

5 Мониторинг озонового слоя

Мониторинг озонового слоя в нашей стране проводится Национальным научно-исследовательским центром мониторинга озоносферы БГУ и Институтом физики НАН Республики Беларусь.

В 2008 г., как и в предыдущие годы, регулярно выполнялись наблюдения за изменением общего содержания озона в атмосфере (ОСО) для всей территории Республики Беларусь, уровней приземного ультрафиолетового (УФ) солнечного излучения, аэрозольной оптической толщины (АОТ) атмосферы в УФ области спектра, концентраций приземного (тропосферного) озона.

Результаты мониторинга ОСО служат основой для оценки состояния озонового слоя над республикой и выявления тенденций изменения слоя на протяжении больших периодов времени. По данным мониторинга выполняется анализ влияния естественных и антропогенных факторов на озоносферу, а также определяется общая тенденция в изменении уровней приземного ультрафиолетового солнечного излучения.

Результаты измерений спектров и доз биологически активного солнечного ультрафиолетового излучения позволяют получать информацию о риске возникновения у людей и животных онкологических, кожных, глазных и иммунных заболеваний, а также поражения сельскохозяйственных культур в период вегетации.

Приземная концентрация озона, наряду с концентрацией аэрозолей, является важнейшей характеристикой загрязнения тропосферного воздуха и критерием безопасности жизнедеятельности на открытом воздухе. Повышенные концентрации приземного озона негативно влияют на продуктивность сельского и лесного хозяйства. Мониторинг временных и пространственных изменений концентрации приземного озона важен также

для оценки интенсивности трансграничного переноса загрязнений.

Мониторинг общего содержания озона

В 2008 г. мониторинг общего содержания озона (ОСО, Total Ozone) проводился на Минской озонометрической станции (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 методом Стамнеса, согласно которому значения ОСО можно получить, используя отношение освещенностей на двух длинах волн солнечного спектра, одна из которых попадает в область поглощения атмосферного озона, а другая находится вне этой области. Экспериментально измеренное отношение указанных освещенностей сравнивается с подобными отношениями, теоретически рассчитанными для набора значений ОСО и солнечных зенитных углов (SZA) при различных параметрах и моделях атмосферы.

Важным преимуществом метода Стамнеса 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 натурных наблюдений.

Спектрорадиометр ПИОН-УФ прошел два типа предварительных калибровок:

– калибровку по абсолютной спектральной чувствительности на специальном поверочном стенде по эталонной лампе ТРУ1100-2350 №48 (лампа регулярно аттестуется в ВНИИ ОФИ);

– калибровку работы «в режиме озонометра» с использованием в качестве эталона спектрометра-озонометра ПИОН.

Результаты мониторинга ОСО в 2008 г. представлены на рисунке 5.1. Данные наземных измерений ОСО, проведенных на Минской озонометрической станции, сопоставлены со спутниковыми измерениями (OMI).

Данные получены с использованием двух пар длин волн (323.5/305.5 и 339/305.5 нм). Среднее относительное отклонение

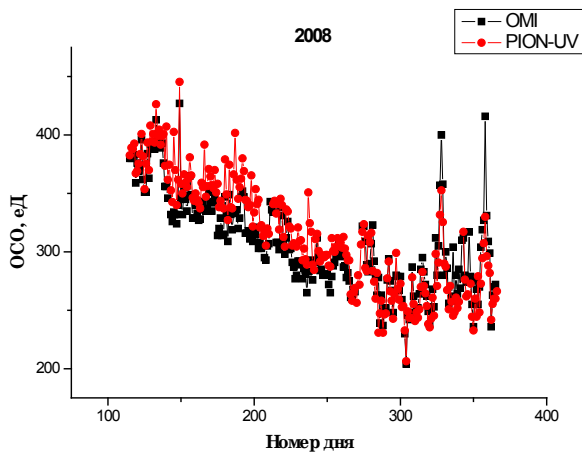


Рисунок 5.1 – Результаты наземных (ПИОН-УФ) и спутниковых (ОМІ) измерений ОСО. Минск, 2008 г.

