

5 мониторинг оzoneвого слоя

Мониторинг озонового слоя представляет собой систему наблюдений за состоянием озонового слоя, а также оценку и прогнозирование его изменений. Именно 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 настоящее время общее содержание озона рассматривается как один из основных климатических параметров.

Согласно оценке ВМО (Всемирной метеорологической организации), снижение содержания озона в атмосфере в глобальных масштабах значительно замедлилось в середине 90-х прошлого столетия и остановилось после 2000 года. Численные эксперименты, проведенные с помощью различных моделей глобальной и региональной циркуляции, позволяют утверждать, что восстановление озонового слоя до уровня 80-х годов продлится до 2050 г. В настоящее время общее содержание озона в атмосфере на 3,5-2,5% 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 (12-15 км). Однако рост концентрации озона в стратосфере характерен далеко не для всех регионов: на некоторых станциях данные озонозондов свидетельствуют о наличии небольшого отрицательного тренда стратосферного озона.

При положительной динамике содержания озона в стратосфере отмечается, что за период, в течение которого наблюдался отрицательный тренд озона, стратосфера стала в среднем холоднее, особенно в полярных

районах обоих полушарий. Это может повлиять на сроки восстановления озона в стратосфере, так как низкие температуры в полярной стратосфере создают условия для разрушения молекул озона.

Из-за очень низких температур в стратосфере 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 являются химические реакции озона и озоноразрушающих веществ на частицах стратосферных полярных облаков, которые формируются при очень низких температурах в стратосфере.

Для Северного полушария характерно возникновение другого явления — озоновых мини-дыр (отрицательных озоновых аномалий — подвижных пространственных областей, в которых наблюдается дефицит 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. Разрушение озона за счет химических реакций возможны и в области Северного полюса, однако в силу существующих в Северном полушарии циркуляционных особенностей условия для разрушения озона по «антарктическому» сценарию не носят регулярного характера. Такие ситуации возникали в марте 2000 и марте 2007 гг., но существовали непродолжительное время.

Предсказанные учеными значительные потери озона по «антарктическому» механизму наблюдались в полярной области Северного полушария весной 2011 г. В середине февраля арктическая стратосфера значительно остыла и над акваторией Северного Ледовитого океана начала формироваться область, в которой значения ОСО были снижены. Циркуляционные процессы в этом регионе способствовали сохранению и дальнейшему выхолаживанию этой области. Уже в первых числах марта дефицит озона в ней в отдельные дни достигал местами 50%, размеры области с дефицитом ОСО росли. В последней декаде марта эта область сдвинулась в сторону Евразии, и вся

Северная Европа оказалась под ее влиянием (рис. 5.1). Область с дефицитом озона пропущивала до конца апреля над северной частью Евразии. Время от времени под ее влиянием оказывалась и территория нашей республики и, как следствие, в марте и апреле наблюдались самые низкие за период 1997-2011 гг. среднемесячные значения ОСО.

Разрушение озона в зимние месяцы в полярной области послужило причиной значительного дефицита ОСО над территорией Республики Беларусь и в течение всех летних месяцев.

Регулярные наблюдения за состоянием озонового слоя осуществляют Национальный научно-исследовательский центр мониторинга озонасферы Белгосуниверситета (ННИЦ МО БГУ) и Институт физики НАН Беларуси.

Мониторинг общего содержания озона в столбе атмосферы осуществляется на Минской озонометрической станции (Минск 27.47E, 53.83N) несколькими приборами, использующими различные методики измерения.

С 2011 г. основной (базовый) мониторинг ОСО проводился с помощью ультрафиолетового спектрорадиометра ПИОН-УФ, предназначенного для измерения спектральной плотности энергетической освещенности (СПЭО) в диапазоне 285-450 нм методом Стамнеса. Преимуществом метода, по сравнению с классическим методом «по прямому солнцу», является возможность проведения измерений при наличии облачности, экранирующей прямое излучение солнечного диска. Это позволяет получать максимально длинные, непрерывные ряды

