мониторинг ОЗОНОВОГО СЛОЯ

Мониторинг общего содержания озона

Несмотря на существенное расширение списка задач и развитие методов исследования атмосферы общее содержание озона (ОСО) по-прежнему рассматривается как один из важнейших климатических параметров и Всемирная Метеорологическая Организация (ВМО) уделяет большое внимание его изучению и мониторингу.

В первую очередь, это связано с тем, что поглощение озоном солнечной радиации в УФ и ИК областях спектра играет важную роль в радиационном и термическом балансе атмосферы. Именно фотохимические реакции образования и разрушения озона (O_3) ответственны за существование в атмосфере Земли специфического слоя – стратосферы, во многом определяющего погоду на нашей планете.

В 2013 г. основной (базовый) мониторинг ОСО проводился на Минской озонметрической станции (Минск 27.47E, 53.83N) с помощью ультрафиолетового спектрорадиометра ПИОН-УФ, разработанного в НИИЦ МО БГУ и предназначенного для измерения спектральной плотности энергетической освещенности (СПЭО) в диапазоне 285—450 нм. Определение ОСО из данных СПЭО осуществлялось модифицированным методом Стамнеса.

В июне 2013 г. ПИОН-УФ-II в качестве измерителя ОСО прошел сеанс калибровок относительно регионального стандарта – озонметра Добсона №108 в НИЦ ДЗА им. А.И. Воейкова (Ст.-Петербург, Россия).

Дополнительный (параллельный) мониторинг ОСО осуществлялся экземплярами модернизированного в НИИЦ МО БГУ фильтрового озонметра 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 проводился также на метеорологических площадках г. Гомеля и биостанции БГУ на оз. Нарочь.

Для сравнительного анализа состояния озоносферы использовались данные наземных измерений и системы орбитального базирования ОМІ.

Результаты мониторинга среднедневных значений ОСО представлены на Рисунке 1. Среднеквадратическое отклонение данных наземных измерений от спутниковых данных составляет ~4%.

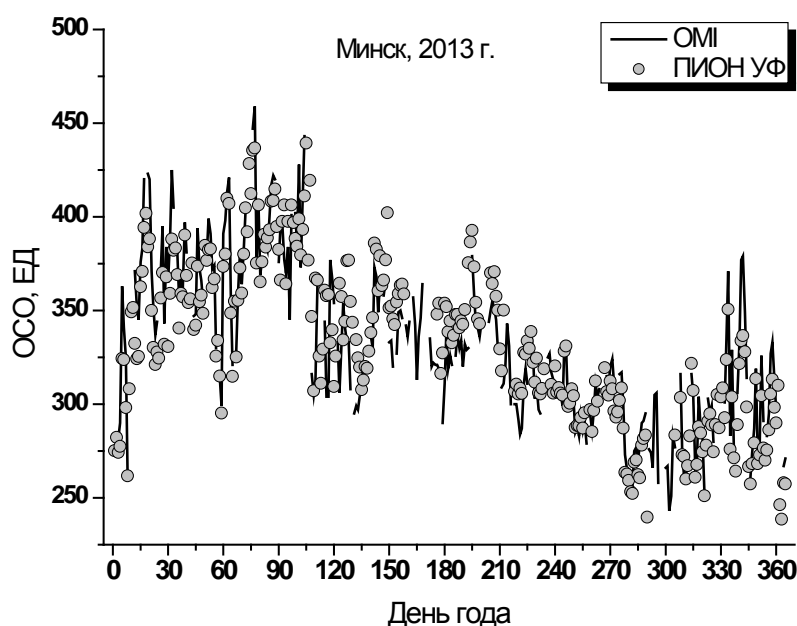


Рисунок 1 – Результаты наземных (ПИОН-УФ) и спутниковых (ОМІ) измерений ОСО в атмосфере над г. Минском в 2013 г.

Состояние озонового слоя в атмосфере над территорией Республики.

Анализ результатов наблюдений за общим содержанием озона (ОСО) в вертикальном столбе атмосферы над территорией Беларуси в 2013 г. представлен на Рисунке 2.

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).

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 наблюдалось 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.

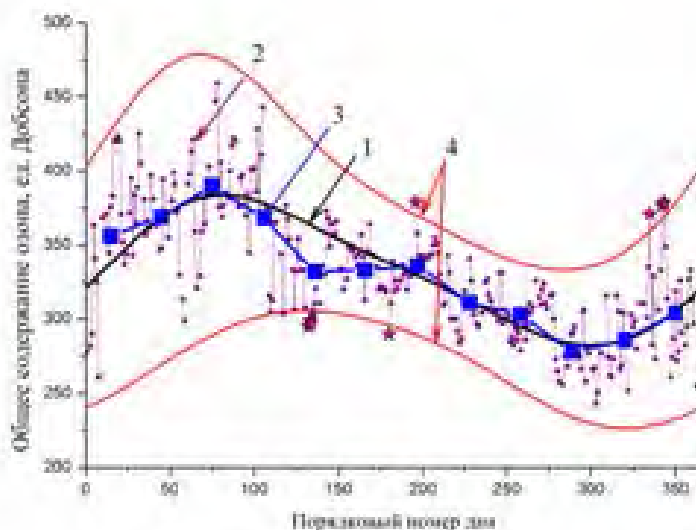


Рисунок 2. Общее содержание озона над г. Минском в 2013 г.

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. Такая работа была проведена в конце 2013 г.

Повторяющаяся из года в год циклическая составляющая климатической нормы после пересчета практически не изменилась. Некоторые модификации, однако, произошли с многолетним трендом ОСО.

На Рисунке 3 представлены графики тренда, определенного на основании наблюдений в 1979-2011 гг. и пересчитанного с учетом данных последних лет. Там же показаны среднегодовые значения результатов измерений ОСО над территорией Беларуси.