результатов наземных измерений ОСО от данных спутника ОМІ в 2008 г. не превысило 4%. Всего в процессе мониторинга ОСО за 2008 г. измерено и обработано свыше 20 тыс. спектров.

Анализ состояния озоносферы над Республикой Беларусь выполнялся на основе данных спутникового инструмента ОМІ, обеспечивающего изменение данных во времени и пространстве. Приемлемое пространственное разрешение обеспечивают данные спутника на сетке $1^\circ \times 1^\circ$. Для широты г. Минск это соответствует линейным шагам в ~ 66 км вдоль параллели и ~ 111 км вдоль меридиана (сетка целиком покрывает территорию республики и содержит 77 узлов). На рисунках 5.2 и 5.3 приведены усредненные для территории Беларуси ежедневные и среднемесячные значения ОСО за 2008 г. в сравнении с климатической нормой (КН) за 1978-2007 гг. Отчеты указывают на то, что в целом

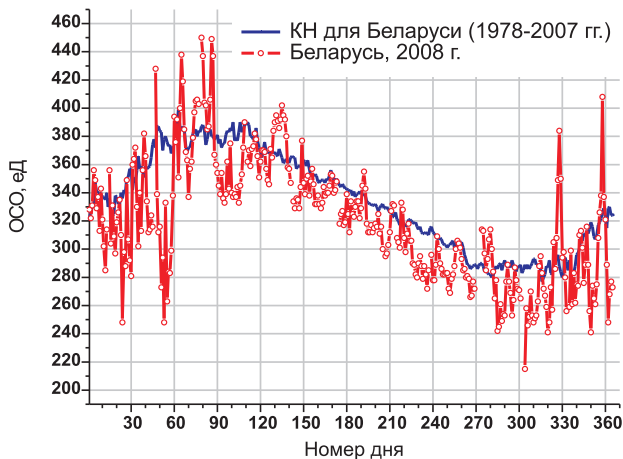


Рисунок 5.2 – Ежедневные значения ОСО для Беларуси в 2008 г. в сравнении с климатической нормой (данные для 349 дней из 366)

2008 год был озонодефицитным по сравнению с климатической нормой. Только в марте климатическая норма была превышена на 2%, а в мае среднемесячное содержание озона соответствовало норме. В остальные месяцы отклонения составляли от -4 до -12%.

В 2008 г., как и прежде, наблюдались определенные различия в среднемесячном состоянии озонового слоя над разными регионами республики, причем наиболее значительные – в весенний и зимний периоды. Такая ситуация была обусловлена ежегодно наблюдающейся в эти периоды времени перестройкой атмосферы (рис. 5.4).

Следует отметить, что *ежегодно* (обычно в конце зимы либо поздней осенью) наблюдаются дни, когда разница в ОСО для какой-либо пары областных городов Беларуси составляет около 100 единиц Добсона (еД), т. е. примерно 30% от среднегодового значения. В 2008 г. такой день пришелся на 23 января, когда было зафиксировано ОСО над г. Гомель 360 еД, а над г. Гродно – 265 еД (разница составила 95 еД). При этом среднее по республике ОСО равняется 310 еД. Наблюдавшаяся картина объясняется прохождением над территорией республики отрицательной озоновой аномалии, вытянутой вдоль оси «север-юг». В указанный день край этой аномалии накрыл западный регион республики, тогда как центральный и восточный регионы остались в зоне более высоких значений ОСО. Уже 24 января, вследствие дальнейшего движения аномалии на восток, ситуация над территорией страны выровнялась (при этом среднее ОСО составило 248 еД).