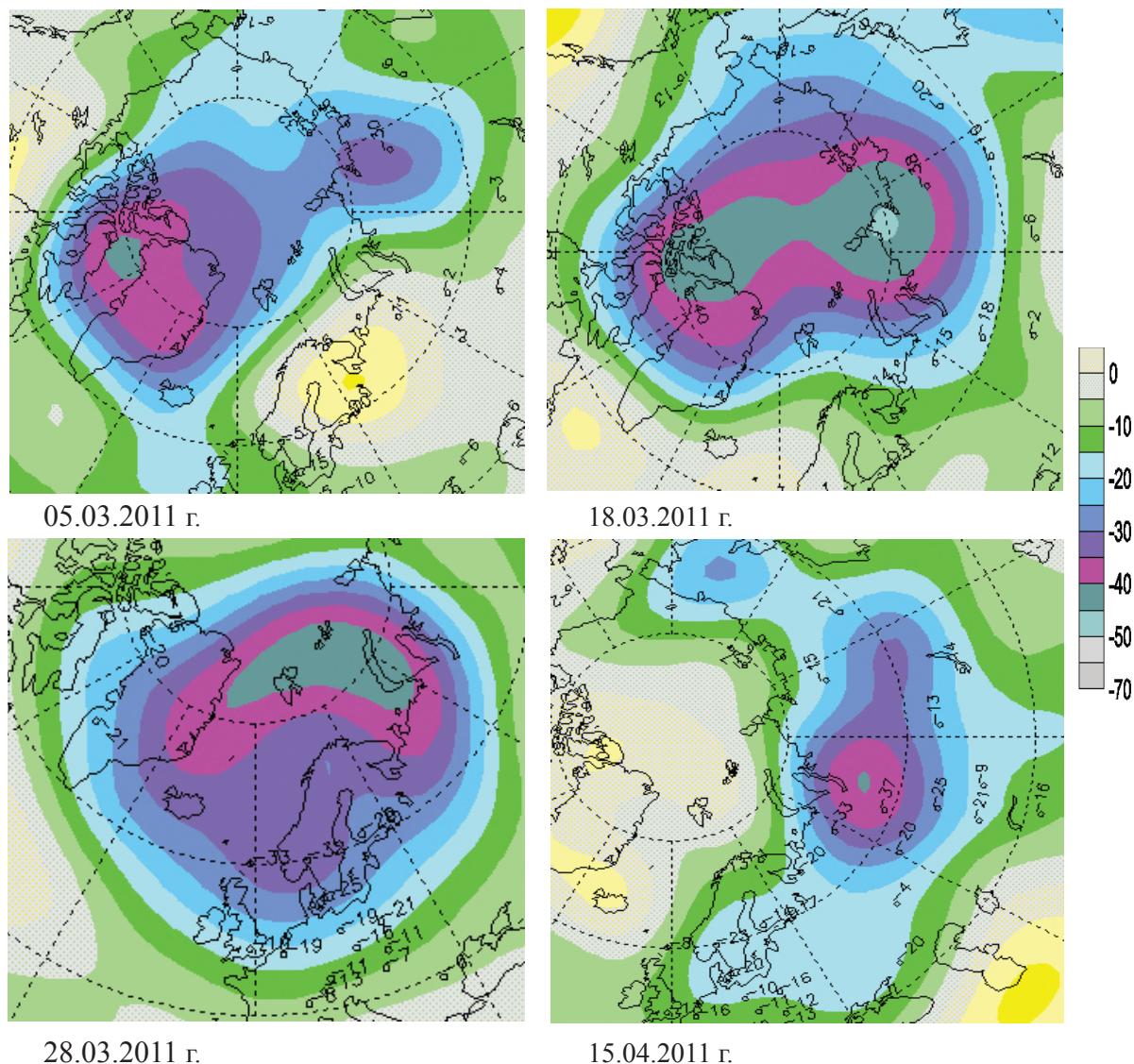


Рисунок 5.1 – Арктическая аномалия 2011 г.
(со шкалой отклонений от многолетних средних значений в процентах)

натурных наблюдений, особенно в погодных условиях, характерных для Беларуси. Трехлетний опыт внедрения данного метода при проведении мониторинга ОСО показал, что его реализация на базе ультрафиолетового радиометра ПИОН-УФ, даже без специального учета влияния атмосферных параметров (например, наличия облачности, аэрозолей и т.п.), позволяет обеспечивать точность измерения среднедневных значений ОСО в пределах $\pm 3 \div 4\%$.

Результаты мониторинга ОСО методом СПЭО озонометром ПИОН-УФ представлены на рисунке 5.2.

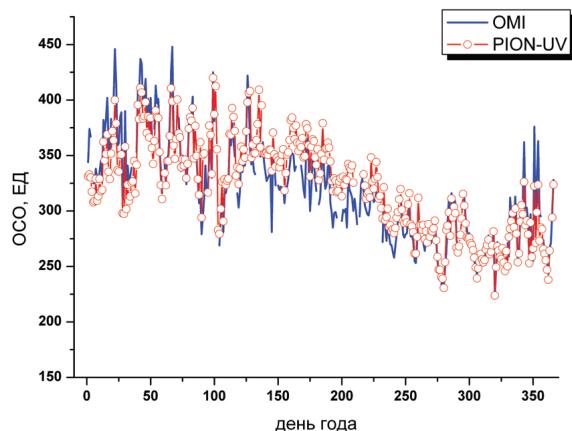


Рисунок 5.2 – Сопоставление результатов спутниковых (OMI) и наземных (ПИОН-УФ) измерений ОСО в атмосфере над г. Минском, 2011 г.

Параллельно с методом Стамнеса мониторинг ОСО осуществлялся с применением 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 фильтровым фотометром ПИОН-Ф, позволяющим проводить измерения ОСО относительно интегральных освещенностей земной поверхности в двух спектральных интервалах.

Данные мониторинга, полученные ННИЦ МО БГУ, указывают на то, что в предыдущие годы среднемесячные значения ОСО над территорией республики были близки к многолетним средним значениям (которые можно рассматривать как климатическую норму для региона). В то же время, в 2011 г. в зимние месяцы и ранней весной наблюдалось превышение среднемесячных значений на 6-7% (рис. 5.3). В течение почти всего года (за исключением января и февраля) наблюдался дефицит содержания озона

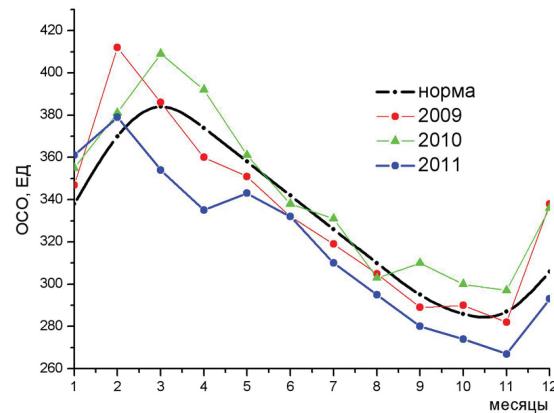


Рисунок 5.3 – Среднемесячные значения общего содержания озона за 2009-2011 гг. и климатическая норма для территории Республики Беларусь

в атмосфере, среднемесячные значения были ниже многолетних средних значений. Отклонения среднемесячных величин от нормы летом составляли в основном -1% – -3%, максимальных значений (-8% – -9%) они достигали в марте, апреле и ноябре. Среднегодовое значение ОСО в 2011 г. было самым низким за все время наблюдений и составило 319 ЕД.

