

A satellite view of Earth from space, showing the Western Hemisphere. The Americas are visible in the center, with the Atlantic Ocean to the east and the Pacific Ocean to the west. The image is overlaid with a light purple grid.

# МОНІТОРИНГ ОЗОНОВОГО СЛОЯ

5

**Мониторинг озонового слоя** в Республике Беларусь регламентирован Законами Республики Беларусь и проводится в рамках реализации программы НСМОС.

В 2010 г. на Минской озонометрической станции ННИЦ МО БГУ проводились регулярные измерения общего содержания озона в столбе атмосферы (ОСО), концентраций приземного (тропосферного) озона, а также уровней и спектров приземного солнечного УФ излучения. С июня 2010 г. в режиме мониторинга измерялось общее содержание диоксида азота (ОСДА) по методике DOAS при регистрации рассеянного излучения из зенита небесной сферы.

Измерения вертикальных профилей распределения ОСО проводились на лидарной станции Института физики НАН Беларуси.

В 2010 г. *мониторинг общего содержания озона* (ОСО, Total Ozone) осуществлялся несколькими приборами, использующими различные методики измерения.

Основной (базовый) мониторинг ОСО проводился с помощью ультрафиолетового спектрометра ПИОН-УФ, предназначенного для измерения спектральной плотности энергетической освещенности (СПЭО) в диапазоне 285-450 нм. Определение ОСО из данных СПЭО осуществлялось методом Стамнеса. Важным преимуществом этого метода по сравнению с классическим методом «по прямому солнцу» является возможность проведения измерений при наличии облачности, экранирующей прямое излучение солнечного диска, что существенно для получения максимально длинных, непрерывных рядов натуральных наблюдений особенно в погодных условиях, характерных для Беларуси.

Трехлетний опыт проведения мониторинга ОСО показал, что реализация метода

Стамнеса на базе ультрафиолетового радиометра ПИОН-УФ, даже без специального учета влияния атмосферных параметров (например, наличия облачности, аэрозолей и т.п.), позволяет обеспечить точность измерения среднедневных значений ОСО в пределах  $\pm 3 \div 4\%$ .

Дополнительный (параллельный) мониторинг ОСО осуществлялся модернизированным в ННИЦ МО БГУ фильтровым озонометром М-124М, реализующим методики измерений «по прямому солнцу» (Direct-Sun) и «из зенита неба» (Zenith-Sky).

На рисунке 5.1 представлены данные, полученные спектрометрическим ПИОН-УФ с использованием двух пар длин волн (323.5/305.5 и 329/308.9 нм). Среднее относительное отклонение результатов наземных измерений ОСО от данных спутника OMI в 2010 г. не превысило 5%.

Особенностью 2010 года является заметное расхождение результатов спутниковых и наземных измерений ОСО в весенне-летний период. Наблюдаемое различие, вероятно, обусловлено выбросом большого количества мелкодисперсного аэрозоля в атмосферу Земли в результате весеннего извержения вулкана в Исландии. При спутниковых и наземных измерениях используются различные методики восстановления значений ОСО (спутниковые системы анализируют сигнал обратного рассеяния, а наземные системы – суммарное излучение, достигающее поверхности Земли) и поэтому, в зависимости от распределения аэрозолей в атмосфере и используемой процедуры учета

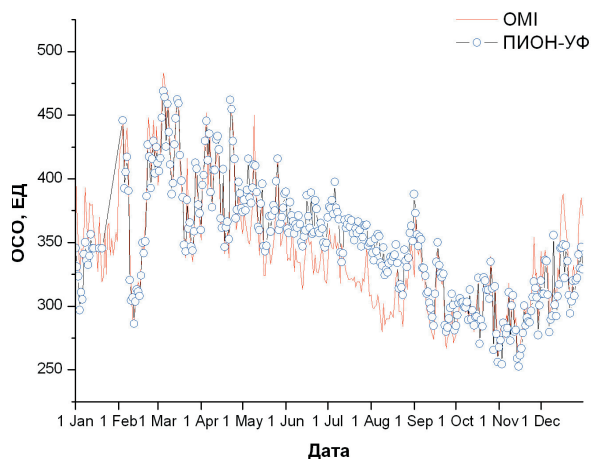


Рисунок 5.1 – Результаты наземных - 1 (ПИОН-УФ) и спутниковых - 2 (ОМІ) измерений ОСО в г. Минск, 2010 г.

аэрозольной составляющей, возможно существенное расхождение результатов. Всего в процессе мониторинга ОСО за 2010 г. измерено и обработано свыше 30 тыс. спектров.

Анализ временных рядов общего содержания озона для регионов Республики Беларусь показал, что вся территория республики, как правило, находится в однородных областях озоносферы. Поэтому характерные для 2010 г. черты динамики озоносферы над территорией Беларуси рассмотрены с использованием данных для г. Минск.

Среднемесячные значения ОСО для последних трех лет и климатическая норма для г. Минск представлены на рисунке 5.2.