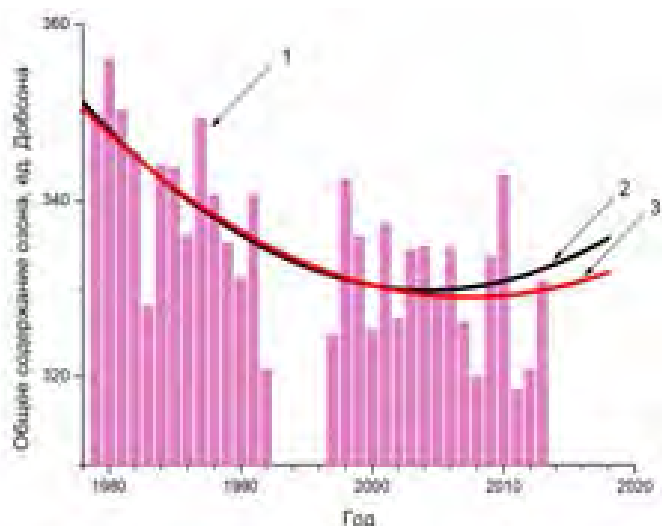


Рисунок 3. Среднегодовые значения ОСО по данным спутниковых наблюдений над г. Минском (1) и многолетние тренды, определенные на основании данных за период 1979-2011 гг. (2) и 1979-2013 гг. (3).

Как видно из рисунка, учет данных 2012-2013 гг. приводит к несколько менее оптимистичному прогнозу восстановления озонового слоя.

Так, если ранее минимум тренда ОСО приходился на 2005 г., то теперь он сместился на более позднее время (2008 г.). Соответственно менее интенсивным оказывается и ожидаемый в будущем рост ОСО.

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.

Состояние озонового слоя в атмосфере над Антарктидой.

В соответствии с принятой в Республике Беларусь государственной целевой программой «Мониторинг полярных районов Земли и обеспечение деятельности арктических и антарктических экспедиций на 2011 – 2015 годы» в 2013 году мониторинг ОСО проводился в районах базирования сезонных 5-й и 6-й Белорусских Антарктических Экспедиций (БАЭ-5 и БАЭ-6).

На Рисунках 4 и 5 представлены карта-схема пунктов наблюдения и результаты измерений среднесуточных значений ОСО в районе базирования БАЭ-6 на российской антарктической станции «Прогресс».

В течение последних более чем 20 лет в Южном полушарии ежегодно наблюдается такое явление как озоновая дыра. Ранней весной (конец августа, сентябрь) над Антарктидой начинает формироваться обширная область с малым содержанием озона, которая существует 1-1,5 месяца и которая исчезает (т.е. содержание озона в ней восстанавливается) в конце весны (конец октября - ноябрь).

Существование данного явления обусловлено особенностями циркуляции атмосферы над Антарктидой в зимнее и весеннее время и наличием на высотах стратосферы веществ антропогенного происхождения – хлорфторуглеродов (ХФУ). С наступлением зимы (середина мая) антарктическая стратосфера остывает, опускается ближе к поверхности.

Эффект Кориолиса (вызванный вращением земли) ведет к установлению сильной Западной циркуляции вокруг Южного полюса и в результате образуется полярный вихрь, который меняется в размерах из года в год.

При снижении стратосферных температур в области вихря менее -80°C происходит формирование стратосферных полярных облаков, на частицах которых с участием ХФУ происходит разрушение молекул стратосферного озона и в области занятой стратосферным полярным вихрем возникает дефицит стратосферного озона — озоновая дыра.



Рисунок 4. Карта-схема: места установки озонометров, обозначены цифрами (1 – М124-М, 2 – ПИОН-УФ-П).

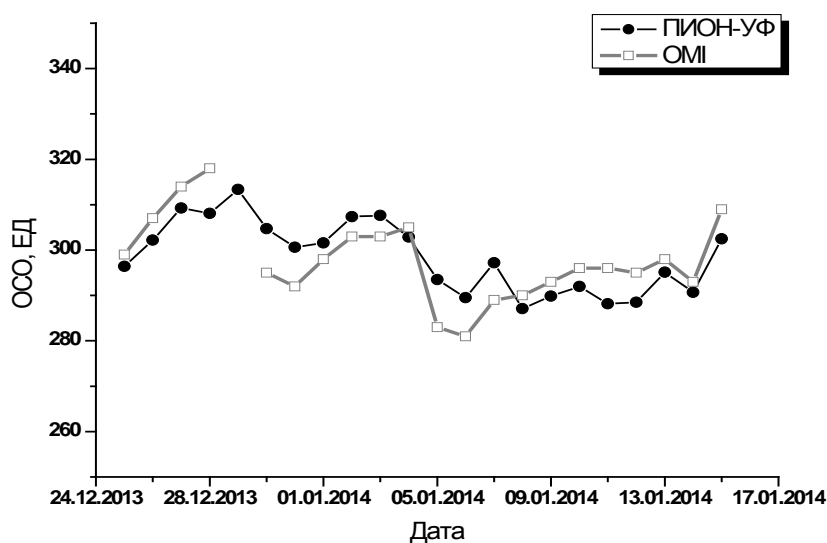


Рисунок 5. Результаты измерения ОСО спектрометрией ПИОН-УФ-П (ст. «Прогресс», Антарктида). Для сравнения приведены данные орбитальной системы ОМІ.

По мере прогрева стратосферы весной, при увеличении длительности солнечной инсоляции, озоновая дыра постепенно затягивается, озон в стратосфере восстанавливается за счет фотохимических процессов. Однако в годы, когда дефицит озона был особенно велик (2000, 2003), потери озона были столь значительны, что озон полностью не успевал восстановиться, происходило обеднение атмосферного озонового слоя в глобальном масштабе.

В 2013 г. озоновая дыра над Антарктидой наблюдалась в очередной раз. Согласно спутниковым данным площадь озоновой дыры над Антарктидой в 2013г. достигла максимума 24,0 млн. км² 16 сентября.