Сезонный ход ОСО можно рассматривать как аномальный, так как он отличался отсутствием годового максимума ранней весной. Максимальное значение ОСО составило 425 ЕД (06.03.2011 г.), самое низкое (на 20% ниже нормы) – 225 ЕД (15.11.2011 г.).

Если прошлые годы отрицательные озоновые аномалии динамической природы посещали территорию республики относительно редко, то в 2011 г. над территорией республики наблюдалось 8 отрицательных аномалий. Одна из них – весенняя, которая в конце марта и в апреле время от времени располагалась над Беларусью, вызывая иногда значительный дефицит озона в атмосфере (13.04.2011 дефицит ОСО составил -26%).

Необходимо отметить, что 2011 г. отличался большими потерями озона в атмосфере над обоими полюсами в весеннее время.

Антарктическая озоновая «дыра» в 2011 г. начала формироваться в середине августа и к середине сентября площадь ее составила более 25 млн. км² (одна из самых больших по размеру за последнее десятилетие). Край области с низким содержанием озона в сентябре располагался над Южной Америкой. Потери озона во время этого явления так же были значительны (рис. 5.4).

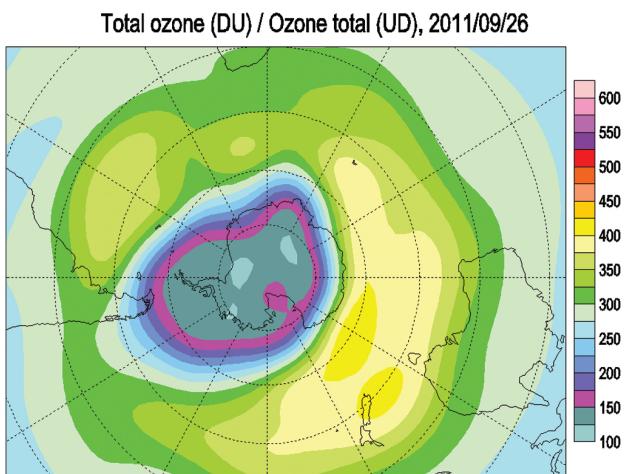


Рисунок 5.4 – Распределение полей озона над Антарктидой 26.09.2011 г.
(шкала значений ОСО в ЕД)

Поскольку общее содержание озона в атмосферном столбе слабо меняется в пределах республики, рассчитанные величины могут быть отнесены ко всей ее территории.

Квадратичный характер тренда статистически значим и согласуется с прогнозом Всемирной метеорологической организации об ожидаемом начале восстановления озонового слоя в результате реализованных мировым сообществом мероприятий по прекращению производства и выброса в атмосферу озоноразрушающих веществ.

Вся совокупность данных об общем содержании озона, использованных для определения климатических норм, представлена на рисунке 5.5 (годовой ход рассчитанных норм – 1, результат их аппроксимации рядом Фурье – 2 и 95%-й доверительный интервал для возможных отклонений общего

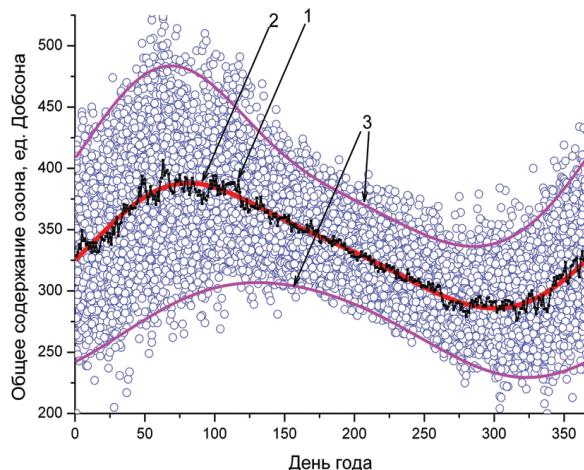


Рисунок 5.5 – Климатическая норма общего содержания озона (1) над территорией Беларусь, определенная на основании спутниковых данных за период 1979-2011 гг.

содержания озона от норм в конкретных случаях – 3). Выход полученных значений за пределы доверительного интервала объективно интерпретируется как аномальное явление. Многолетний тренд общего содержания озона и среднегодовые значения за период наблюдений приведены на рисунке 5.6.

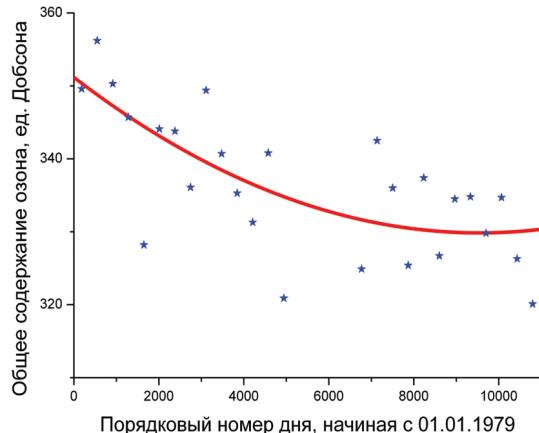


Рисунок 5.6 – Многолетний тренд и среднегодовые значения общего содержания озона над территорией Беларусь за период 1979-2011 гг.