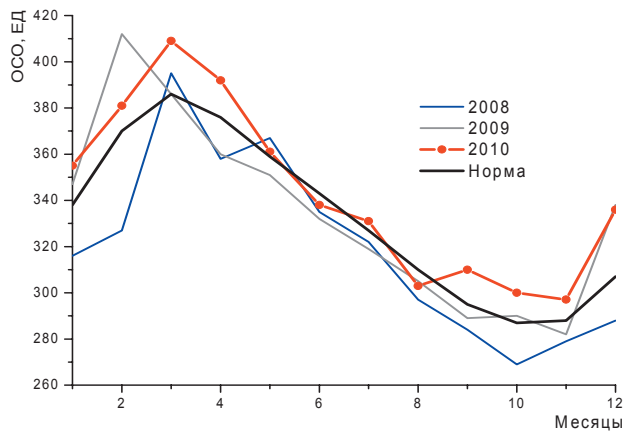


Рисунок 5.2 – Среднемесячные значения ОСО за 2008-2010 гг. и климатическая норма для г. Минск

В отличие от предыдущих лет, для всего года характерно отсутствие дефицита озона, который в последнее десятилетие ежегодно наблюдался летом и осенью. В 2010 г. среднемесячные значения летом соответствовали климатической норме и только в августе

зарегистрировано среднемесячное значение на 2,2% ниже нормы. В периоды с января по апрель и с сентября по декабрь среднемесячные значения ОСО превышали климатические значения на 6,0-9,5%.

Повышенные среднемесячные значения ОСО зимой и осенью были связаны с формированием в средних и полярных широтах, преимущественно в Европейском секторе Атлантического океана, очень больших областей, в которых содержание озона иногда на 40-45% превышало многолетние средние значения. Чаще всего атмосферные циркуляционные процессы протекали таким образом, что наша республика оказывалась под влиянием таких областей или их края (рис. 5.3).

Как правило, такие области – положительные озоновые аномалии – существуют длительное время и отличаются малой (по сравнению с отрицательными озоновыми аномалиями) подвижностью. Поэтому и межсуточная изменчивость ОСО зимой и в начале весны была несколько меньше, чем в этот же период в предшествующие годы.

Следует отметить, что для озоносферы всего Северного полушария в 2010 г. в течение зимне-весеннего периода и осенью было характерно возникновение большого количества положительных озоновых аномалий и относительно небольшого числа отрицательных. Причем отрицательные озоновые аномалии формировались большей частью не в Европейском секторе Атлантического океана, как в предыдущие годы, а над Северной Америкой и над азиатско-тихоокеанским сектором полушария.

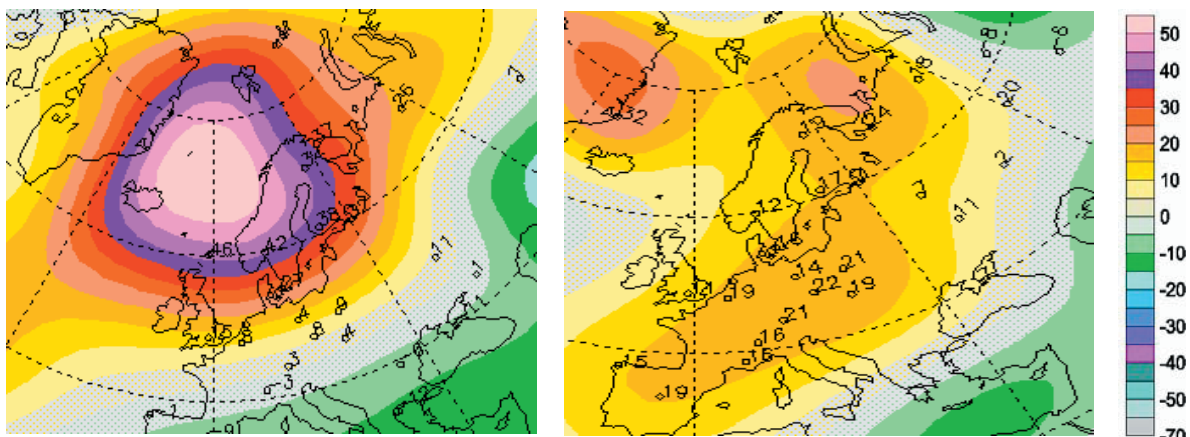


Рисунок 5.3 – Положительные озоновые аномалии 22.02.10 г., 06.03.10 г. (показано отклонение от климатической нормы, в процентах)

Количество отрицательных аномалий (озоновых мини-дыр), наблюдавшихся над Европой в 2010 г., меньше, чем в предыдущие годы (15 и 18, соответственно). Поскольку над территорией нашей страны наблюдаются отрицательные озоновые аномалии, формирующиеся в Атлантике, то прошедший год был относительно спокойным. Только с 09 по 15 февраля ОСО были ниже климатической нормы на -23%-15%. Необычным был район формирования аномалии – она сформировалась над Восточной Европой в районе Восточно-Европейской равнины.

Годовой максимум общего содержания озона в 2010 г. наблюдался, как обычно, в марте, тогда же имело место и максимальное среднедневное значение ОСО: 4 марта общее содержание озона составило над г. Минск 483 ЕД.