Размеры области с дефицитом озона в пошедшем году больше чем в 2012 и 2010 гг., но меньше чем в 2011. Дефицит массы озона, усредненный за последнюю декаду сентября, составил 19.59 мегатонн, больше, чем в 2010 и 2012 года, но меньше, чем в 2011.

За весь период наблюдения данного явления только в течение 2002, 2004, 2010, 2012 гг. наблюдались меньшие по площади и глубине аномалии.

Иногда, условия для уничтожения озона, подобные тем, которые формируются над Антарктикой, возникают в Арктике. Над Северным полюсом тоже формируется стратосферный полярный вихрь, стратосфера в котором может охлаждаться до температур достаточно низких для формирования стратосферных полярных облаков.

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.

Весной 2013 г. распределение полей озона над Арктикой было близко к многолетним средним значениям.

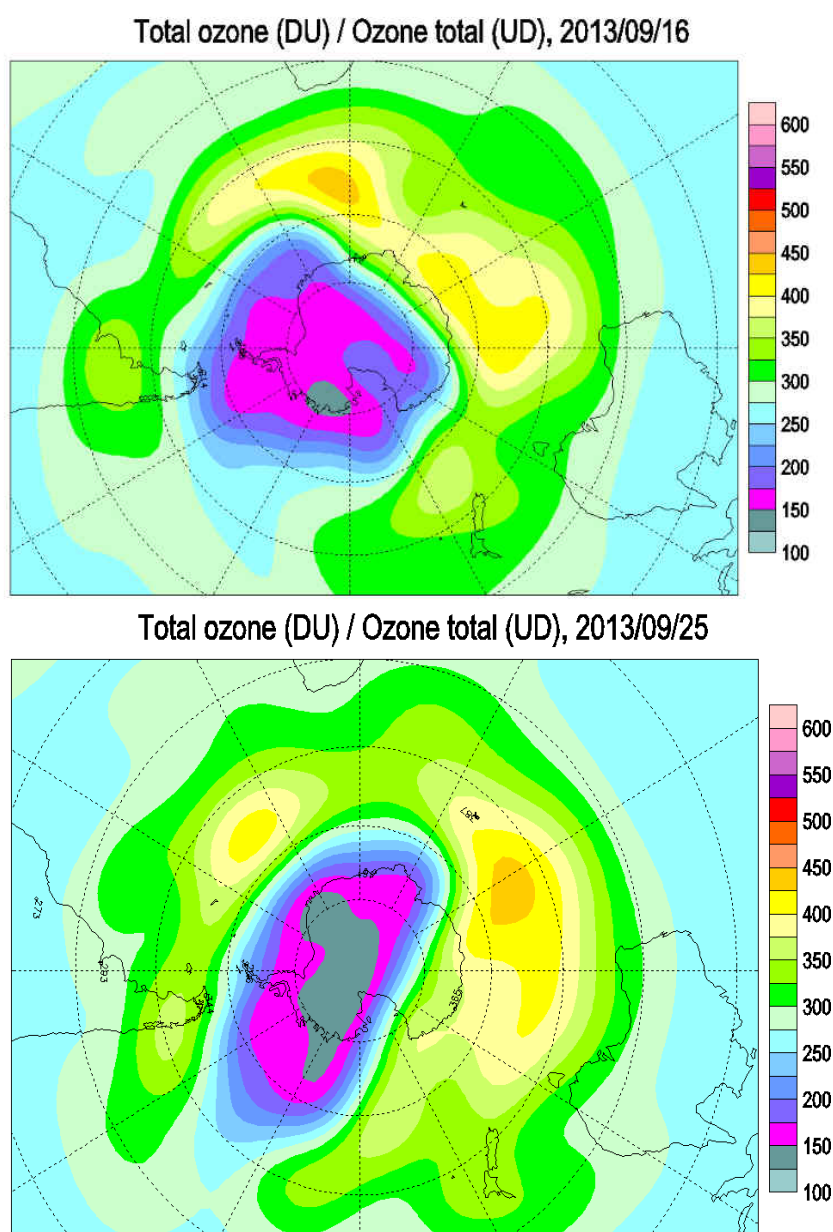


Рисунок 6. Распределение полей озона над Антарктидой 16 и 25 сентября 2013г. Рядом приведена цветовая шкала в единицах Добсона (UD)

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 целого ряда 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 Национального научно-исследовательского центра мониторинга озоносферы Белгосуниверситета (ННИЦ МО БГУ) с использованием разработанного в ННИЦ МО оптического трассового измерителя озона ТрИО-1.

Кроме озонметрической станции ННИЦ МО, расположенной на территории филиала БГУ (ул. Курчатова, 7), в настоящее время в г. Минске действуют еще 4 пункта наблюдений Комитета по гидрометеорологии, ведущие измерения концентраций озона, оксидов углерода и азота, диоксида серы, летучих органических соединений (бензола, толуола, ксилола) и аэрозольных частиц. Пункт №1 расположен в районе Обсерватории, пункт №4 - по ул. Тимирязева, 23, пункт №11 - по ул. Корженевского (з-д «Интеграл») и пункт №13 по адресу ул. Радиальная, 50 (Дражня).

На Рисунке 7 представлены результаты проведенных в ННИЦ МО БГУ измерений концентрации приземного озона в полуденное время суток в 2013 году. Показаны также соответствующие среднемесячные значения.

Полуденные значения хорошо коррелируют со среднесуточными значениями, но, очевидно, отличаются по амплитуде. Весенний озонный максимум в 2013 г. пришелся на апрель, а летний максимум выражен весьма слабо.

Более детальные и непрерывные измерения велись в г. Минске на пунктах наблюдений Департамента по гидрометеорологии, а также в других городах Республики и в Березинском биосферном заповеднике.