Мониторинг спектров и доз биологически активного солнечного УФ-излучения

В 2011 г. измерения спектральной плотности энергетической освещенности земной поверхности в спектральном диапазоне 285-450 нм проводились на Минской озонометрической станции 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 фиксировались все данные метеонаблюдений (высота и балл облачности, дальность видимости, температура окружающего воздуха, влажность, давление атмосферы). Всего за 2011 г. измерено и обработано более 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, картаракты) с различными спектрами действия.

На рисунке 5.7 показано распределение суточных эритемных доз. 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 2011 гг.

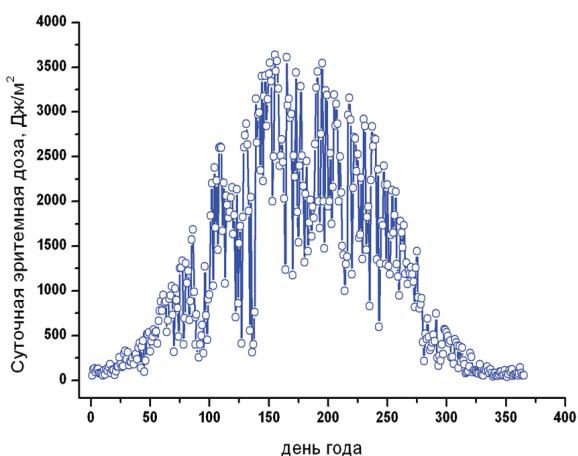


Рисунок 5.7 – Экспериментальные значения суточных эритемных доз солнечного УФ излучения в 2011 г.

Таблица 5.1 – Годовые дозы биологических эффектов солнечной УФ радиации

| Год | Эритема, кДж/м ² | ДНК, кДж/м ² |
|------|-----------------------------|-------------------------|
| 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 |
| 2011 | 440 | 6,9 |

Суммарная годовая доза, зарегистрированная в 2011 г. (440 кДж/м²), несколько выше, чем в 2007-2010 гг., и превышает среднюю дозу за период измерений 2003-2011 гг. (~ 406 кДж/м²).

В 2011 г. измерения *концентрации приземного озона* на озонометрической станции ННИЦ МО БГУ проводились прибором TEI 49C (в первой половине выполнялись круглосуточные измерения). Годовой ход концентрации приземного озона

идентичен ходу в предыдущие годы (рис. 5.8). Сохраняется тенденция постепенного снижения концентрации – устойчивый отрицательный тренд (~ 1 ppb в год) (рис. 5.9).

По-прежнему наблюдается хорошая корреляция среднемесячных значений для г. Минска и литовской станции в Прейле (расположена на берегу Балтийского моря). В частности, на обеих станциях в 2011 г. зафиксирован весенний максимум концентрации озона (правда, в Прейле он наблюдался на месяц позже – в мае). Тренд концентрации приземного озона на литовской станции также отрицателен, но приблизительно в 2 раза меньше, чем в г. Минске. Отличительной особенностью является заметно меньшая амплитуда суточного хода концентрации озона в Прейле по сравнению с г. Минском. Такая разница объясняется более мягким (морским) климатом, характерным для Прейлы.

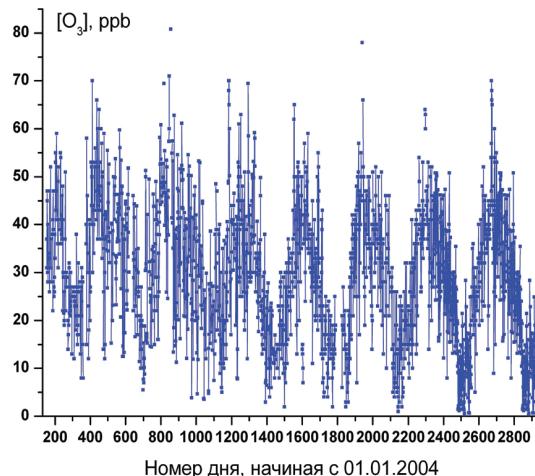


Рисунок 5.8 – Концентрации приземного озона, измеренные на озонометрической станции ННИЦ МО БГУ в 10 часов по Гринвичу (около местного полудня) за весь период наблюдений (2004-2011 гг.).

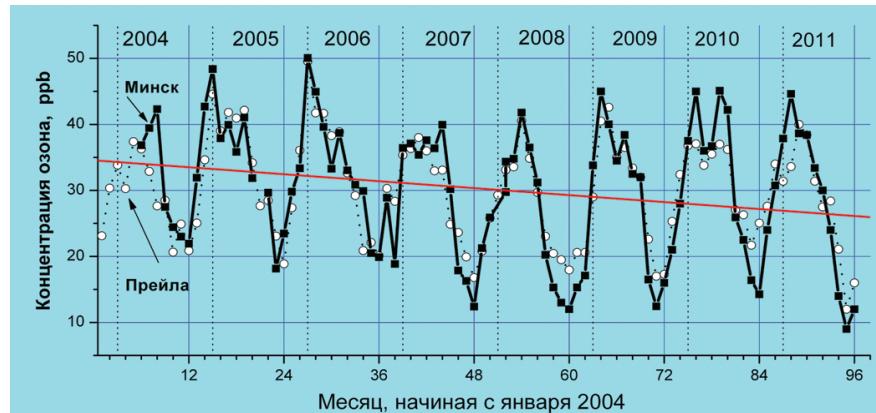


Рисунок 5.9 – Среднемесячные значения полуденных концентраций приземного озона в г. Минске и Прейле с отрицательным трендом озона по результатам измерений в г. Минске

Хорошая корреляция среднемесячных концентраций озона в промышленном центре (в г. Минске) и экологически чистой зоне (Приэлье) свидетельствует об отсутствии значительного антропогенного воздействия на концентрацию приземного озона в г. Минске. В то же время, среднедневные концентрации озона и его суточный ход в значительной степени зависят от метеоусловий.