Годовой минимум был смещен с октября на ноябрь, минимальное за год среднедневное значение ОСО наблюдалось 30.10.10 г. и составляло 261 ЕД. Это значение (всего на 7% ниже климатической нормы) не было связано с какой-либо отрицательной озоновой аномалией.

На рисунках 5.4 и 5.5 представлены ряды среднесуточных значений ОСО за периоды 1979-1992 гг. и 1997-2010 гг. и климатические нормы для каждого отдельного 12-летнего временного ряда.

Снижение содержания озона в атмосфере над территорией республики, наблюдавшееся в 80 и 90-годы, замедлилось, начиная с 2000 г. Отрицательный тренд ОСО характерен для всех сезонов, но особенно четко выражен в летние месяцы.

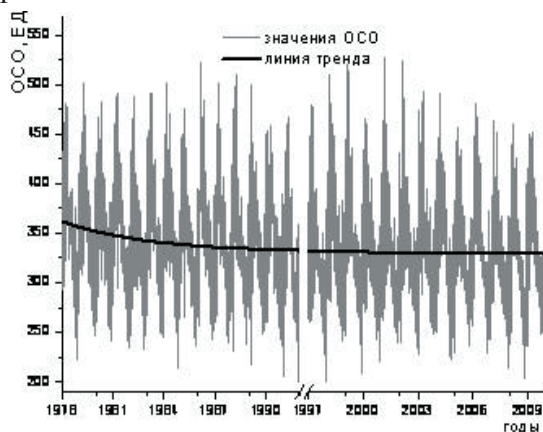


Рисунок 5.4 – Многолетний ход среднесуточных значений ОСО для г. Минск за 1979-1992, 1997-2010 гг.

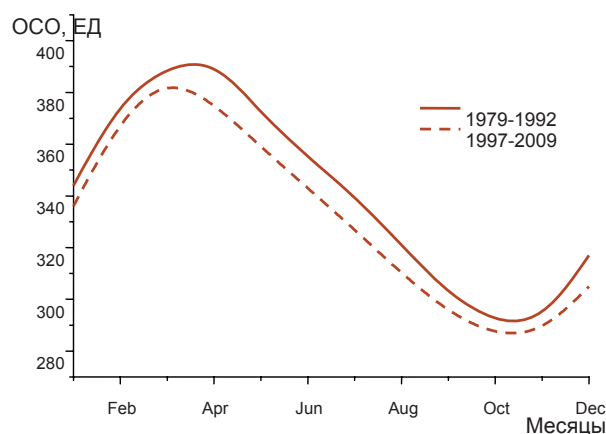


Рисунок 5.5 – Климатическая норма за периоды 1979-1992, 1997-2009 гг.

Необходимо отметить, что с середины 90-х годов произошло смещение годового максимума на более ранние сроки. Если в 80-е годы максимальные среднемесячные значения наблюдались в апреле, то, начиная с середины 90-х, годовой максимум смещается на март. Так как основную роль в формировании полей ОСО играют циркуляционные процессы, то, очевидно, что сдвиг годового максимума свидетельствует об изменении характера макроциркуляции атмосферы над территорией республики.

Минимальные среднемесячные значения для обоих рассматриваемых периодов приходятся на октябрь-ноябрь.

В период 1979-1997 гг. наблюдался значительный отрицательный тренд по количеству дней с меридиональной северной циркуляцией, в марте, наоборот, – усиление меридиональной северной циркуляции.

Сопоставление количества дней с определенным типом циркуляции со среднемесячными величинами ОСО за те же периоды показало, что смещение годового озонного максимума на более ранние сроки связано с колебаниями макромасштабных циркуляционных процессов в Северном полушарии (рис. 5.6, 5.7).

Т. к. типизация макромасштабных процессов проведена на основании анализа синоптических процессов в тропосфере и отражает процессы, развивающиеся в разных районах земного шара, то найденная связь между циркуляционными процессами в Европейском секторе северного полушария указывает на тесную взаимосвязь процессов, протекающих в тропосфере с динамикой озоносферы.

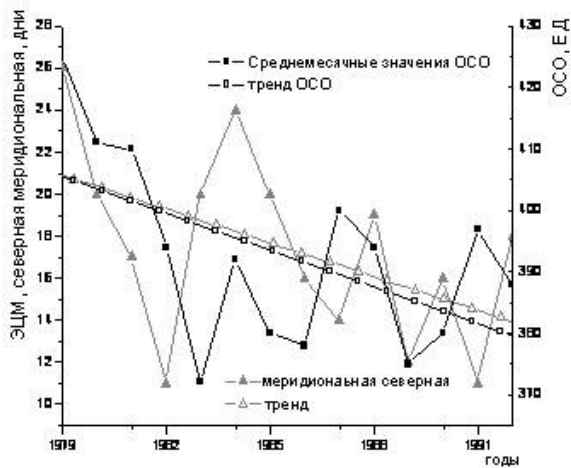


Рисунок 5.6 – Тренды среднемесячных значений ОСО и количества дней с меридиональной северной циркуляцией в апреле за 1979-1992 гг.