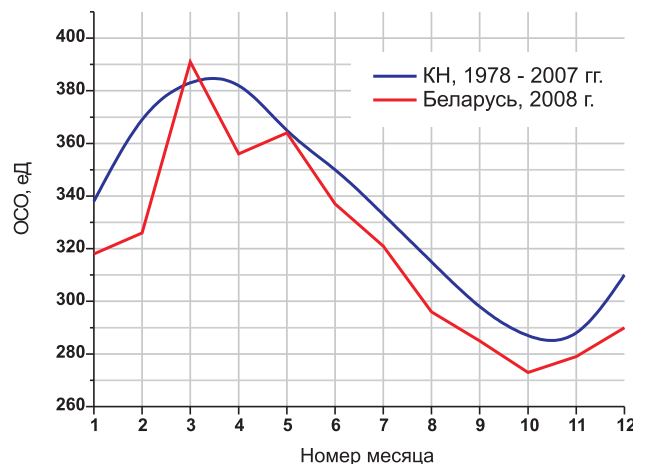


Рисунок 5.3 – Среднемесячные значения ОСО в 2008 г. для Беларуси в сравнении с климатической нормой

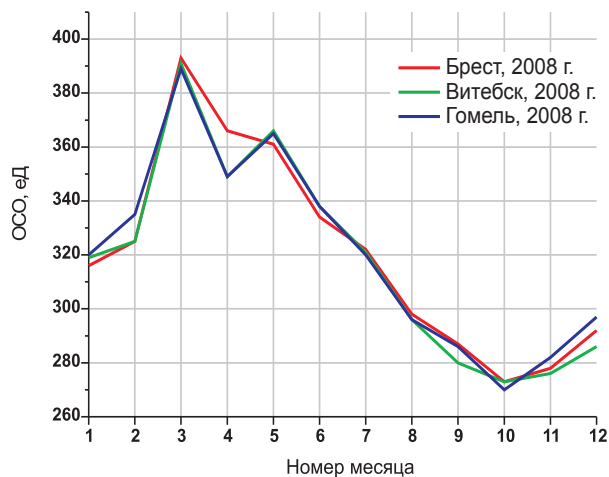
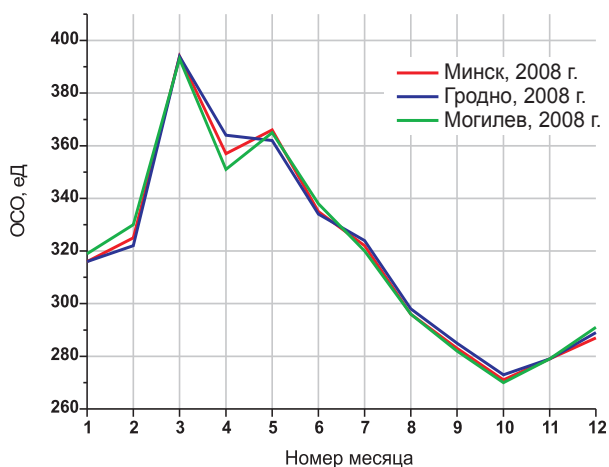


Рисунок 5.4 – Среднемесячные значения ОСО для областей Беларуси, 2008 г.

Данные об отрицательных и положительных аномалиях 2008 г., «сила» которых превышает 15%, представлены на рисунке 5.5. Наиболее «урожайными» на отрицательные аномалии («мини-дыры») оказались февраль, октябрь и декабрь. Самая глубокая и продолжительная отрицательная аномалия находилась над Беларусью с 18.02.08 по 26.02.08. Значения ОСО в этот период были снижены на 20-25%, а 22.02.08 дефицит ОСО составил -35% (рис. 5.6). Рекордная положительная аномалия (+37%) наблюдалась 23 ноября.