С 2011 г. начато проведение регулярных измерений концентраций приземного озона на пунктах мониторинга атмосферного воздуха в составе НСМОС, появилась возможность анализировать степень влияния загрязнений антропогенного происхождения на концентрацию приземного озона. (рис. 5.10). На рисунке 5.11 приведены результаты измерения концентрации приземного озона и оксидов азота во второй половине июня 2011 г. на пункте мониторинга в районе ул. Корженевского (пост № 11): наблюдается антикорреляция концентраций оксидов азота (особенно NO_2) и приземного озона.

В суточном ходе приземного озона наблюдаются провалы (меньшей интенсивности) также и при возрастании концентраций оксида углерода и летучих органических соединений.

Результаты измерений концентраций прекурсоров озона в разных районах города часто сильно различаются. Возможно, это является основной причиной различия и в концентрациях приземного озона,

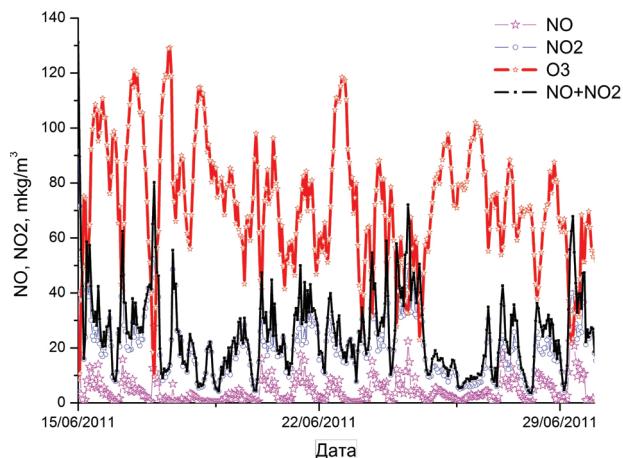


Рисунок 5.11 – Результаты измерений окислов азота и приземного озона в г. Минске на пункте № 11 во второй половине июня 2011 г.

зарегистрированных на разных пунктах наблюдений (рис. 5.12).

Мониторинг характеристик аэрозольной составляющей атмосферы в 2011 г. проводился на базе лидарного комплекса, созданного в Институте физики НАН Беларуси для контроля верхней тропосферы и стратосферы, включающего стационарную поляризационную лидарную станцию для зондирования стратосферы и многоволновую лидарную станцию для зондирования верхней тропосферы и стратосферы.

Комплекс многоволновых лидарных станций обеспечивает измерение профилей оптических характеристик атмосферы по трассе зондирования в спектральном диапазоне 355-1064 нм.

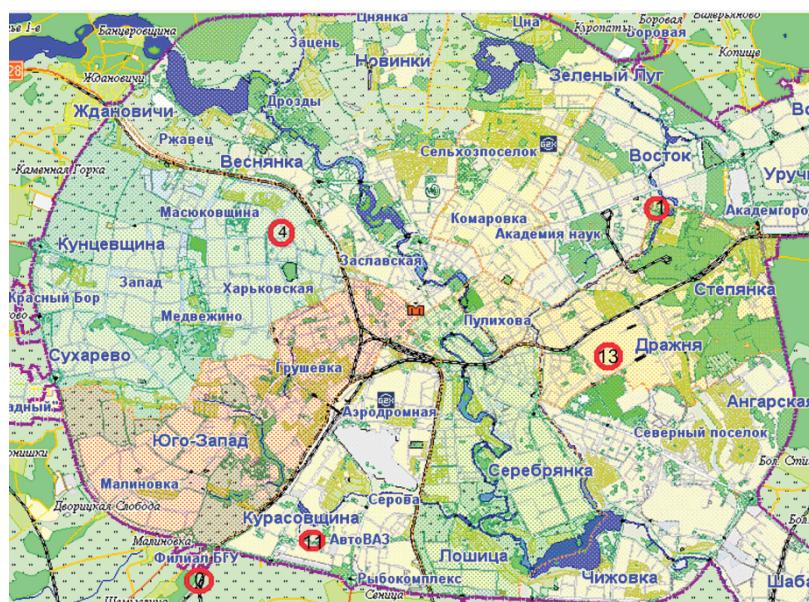


Рисунок 5.10 – Расположение пунктов Департамента по гидрометеорологии измерения концентрации приземного озона и его прекурсоров в г. Минске (Цифрой «0» помечена озонометрическая станция ННИЦ МО)

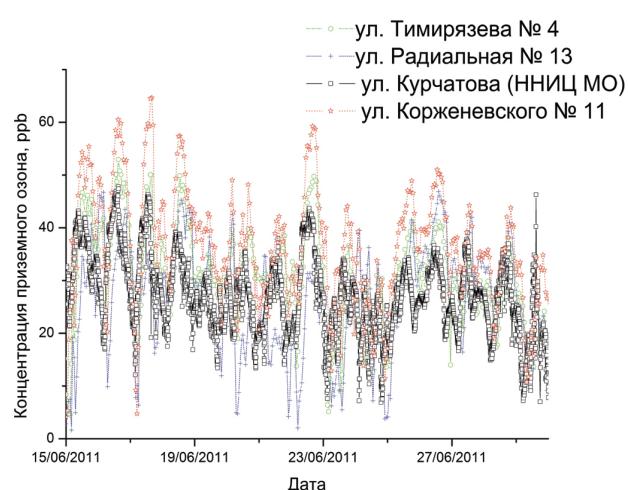


Рисунок 5.12 – Концентрации приземного озона в разных районах г. Минска во второй половине июня 2011 г.