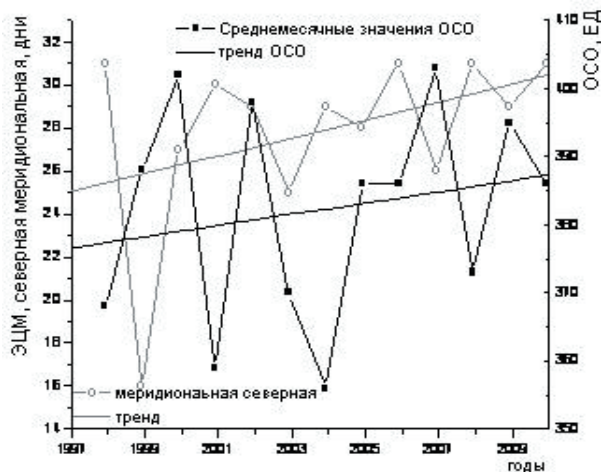


Рисунок 5.7 – Тренды среднемесячных значений ОСО и количества дней с меридиональной северной циркуляцией в марте за 1997-2010 гг.

Такая связь может быть полезной для долгосрочного прогноза ОСО. Однако на сегодняшний день дату начала действия того или иного типа циркуляции прогнозировать невозможно. Ее можно рассматривать как случайную величину со средним значением возле какой-то даты, наиболее вероятной для данного типа циркуляции в определенный сезон.

Антарктическая озоновая «дыра» в 2010 г. достигла максимальных размеров 25.09. Площадь области с дефицитом ОСО по сравнению с размерами областей в предыдущие годы несколько меньше (рис. 5.8).

Размеры области озоновой «дыры» испытывают в зависимости от сложившихся метеорологических условий существенные межгодовые колебания. В 2010 г. стратосферные

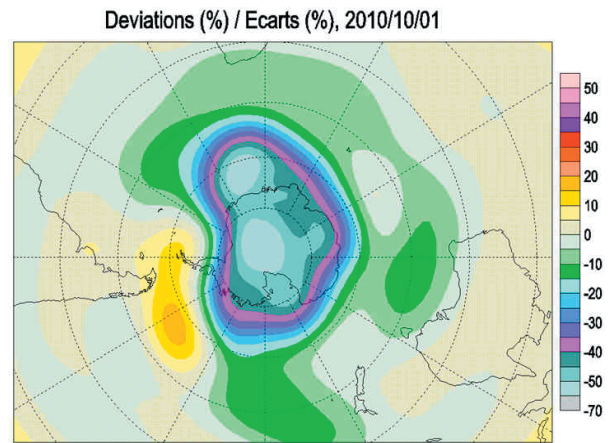


Рисунок 5.8 – Антарктическая озоновая «дыра» 01.10.2010 г.

температуры в Антарктиде были несколько выше, чем в предыдущие годы, размеры области – меньше. Минимальное значение ОСО отмечено 01.10.2010 г. и составило 118 ЕД.

В 2010 г. обстановка в Арктике, над которой иногда фиксируют области со значительным снижением содержания озона, не возникала. Но, начиная с конца февраля 2011 г., станции зондирования атмосферы, расположенные за полярным кругом, зафиксировали резкое и существенное снижение ОСО. В течение всего марта над акваторией Северного Ледовитого океана располагалась область с дефицитом озона 40%-45%. В последних числах марта она приблизилась к территории Европы (рис. 5.9).

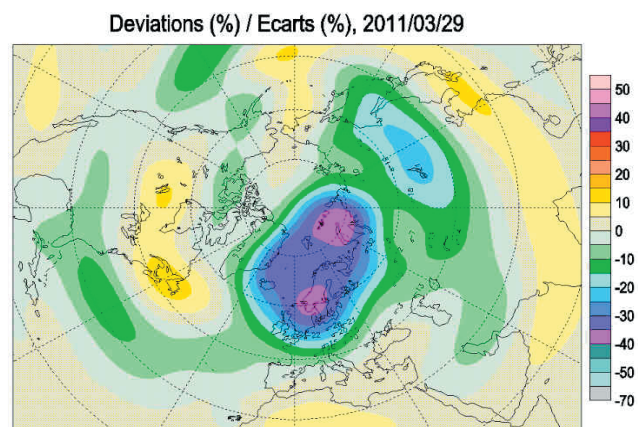


Рисунок 5.9 – Арктическая озоновая «дыра» 29.03.2011 г.

Измерения *спектральной плотности энергетической освещенности* (СПЭО) в спектральном диапазоне 285-450 нм проводились в 2010 г. с помощью ультрафиолетового спектрометра ПИОН-УФ в автоматическом режиме с восхода до захода солнца. В течение светового дня регистрировалось

от 100 спектров в зимние месяцы до 200 и более – в летние. Параллельно оператором фиксировались все данные метеонаблюдений (высота и балл облачности, дальность видимости, температура окружающего воздуха, влажность, давление атмосферы). Всего за 2010 г. было измерено и обработано около 40 тыс. спектров.

На основе измеренных спектров СПЭО определялись значения УФ индекса, а также рассчитывались дневные (суточные) дозы УФ облучения для ряда биологических эффектов (эритемы, повреждения ДНК, рака кожи, катаракты) с различными спектрами действия.