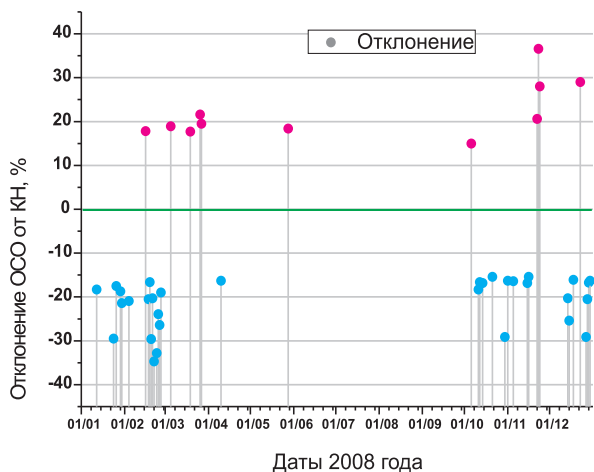


Рисунок 5.5 – Озоновые аномалии 2008 г. с отклонением от нормы более 15% (ось ординат - отклонение от многолетнего среднего в процентах («сила аномалии»))

Исследования, проведенные в НИИЦ МО БГУ, показали, что зимой и ранней весной области, в которых содержание озона в атмосфере существенно (более чем на 20%) отклоняется от нормы, характеризуются определенной дипольной структурой. В случае отрицательных озоновых аномалий в тропосфере имеют место антициклоническая циркуляция и подъем барических поверхностей

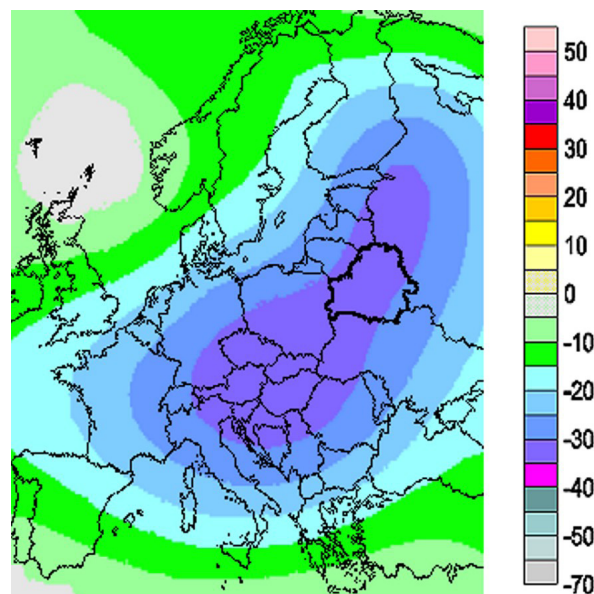


Рисунок 5.6 – Отрицательная озоновая аномалия 22.02.2008 года с отклонением от нормы -35%

до высот нижней стратосферы. В стратосфере в этот момент наблюдается противоположная, циклоническая, циркуляция, обусловленная, как правило, смещением зимнего стратосферного полярного вихря на Европу. Присутствие противоположных циркуляционных структур в стратосфере и тропосфере приводит к уменьшению толщины слоя в атмосфере, в котором находится основная часть атмосферного озона. Поздней весной и летом отрицательные озоновые аномалии связаны только с подъемом изобарических поверхностей в тропосфере до высот средней стратосферы и вытеснением озона из этой области.

Аномалии зимой и весной 2008 г. были связаны с тем, что в зимние месяцы, вплоть до начала марта, центр стратосферного полярного циклона был сдвинут к Европе, и, в частности, 22.02.08 он располагался над Скандинавией и Норвежским морем (рис. 5.7).