Ввиду сильной чувствительности озона к метеоусловиям и загрязнению воздуха, результаты измерений даже в пределах одного города несколько различаются. Ясно, что в такой ситуации причиной является разница в степени загрязнения воздуха в различных районах города.

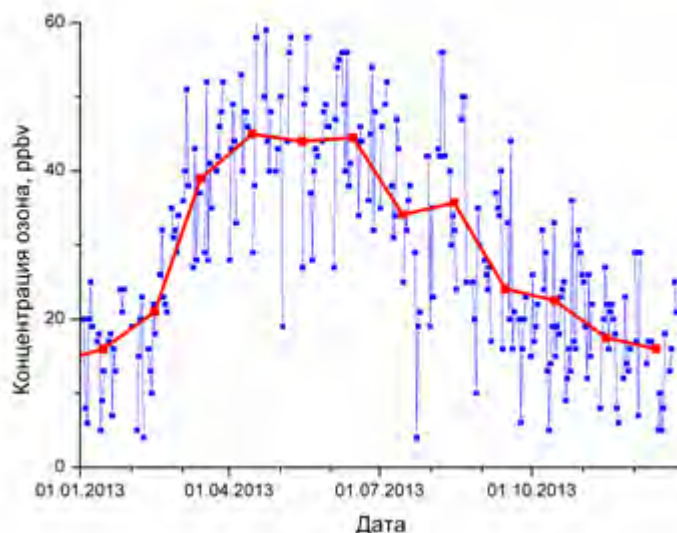


Рисунок 7. Полуденные значения концентрации приземного озона, измеренные в 2013 г. в ННИЦ МО. Показаны также их среднемесячные значения.

Среднемесячные значения измерений на 4-х пунктах наблюдений Департамента по гидрометеорологии в г. Минске и в Березинском биосферном заповеднике приведены на Рисунке 8.

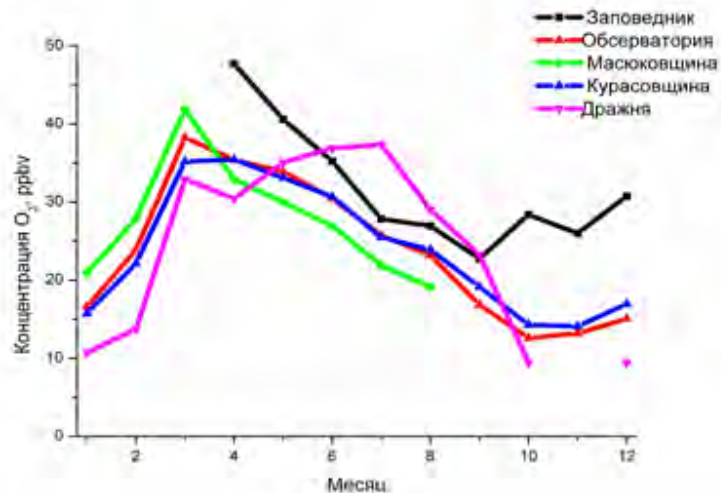


Рисунок 8. Среднемесячные значения концентрации приземного озона по данным наблюдений в Березинском биосферном заповеднике и на пунктах Департамента по гидрометеорологии в г. Минске.

Видно, что более чистая атмосфера заповедника обуславливает более высокие концентрации приземного озона.

Анализ показывает, что на концентрацию приземного озона определяющее влияние оказывают оксиды азота: чем выше концентрация последних, тем меньше концентрация озона у поверхности земли.

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.

В качестве примера на Рисунке 9 приведены среднемесячные концентрации диоксида азота на 4-х пунктах наблюдений Департамента по гидрометеорологии в г. Минске.

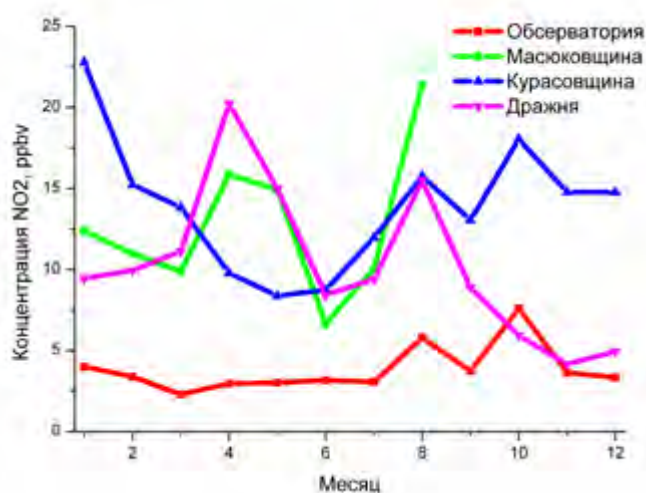


Рисунок 9. Среднемесячные концентрации диоксида азота в 2013 г. на разных пунктах наблюдений Департамента по гидрометеорологии в г. Минске

Сравнение с Рисунком 8 показывает, что повышенным концентрациям диоксида азота обычно соответствуют пониженные концентрации озона.

Отсутствие однозначного соответствия объясняется тем, что озон участвует в реакциях также и с рядом других загрязнителей атмосферы.

Климатология приземного озона

Анализ поведения некоторой характеристики атмосферы за конкретный период базируется на сравнении данных наблюдений с климатической нормой этой характеристики. Традиционно под климатической нормой параметра атмосферы подразумевается его многолетнее среднее 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 быстро меняющегося климата.

Ввиду важной роли климатической нормы в анализе вариаций и долговременных изменений концентрации приземного озона, а также в прогнозе его поведения в будущем, ниже представлены результаты оценки климатической нормы приземного озона для города Минска.

Совокупность исходных данных, использованных для расчета нормы, включает в себя результаты измерений (2004-2013 гг.) на озонметрической 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 круглосуточные измерения на 4-х пунктах Департамента по гидрометеорологии в г. Минске (2011-2013 гг.).