На рисунке 5.10 показано распределение суточных эритемных доз, полученное обработкой спектров, измеренных в 2010 г.

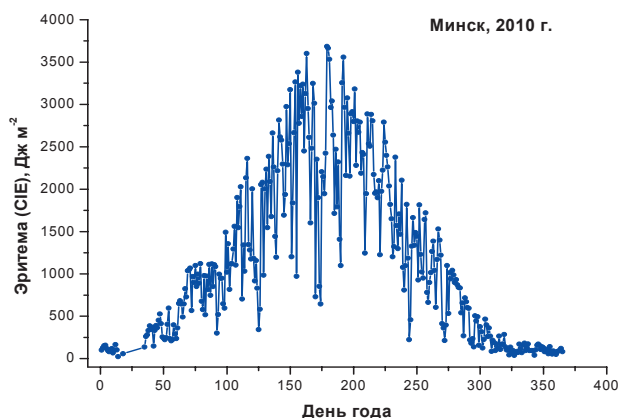


Рисунок 5.10 – Экспериментальные значения суточных эритемных доз солнечного УФ излучения в 2010 г.

В таблице 5.1 приведены годовые дозы биоэффектов УФ излучения – эритемы и повреждения ДНК, рассчитанные за период измерений на Минской озонометрической станции с 2003 по 2010 гг.

Таблица 5.1 – Годовые дозы биологических эффектов солнечной УФ радиации

Год	Эритема, КДж/м <sup>2</sup>	ДНК, КДж/м <sup>2</sup>
2003	417	6,4
2004	396	6,7
2005	410	6,7
2006	441	6,8
2007	367	6,3
2008	392	6,4
2009	396	6,3
2010	399	6,3

Суммарная годовая доза (399 кДж/м<sup>2</sup>), зарегистрированная в 2010 г., несколько выше, чем в 2008 и 2007 годах, но не превышает средней дозы за весь период измерений (2003-2010 гг.) ~ 400 кДж/м<sup>2</sup>.

В 2010 г. измерения *концентрации приземного озона* на озонометрической станции ННИЦ МО БГУ проводились приборами ТрИО-1 и ТЕ1 49С. Качественные характеристики результатов ежедневных наблюдений совпадают с данными предыдущих лет и представлены на рисунке 5.11.

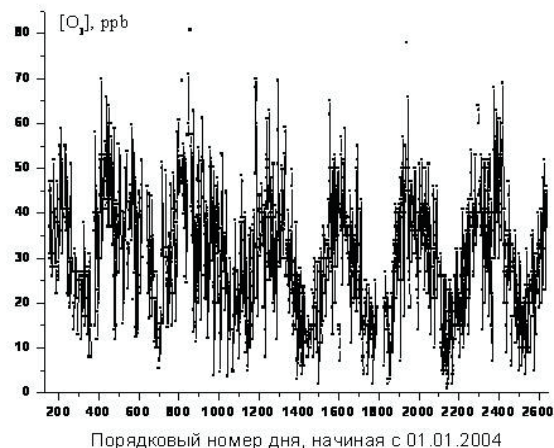


Рисунок 5.11 – Концентрации приземного озона, измеренные на озонометрической станции ННИЦ МО БГУ в 10 часов по Гринвичу (около местного полудня), за весь период наблюдений (2004-2010 гг.)

Более детальный анализ позволяет выделить некоторые важные моменты в поведении приземного озона. Впервые за все время наблюдений разница в среднемесячных значениях концентрации озона в г. Минск и на достаточно близко расположенной литовской станции Прейла (на берегу Балтийского моря) достигла в периоды весеннего и летнего максимумов приблизительно 10 ppb. Ранее соответствующие значения были более близки (рис. 5.12).

Кроме того, семилетний период наблюдений концентрации приземного озона в г. Минск позволяет говорить об устойчивом отрицательном тренде, который составляет ~ 1 ppb/год.

Аналогичный тренд за этот период наблюдается и на станции Прейла, характеризующейся более мягким климатом. Не исключено, что некоторый вклад в наблюдаемый отрицательный тренд внесло отсутствие весенних озонных максимумов в 2007 и 2008 гг.

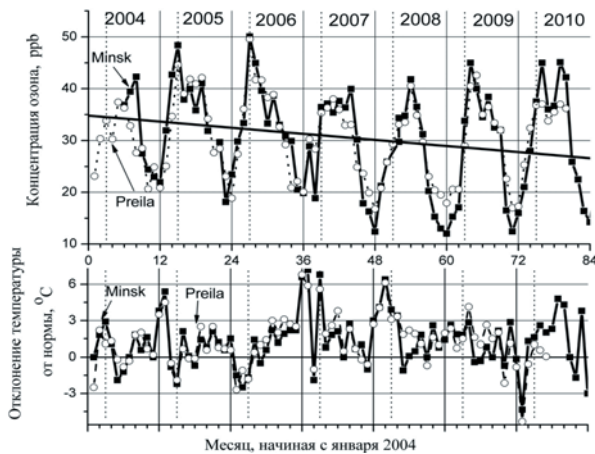


Рисунок 5.12 – Среднемесячные концентрации приземного озона и отклонения среднемесячных температур от климатической нормы в г. Минск (станция НИИЦ МО БГУ) и на станции Прейла

Анализ результатов мониторинга приземного озона в г. Минск указывает на сильную зависимость приземной концентрации озона от метеоусловий как в синоптических масштабах времени, так и в более длительных временных масштабах. В связи с этим можно заключить, что определение прямого антропогенного вклада в формирование концентрации приземного озона (загрязнением воздуха) на самом деле представляет собой весьма сложную задачу, поскольку требует предварительного исключения эффектов метеорологического характера. Последние также могут быть обусловлены антропогенным воздействием, однако такое воздействие на приземный озон будет уже не прямым, а опосредованным.