В 2011 г. 25-26 мая на высоте около 2 км наблюдалось проникновение вулканического пепла в воздушный бассейн Беларуси после извержения вулкана Grimsvötn в Исландии (извержение было намного слабее подобного события в Исландии в апреле – мае 2010 г.). Вулканический пепел, состоящий из частиц несферической формы с размерами от нескольких микрон до десятков микрон, распространялся на высоте около 2-3 км. Траектория переноса вулканического пепла проходила над территориями стран Северной Европы, затрагивая территорию Беларуси. Прогноз переноса вулканического пепла по результатам моделирования программой EURAD на высотах ~3 км для 6 и 11 часов универсального времени (UT) 26.05.2011 г. приведен на рисунке 5.13.

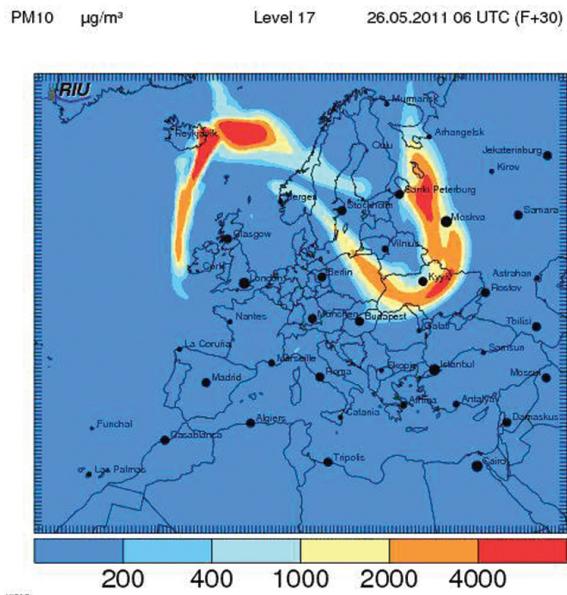


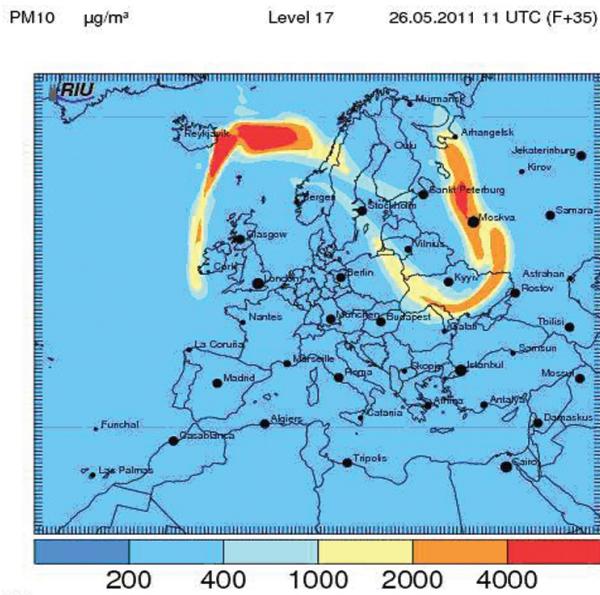
Рисунок 5.13 – Прогноз распространения вулканического пепла на 26 мая 2011 г. на высоте 3 км

Для идентификации вулканического пепла в атмосфере над территорией Беларуси использовалась методика спектрально-поляризационного зондирования. Рассеяние зондирующего излучения на частицах пепла сопровождалось появлением деполяризованной компоненты, которая являлась признаком присутствия несферических частиц пепла в атмосфере. На рисунке 5.14 приведена структура аэрозольных слоев для 06:39 UT и 10:19 UT, 26 мая 2011 г. в г. Минске. Результаты комплексных лидарных и радиометрических измерений позволили идентифицировать слои на высотах от 1-2 км как облака вулканического пепла.

Полученные результаты измерений (фактические данные) отличались от прогнозных по времени порядка 3-4 часа, по высоте облака – около 1 км.

Появление аэрозольных слоев в стратосфере было зафиксировано в июле 2011 г. Аэрозольные слои в стратосфере были обнаружены станциями европейской лидарной сети EARLINET. С большой вероятностью формирование аэрозольных слоев было следствием извержения вулкана Nabro, Эритрея, Восточная Африка, 13.37N, 41.70 E, высота – 2218 м. Серия извержений началась 12 июня 2011 г.