В качестве дополнительных использованы данные литовской станции Преяла (LT15 по классификации ЕМЕР) (2000-2010 гг.), показывающие весьма близкие к минским результаты наблюдений.

Положительный эффект использования дополнительных данных сводится к некоторой стабилизации поведения климатической нормы приземного озона при экстраполяции в прошлое (годы, предшествующие началу измерений в Минске) и практически не сказывается на поведении рассчитанной нормы в будущем.

Рисунок 10 демонстрирует отличие климатической нормы приземного озона для Минска, рассчитанной на 10.00 GMT (местный полдень), от классического представления (многолетнее среднее полуденных значений концентрации).

Как видно из рисунка, в многолетнем среднем отчетливо проявляются весенний и летний максимумы, в то время как рассчитанная климатическая норма показывает наличие ярко выраженного летнего максимума только в начале периода наблюдений. Затем летний максимум становится менее заметным и исчезает к концу периода. Многолетний тренд (линейная 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.

Во-первых, 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.

Во-вторых, на концентрацию озона влияет целый ряд местных факторов. Это – погодные условия (в дождливую погоду концентрация резко падает), загрязнение атмосферы антропогенными выбросами (в первую очередь, оксидами азота и летучими органическими соединениями), интенсивность вертикального перемешивания атмосферы (в более высоких слоях тропосферы концентрация озона выше) и скорость осадения 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.

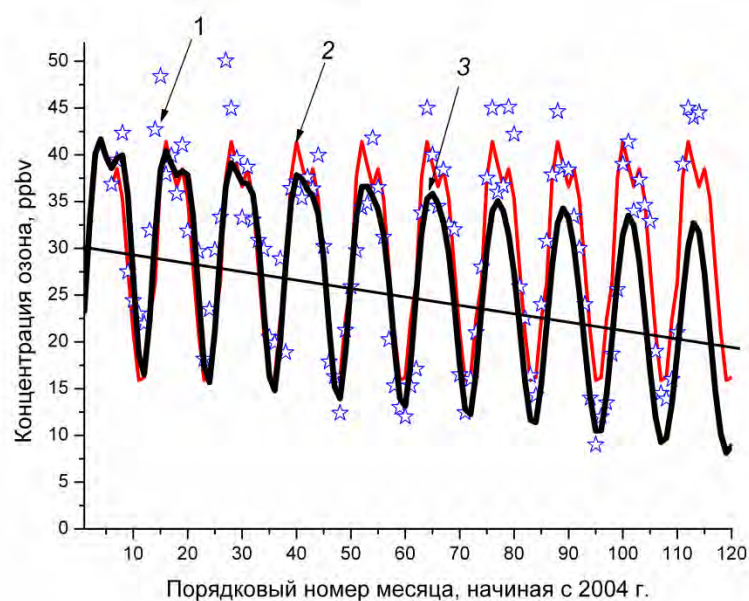


Рисунок 10. Среднемесячные значения полуденных измерений концентрации приземного озона на станции ННИЦ МО в г. Минске за весь период наблюдений (1), многолетние среднемесячные значения полуденных концентраций (2) и климатическая норма полуденной концентрации приземного озона (3). Прямой линией показан линейный тренд.

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.

Наверное, можно сказать, что рассчитанная норма приземного озона соответствует некой средней погоде в данный период и среднему уровню загрязнения приземного воздуха, характерному для данного периода и данной местности.

На Рисунке 11 показан случай достаточно хорошего соответствия измеренных концентраций полученной климатической норме.

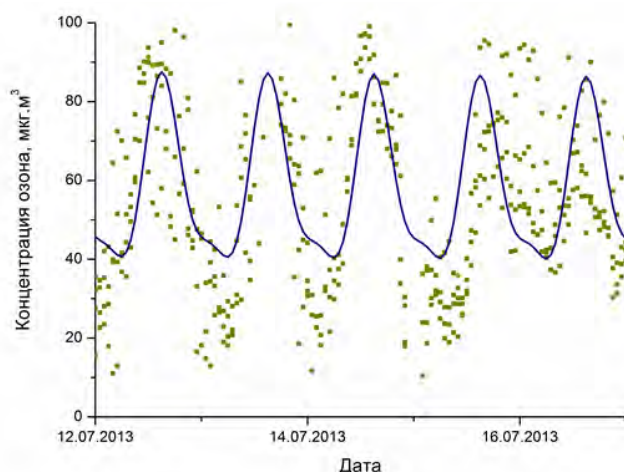


Рисунок 11. Климатическая норма приземного озона в июле 2013 г. и результаты измерений различными приборами.

Озонная климатическая норма демонстрирует выраженную изменчивость сезонного хода концентрации озона в течение периода наблюдений (Рисунок 12).

В 2004 г. четко выражены два сезонных максимума. Однако уже в 2008 г. пропадает второй максимум в полуденное время (10.00 GMT). А в 2013 г. второй сезонный максимум сохраняется только ранним утром (3.00 GMT) и отсутствует во все другие сроки.

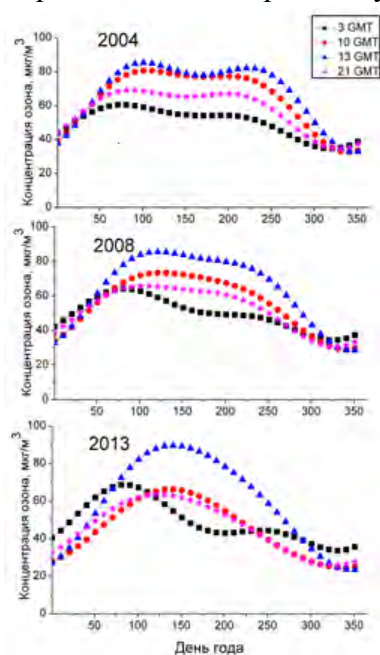


Рисунок 12. Норма сезонного хода концентрации приземного озона в разные годы и в разное время суток. Время по Гринвичу.