Таким образом, для понимания динамики приземного озона в регионе помимо анализа метеоусловий необходимо осуществлять мониторинг концентраций основных загрязнителей приземной атмосферы и, особенно, прекурсоров озона.

В настоящее время в Республике Беларусь осуществляется *зондирование высотных профилей концентрации озона* в стратосфере (Институт физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси). Мониторинг озона в тропосфере также является важным и необходимым этапом развития системы наблюдения озона в Беларуси.

В течение ряда лет в ИФ НАНБ проводилась разработка методов и создание аппаратуры для зондирования высотных

профилей концентрации озона в тропосферном слое и формирование лидарного комплекса для зондирования высотных профилей характеристик озона и аэрозоля в атмосфере на высотах от 100 до 35000 м.

Практическая реализация данной задачи была осуществлена путем модернизации многоволнового лидарного комплекса Института физики НАН Беларуси и создания дополнительного канала зондирования озона в тропосфере. Исходя из этого, в 2010 г. велись работы по уточнению методики зондирования атмосферного озонового слоя. Оптимальным решением признан вариант комплексной системы, которая в одном сеансе способна измерять профиль концентрации озона на высотах от приземного слоя до стратосферы включительно.

Технические трудности решения данной задачи состоят в том, что для зондирования тропосферы и стратосферы требуется использовать различные длины волн зондирующего излучения и применять многоканальную систему регистрации с набором приемных объективов. Кроме того, для измерения концентрации озона в нижней атмосфере, наряду с непосредственным зондированием озона, требуется получение информации об атмосферном аэрозоле и влажности, поскольку неопределенность параметров этих компонентов значительно увеличивает погрешность измерений. Возникают также проблемы, обусловленные необходимостью синхронизации и управления работой множества каналов.

*Зондирование стратосферного озона* обычно проводится на паре длин волн 308 и 355 нм эксимерного лазера на XeCl и YAG-лазера, соответственно. На длине волны 355 нм («off line») поглощение озоном практически отсутствует. Поглощение на длине волны 308 нм («on line»), находящейся вдали от максимума линии поглощения озона, вполне достаточно для измерения концентрации озона в стратосферном слое и в то же время не слишком велико, так что зондирующий сигнал в стратосфере остается достаточно мощным.

*Концентрация озона в тропосфере* меньше, чем в стратосфере. Здесь для зондирования используются пары длин волн,

существенно более близкие к максимуму линии поглощения озона.

С учетом возможностей создания лазерных источников излучения в УФ диапазоне спектра, оптимальным вариантом контроля атмосферного озона является трехволновое зондирование в области 281,7-355 нм. В качестве дополнительного источника излучения в диапазоне 281,7 нм предложено использовать лазер на основе 2-й гармоники твердотельного ВКР – преобразователя с накачкой YAG – лазером.

Зондирование высотного профиля распределения атмосферного аэрозоля производится излучением YAG-лазера со второй и третьей гармоникой на длинах волн 355, 532 и 1064 нм.

Вместе с многоволновой передающей системой создана многоканальная приемная система на основе трех зеркальных объективов. Объектив с диаметром зеркала 600 мм служит для регистрации локационных сигналов из дальней зоны. Два объектива с диаметром зеркала 210 мм предназначены, соответственно, для зондирования озона в ближней зоне и для зондирования аэрозоля.

В 2010 г. были проведены тестовые сеансы лидарного зондирования для получения данных об изменчивости профилей концентрации озона в тропосфере.

На рисунке 5.13 приведены восстановленные профили концентрации озона по результатам измерений, проведенных в октябре 2010 г. в г. Минск.

Диапазон изменений концентрации озона в нижнем слое атмосферы составляет порядка  $(1-6)E+11$   $1/см^3$ . Наблюдалось преимущественное уменьшение концентрации озона выше 1 км. Средний профиль концентрации озона слабо меняется в диапазоне 1-5 км.

Конкретные реализации профилей концентрации озона весьма изменчивы в тропосфере. Для оценки их суточных и сезонных вариаций требуются дополнительные регулярные наблюдения.

В рамках выполнения проекта Республиканского фонда фундаментальных исследований в НИИЦ МО БГУ на базе спектрометра Oriel MS-260 и ПЗС матрицы Andor Technology DV-420A-OE создана установка для измерения общего содержания  $NO_2$  в столбе атмосферы по методике DOAS при регистрации рассеянного солнечного излучения из зенита небесной сферы (Zenith-Sky-методом). При работе в автоматическом режиме система (с использованием программного обеспечения Andor Solis) позволяет регистрировать в течение дневной сессии (световой день)  $> 120$  спектров с интервалом 5 минут.