В г. Минске на лидарной станции ИФ НАН Беларуси аэрозольные слои в стратосфере были зафиксированы на высотах 13 и 17 км 20 июля 2011 г. Превышение параметра обратного рассеяния над единицей пропорционально отношению объемов



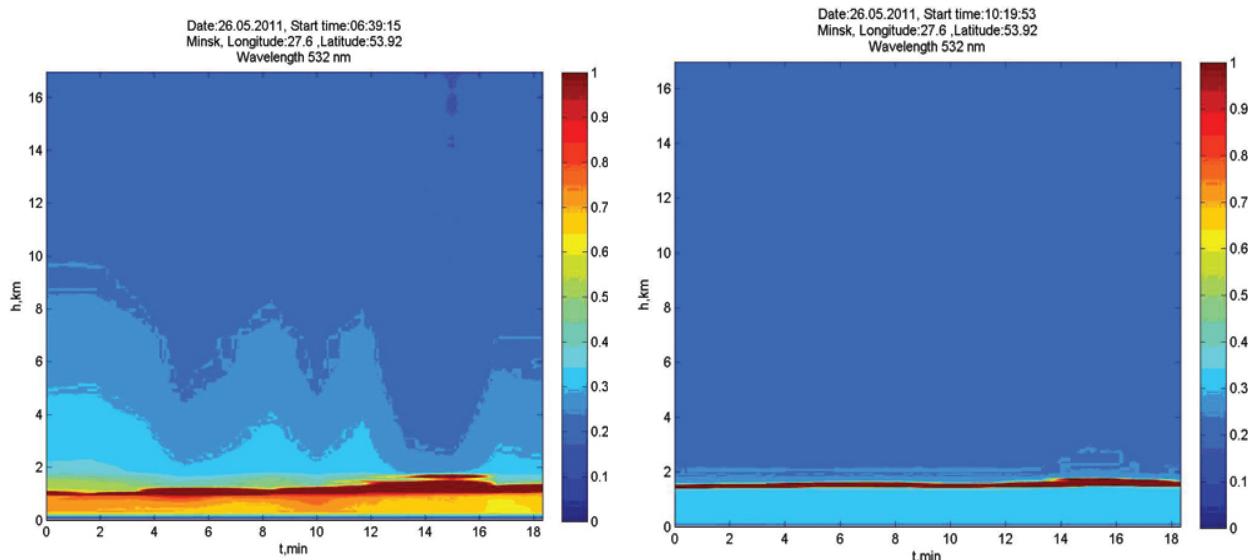


Рисунок 5.14 – Структура аэрозольных слоев в г. Минске, 26 мая 2011 г., 06:39 UT и 10:19 UT

частиц аэрозоля и молекул воздуха. Результаты наблюдений указывают на формирование аэрозольного слоя на высоте 16 км, в котором концентрация аэрозольных частиц уменьшилась приблизительно в два раза к концу 2011 г.

Мониторинг общего содержания диоксида азота в атмосфере осуществлялся на Минской озонометрической станции ННИЦ МО БГУ, а также на площадке биостанции БГУ на оз. Нарочь.

В качестве примеров обработки результатов ниже приведено сравнение полученных данных распределения NO_2 в двух крупных мегаполисах (г. Москва и г. Минск). В обеих столицах были проанализированы частоты и условия появления различных среднесуточных содержаний NO_2 (рис. 5.15, 5.16).

В отличие от г. Москвы, где более чем в 95% случаев при облачной и, особенно, при

ясной погоде наблюдаются значения VCD (Vertical Concentration Density) NO_2 , превышающие 10^{16} см^{-2} , в г. Минске, в подавляющем большинстве случаев, наблюдаются значения меньше 10^{16} см^{-2} .

В то же время, так же как и в остальных крупных городах (и в том числе в г. Москве) дневная изменчивость содержаний NO_2 в г. Минске имеет характерные особенности, связанные, по-видимому, с движением транспорта. Временные диаграммы VCD NO_2 , построенные для летних месяцев показывают пики, связанные с поездками людей на работу (около 5 GMT) и с работы (около 13–14 GMT) (рис. 5.17). Несмотря на то, что ход VCD NO_2 на дневных временных диаграммах не всегда ярко выражен, иногда он проявляется достаточно заметно (рис. 5.18).

Анализ результатов наблюдений за изменением общего содержания NO_2 в

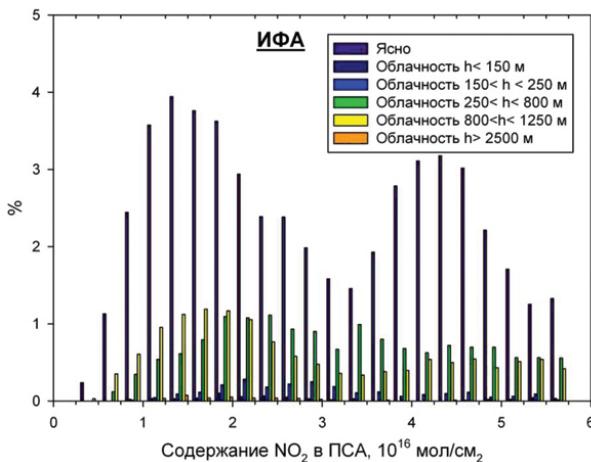


Рисунок 5.15 – Частота появления различных значений содержаний NO_2 в зависимости от характера облачности, Москва, ИФА РАН