Утренний весенний максимум концентрации в 2004 году 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 13).

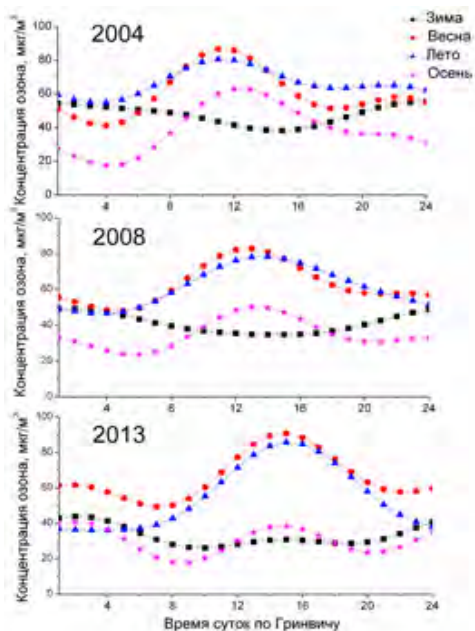


Рисунок 13. Изменение суточного хода концентрации приземного озона в различные сезоны за период наблюдений.

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.

Из рисунка также видно, что суточный ход летом мало отличается от весеннего, 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.

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 14).

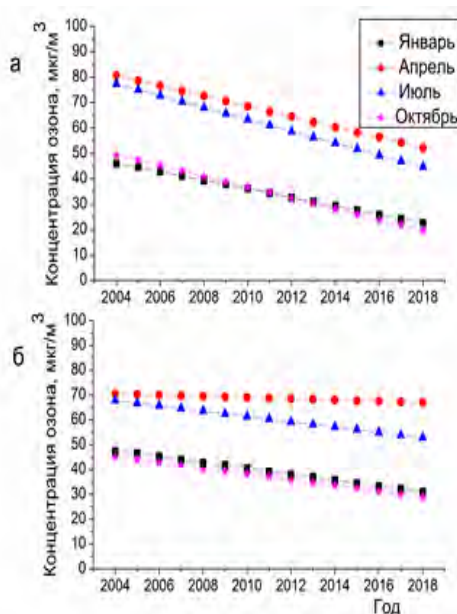


Рисунок 14. Многолетние тренды полуденных концентраций приземного озона в различные сезоны (вверху). То же для среднесуточных концентраций (внизу).

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.

Похоже, что 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 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 концентрации приземного озона в городе фиксируется на протяжении всего периода наблюдений и обусловлено ухудшением экологической обстановки и изменением климата.

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 NO_x -насыщенная (ЛЮС-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 15).

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.

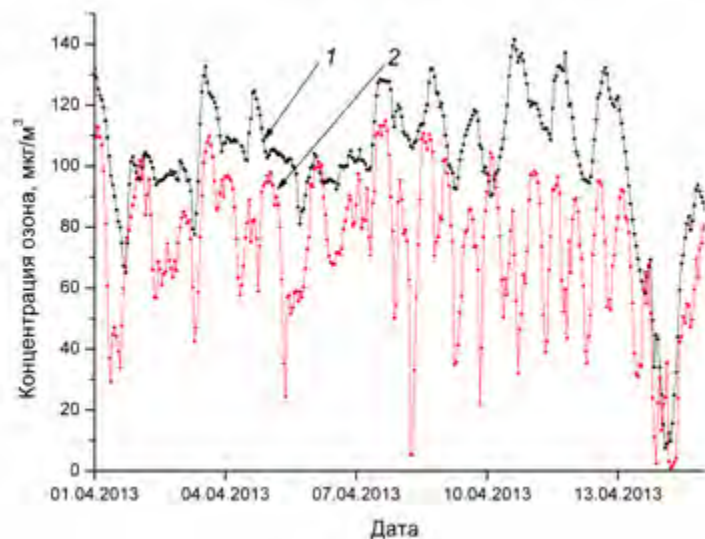


Рисунок 15. Концентрация приземного озона в Березинском биосферном заповеднике (1) и Минске в апреле 2013 г. (2). Увеличение концентрации диоксида азота в городе приводит к понижению концентрации приземного озона.

Мониторинг спектров и доз биологически активного солнечного УФ излучения

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

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

На Рисунке 16 показано распределение УФ индекса, полученное обработкой спектров, измеренных на Минской озонометрической станции (НИИЦ МО БГУ) в 2013 г.

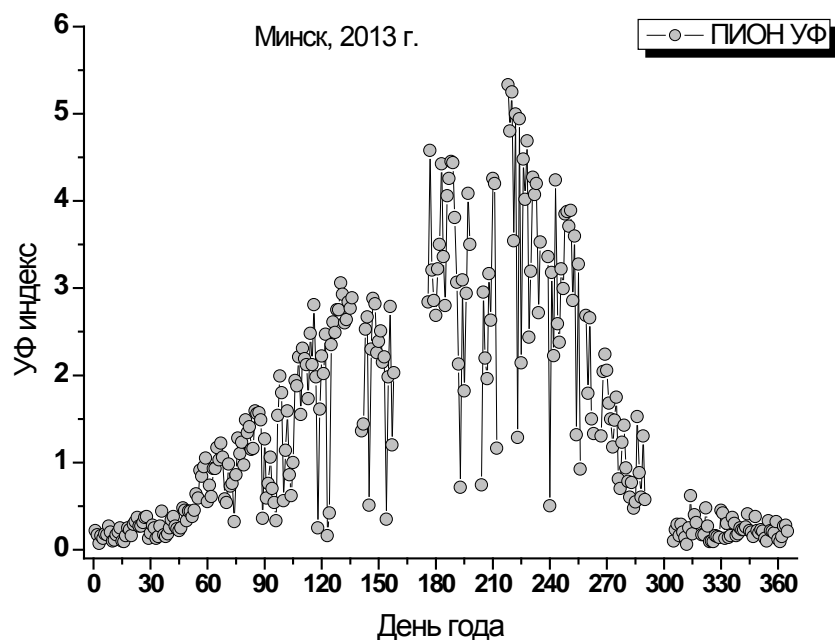


Рисунок 16 - Экспериментальные значения УФ индекса, г. Минск, 2013 г.