С 1-ой декады августа проводились регулярные измерения концентраций  $NO_2$  на Минской озонметрической станции НИИЦ МО БГУ. В течение августа 2010 г. измерения содержания  $NO_2$  проводилось также 2-м экземпляром установки на площадке биостанции БГУ на оз. Нарочь.

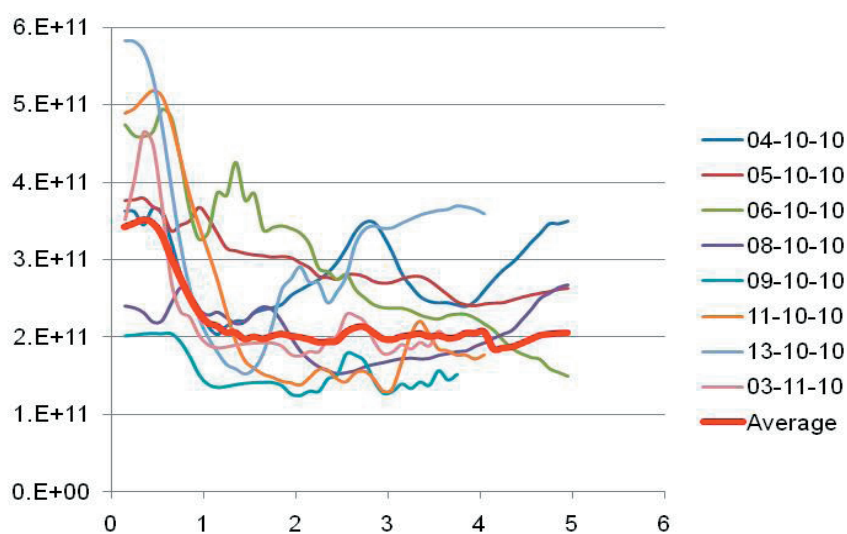


Рисунок 5.13 – Высотные профили концентрации озона в тропосфере, измерения в период октября-ноября 2010 г.



В качестве примера обработки результатов мониторинга содержания  $\text{NO}_2$  на Минской озонометрической станции на рисунках 5.14-5.15 представлены данные за период с 7.06 по 2.08.2010 г. и за ноябрь – декабрь 2010 г. Пример корреляции наземных и спутниковых измерений содержания  $\text{NO}_2$  показан на рисунках 5.16-5.17.

С целью валидации результатов измерений обработан массив данных, зарегист-

рированных орбитальной системой GOME-2 над территорией Минского региона с 11 по 29 июня 2010 г. За указанный период отличие спутниковых данных от данных, полученных с помощью наземной системы ORIEL MS260, не превысило 25%. С учетом пространственного усреднения концентраций  $\text{NO}_2$  при орбитальных измерениях (размер пикселя 40x80 км) этот результат можно считать «удовлетворительным».

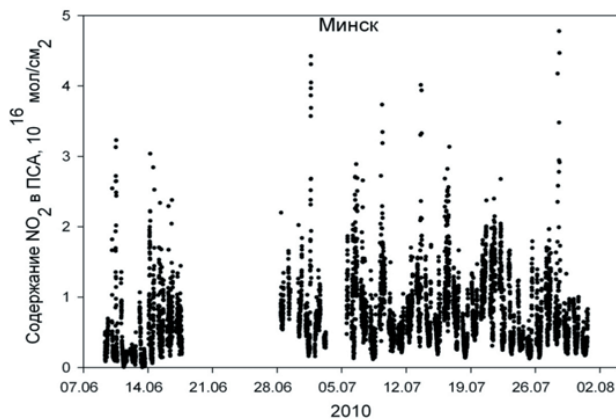


Рисунок 5.14 – Результаты мониторинга  $\text{NO}_2$  на Минской озонометрической станции НИИЦ МО БГУ за период с 7.06 по 2.08.2010 г.

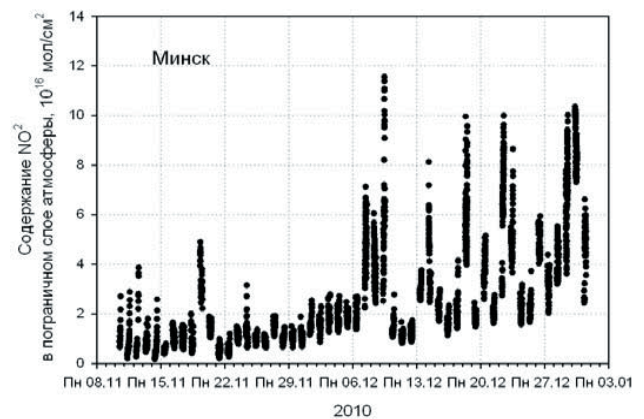


Рисунок 5.15 – Данные наземных наблюдений за содержанием  $\text{NO}_2$  на Минской озонометрической станции, 08.11.2010 – 03.01.2011 г.