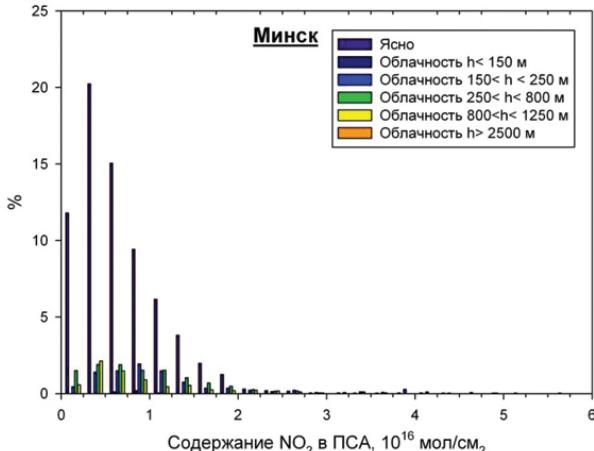


Рисунок 5.16 – Частота появления различных значений содержаний NO_2 в зависимости от характера облачности в г. Минске, озонометрическая станция ННИЦ МО БГУ

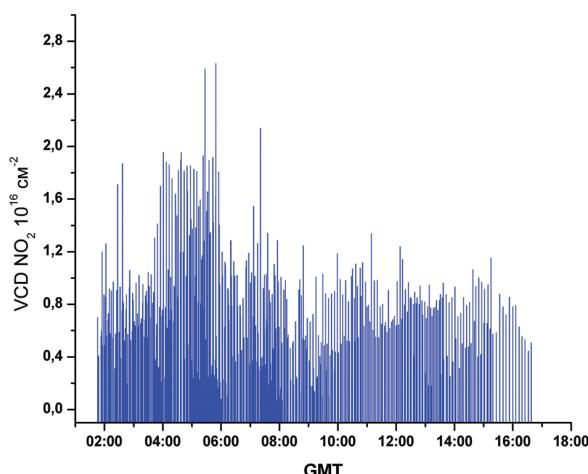


Рисунок 5.17 – Усредненная за месяц дневная зависимость VCD NO₂, наблюдалась в г. Минске в летний период

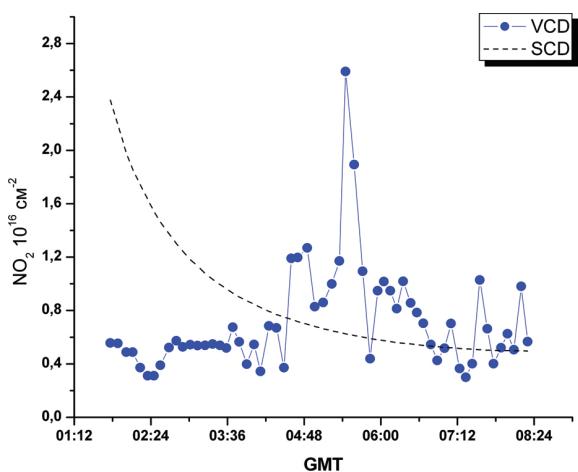


Рисунок 5.18 – Дневная зависимость VCD NO₂, наблюдалась в г. Минске в летний период

вертикальном столбе атмосферы в 2011 г. показал, что в зимние месяцы (отопительный сезон) наблюдается увеличение концентраций NO₂ (рис. 5.19).

Результаты мониторинга озонового слоя свидетельствуют о том, что:

- сезонный ход ОСО над территорией Республики Беларусь в 2011 г. можно рассматривать как аномальный. Он отличался отсутствием характерного годового максимума ранней весной. Самое низкое значение ОСО (225 ЕД), наблюдавшееся 15.11.2011 г., было на 20% ниже климатической нормы;

- в 2011 г. над территорией республики наблюдалось 8 отрицательных аномалий. Весенняя озоновая аномалия сопровождалась значительным дефицитом озона в атмосфере (13.04.2011 г. дефицит ОСО относительно климатической нормы составил 26%);

- суммарная годовая доза УФ облучения (440 кДж/м²) с биологическим эффектом

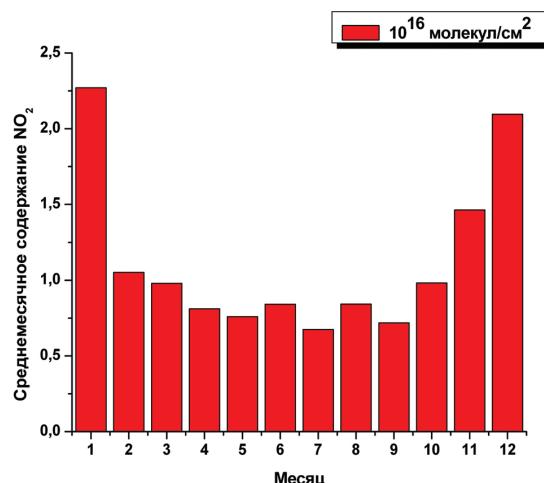


Рисунок 5.19 – Среднемесячные значения общего содержания NO₂ в вертикальном столбе атмосферы, 2011 г.

«эрите́ма», зарегистрированная в 2011 г., несколько выше, чем в период 2007-2010 гг., и превышает среднюю дозу за период измерений 2003-2011 гг. (~ 406 кДж/м²);

- зарегистрированный на Минской озональной станции годовой ход концентрации приземного озона в 2011 г. идентичен ходу в предыдущие годы. Сохраняется тенденция постепенного снижения концентрации: устойчивый отрицательный тренд (~ 1 ppb в год);

- 25-26 мая 2011 г. на высоте около 2 км наблюдалось проникновение вулканического пепла в воздушный бассейн Беларусь после извержения вулкана в Исландии. Концентрация вулканического пепла была малой и не вызвала значимых последствий. Извержение вулкана Nabro в Эритрее в июне 2011 г. явилось причиной образования в северном полушарии стратосферного аэрозольного слоя на высоте около 16 км. В регионе Беларусь стратосферный аэрозольный слой наблюдался с конца июля 2011 г.