Аналогичные измерения мощностей и доз биологического эффекта «эритема» и УФ индекса в 2013 г. проводились в Гомельском университете и на биостанции оз. Нарочь с помощью фильтровых фотометров ПИОН-Ф, разработанных в НИИЦ МО БГУ специально для целей сетевого мониторинга УФ излучения.

Мониторинг СПЭО с помощью спектрорадиометра ПИОН-УФ-II проводился также в районе базирования 5-й и 6-й сезонных Белорусских Антарктических Экспедиций (БАЭ-5 и БАЭ-6).

На Рисунке 17 приведены результаты измерения УФ индекса в районе базирования БАЭ-6, Российская ст. «Прогресс», Антарктида.

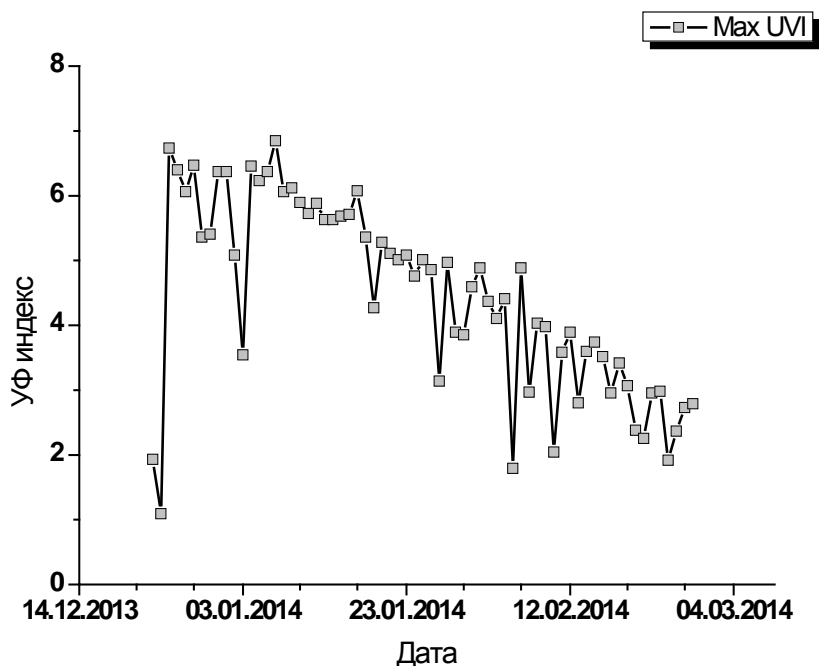


Рисунок 17 - Экспериментальные значения максимального УФ индекса, БАЭ-6 (2013-2014 г.) ст. «Прогресс», Антарктида

Как видно из Рисунка 16, значения УФ индекса в конце декабря 2013 г. – начале января 2014 г. в районе БАЭ превышали безопасный предел – 6, что требовало от участников БАЭ соблюдения дополнительных мер безопасности (особенно для глаз).

Мониторинг общего содержания двуокиси азота в вертикальном столбе атмосферы
С 2011 года в Беларуси кроме измерения приземных концентраций двуокиси азота (NO_2) проводятся постоянные наблюдения за общим содержанием NO_2 в столбе пограничного слоя атмосферы по спектральным измерениям рассеянного в зените солнечного излучения.

Измерения введутся в г. Минске (N53.85, E27.47) с помощью спектрометра изображения Oriol MS-260i фирмы Andor, используемого в модификации прибора позволяющей регистрировать солнечное излучение, рассеянное из зенита атмосферы.

Модификация проведена специалистами НИИЦ МО БГУ, Минск, Беларусь.

Технические характеристики данного прибора: спектральный диапазон: 330-380, 430-495нм, спектральное разрешение: 0.7нм, входная апертура: 9° , направление визирования: зенит (90° относительно горизонта). Приемник излучения ПЗС матрица 1024*256.

Прибор валидирован по региональному эталону NDACC, Звенигород, Московская область, Россия. Прибор входит в состав сети однотипных приборов, участвующих в синхронном измерительном эксперименте: Минск НИИЦ МО БГУ, МГУ Москва, ИФА Москва, Звенигород, Зотино.

Для восстановления содержания NO_2 в вертикальном столбе пограничного слоя атмосферы используется зенитный метод. Геометрия наблюдения, используемая для восстановления содержания NO_2 , представлена на Рисунке 18.