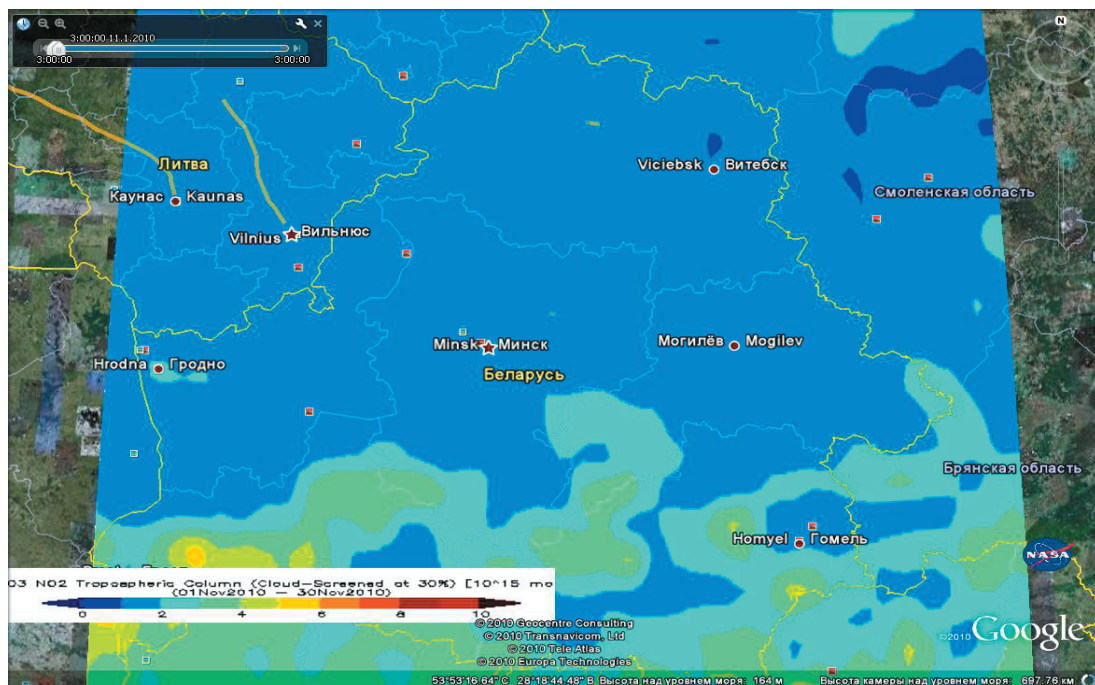


Рисунок 5.16 – Тропосферное содержание  $\text{NO}_2$  в ноябре 2010 г., OMI

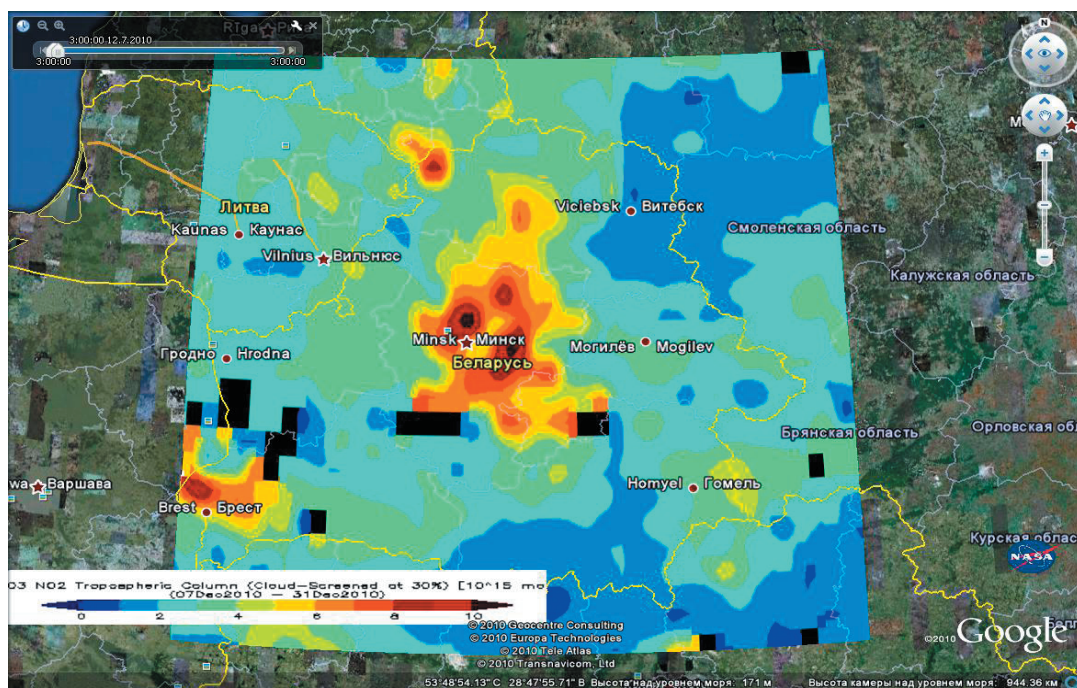


Рисунок 5.17 – Тропосферное содержание NO<sub>2</sub> в период 07.12.2010-01.01.2011 г., OMI