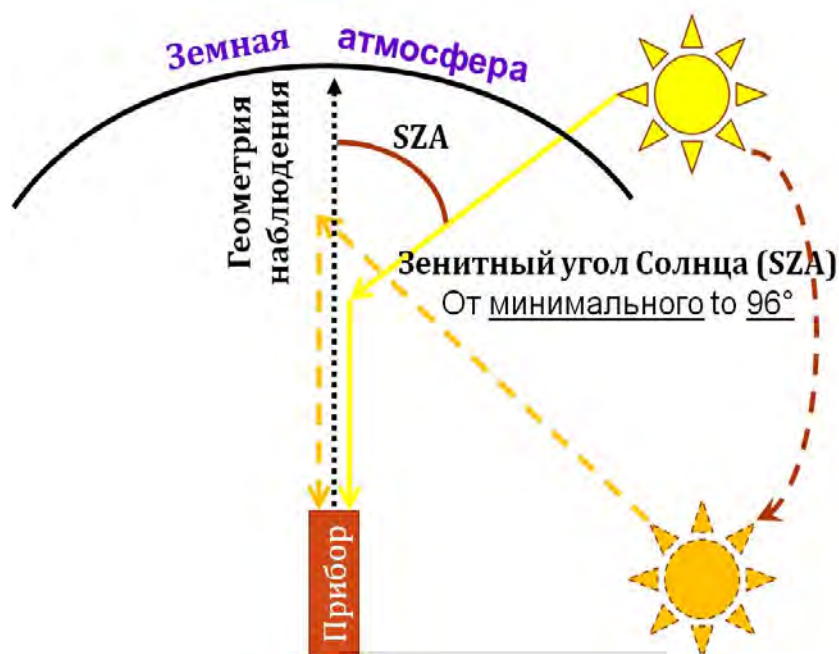


Рисунок 18. Геометрия наблюдения, используемая при восстановлении содержания NO_2 .

Алгоритм восстановления содержания NO_2 в пограничном слое атмосферы (ПСА) состоит из следующих блоков:

1. Определение наклонного содержания NO_2 ($X_{\text{атм}}$) во всей толще атмосферы днем и в сумерки с помощью метода дифференциальной спектроскопии DOAS.
2. Восстановление профиля содержания NO_2 в стратосфере по сумеречным наблюдениям ($n_{\text{стр}}$).

3. Расчет наклонного содержания NO_2 в стратосфере $X_{\text{стр}}$, из полученного на предыдущем этапе профиля содержания NO_2 :

$$X_{\text{стр}} = \sum m_{\text{стр}} \cdot n_{\text{стр}}$$

где $m_{\text{стр}}$ — коэффициент воздушной массы для слоя стратосферы.

4. Аппроксимация стратосферного содержания NO_2 между утренними и вечерними сумерками с помощью фотохимической модели $\text{chem}(\dots)$:

$$X_{\text{стр}}^{\text{день}} = \text{chem}(X_{\text{стр}}^{\text{утро}}, X_{\text{стр}}^{\text{вечер}}).$$

5. Решение основного уравнения зенитного метода, относительно содержания NO_2 в пограничном слое атмосферы (пПСА):

$$X_{\text{атм}} - X_{\text{стр}}^{\text{день}} = X_{\text{ПСА}} = \int m_{\text{ПСА}}(h, A, h_{\text{cld}}, \tau) \cdot n_{\text{ПСА}}(h) \cdot dh,$$

где $m_{\text{ПСА}}$ — воздушная масса для ПСА, рассчитываемая с использованием данных об атмосфере и поверхности Земли; h - высота ПСА, A - альbedo земной поверхности, h_{cld} - высота нижней границы облачности, τ - оптическая толщина облачности.

6. Восстановление вертикального содержания NO_2 в ПСА:

$$V_{\text{ПСА}} = \int n_{\text{ПСА}}(h) \cdot dh.$$

Ход изменения общего содержания NO_2 в атмосфере, зарегистрированный в 2013 г. на Минской озонометрической станции представлен на Рисунке 19.

Годовой ход содержания NO_2 , зарегистрированный в 2013 году типичен для двуокиси азота в Минском регионе. Так, зимой содержание NO_2 в среднем $1.2 \cdot 10^{16}$ мол/см², превышает летние значения примерно в 4 раза (летние значения $\sim 0.3 \cdot 10^{16}$ мол/см²).

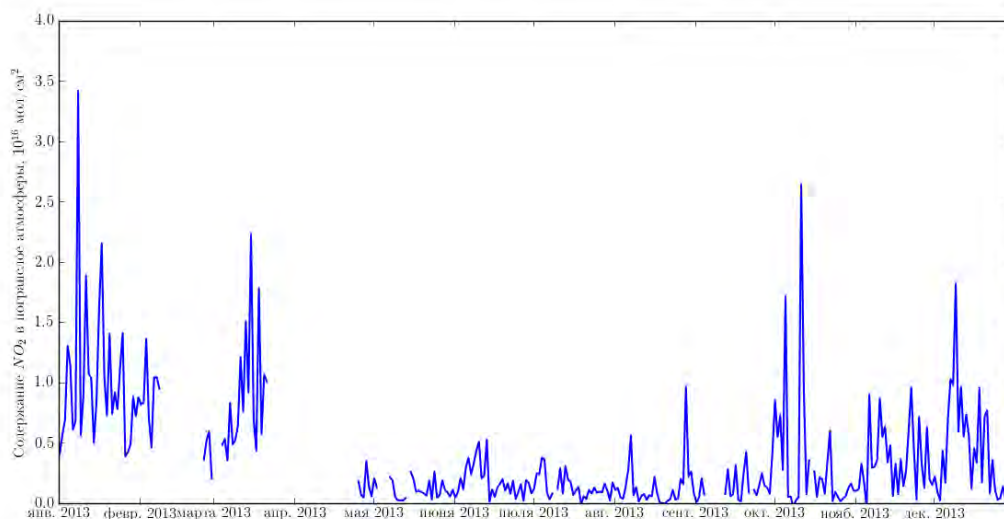


Рисунок 19. Годовой ход общего содержания NO_2 в вертикальном столбе атмосферы. Минск, 2013 г.

Повышенное содержание NO_2 в зимний период по нашему мнению объясняется двумя причинами:

1. Двуокись 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°C, время жизни двуокиси азота значительно (3-4 раза) превышает время ночного простоя автотранспорта(6-8часов). В результате происходит накопление окислов азота в атмосфере.

Среднее содержание NO₂ за 2013 год, $0.5 \cdot 10^{16}$ мол/см² с точностью до погрешности измерения ($\pm 0.1 \cdot 10^{16}$ мол/см²) совпадает со среднегодовыми значениями общего содержания NO₂ в вертикальном столбе атмосферы, наблюдавшимися в предыдущие годы (2011, 2012 гг.).