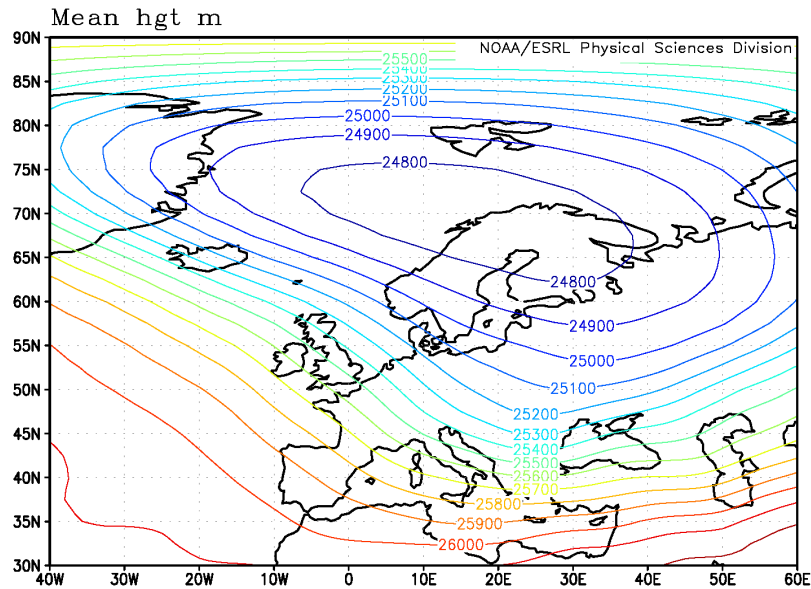


Рисунок 5.7 – Высоты изобарических поверхностей 20 мб (~ 25 км) 22.02.08.
 Центр стратосферного циклона над Скандинавией и Норвежским морем

В целом за 2008 г. максимальное содержание озона наблюдалось над г. Гродно 5 марта (465 еД), а минимальное – над г. Минск 30 октября (205 еД). За весь период спутниковых наблюдений (с 1978 г.) максимальное зафиксированное ОСО составило 534 еД (Гродно, 24 февраля 2001 г.), минимальное – около 190 еД (Гродно, 1 января 1998 г.; Гомель, 1 декабря 1999 г.).

Анализ результатов состояния озонового слоя над территорией Беларуси в 2008 г. и за последние 30 лет показал, что темпы истощения озонового слоя замедлились, хотя общая тенденция сохраняется (рис. 5.8).

Мониторинг приземных уровней и доз солнечного ультрафиолетового излучения над Республикой Беларусь выполнялся в автоматическом режиме в течение всего светового дня. В целом за 2008 год измерено и обработано более 35600 спектров

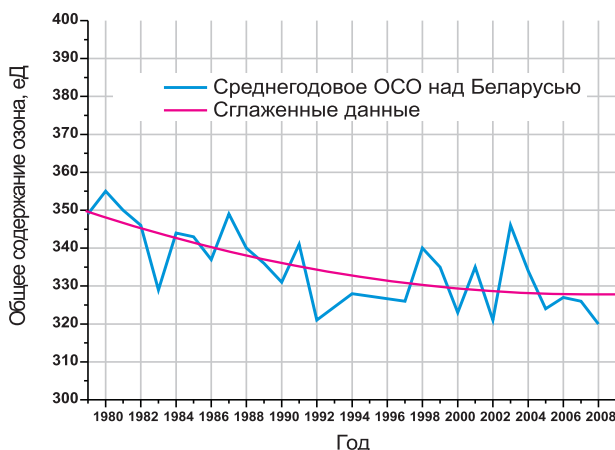


Рисунок 5.8 – Среднегодовое ОСО над Республикой Беларусь за 1979-2008 гг.

солнечного приземного УФ излучения.

На основе измеренных спектров 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 5.9 приведены данные измерений УФ индекса в 2008 г. в сравнении с прогнозными значениями УФ индекса, рассчитанными для каждого дня. Верхняя граница прогнозной зоны соответствует условиям ясного неба, нижняя – типу облачности с понижающим коэффициентом. Максимальное рассчитанное значение УФ индекса для ясного неба составило 7,2 на 1 июля 2008 г., а с учетом облачности – 6,5. Следует иметь в виду, что значения прогнозируемого УФ индекса по определению характеризуют степень риска (опасности) переоблучения.

Измерение УФ индекса проводится в период наступления местного полдня (т. е. около 10:00 UTC ± 20 минут). Зенитный угол Солнца для данного дня и времени измерения (либо расчета) определяется по астрономическим формулам. Для каждого типа облачности («ясно», «переменная», «облачно с прояснениями», «облачно») существует свой набор понижающих коэффициентов: для типа «облачно» понижающий коэффициент варьирует от 0,9 (высокая облачность) до 0,2 (низкая).

В 2008 г. на Лидарной станции Института физики НАН Беларуси регулярно

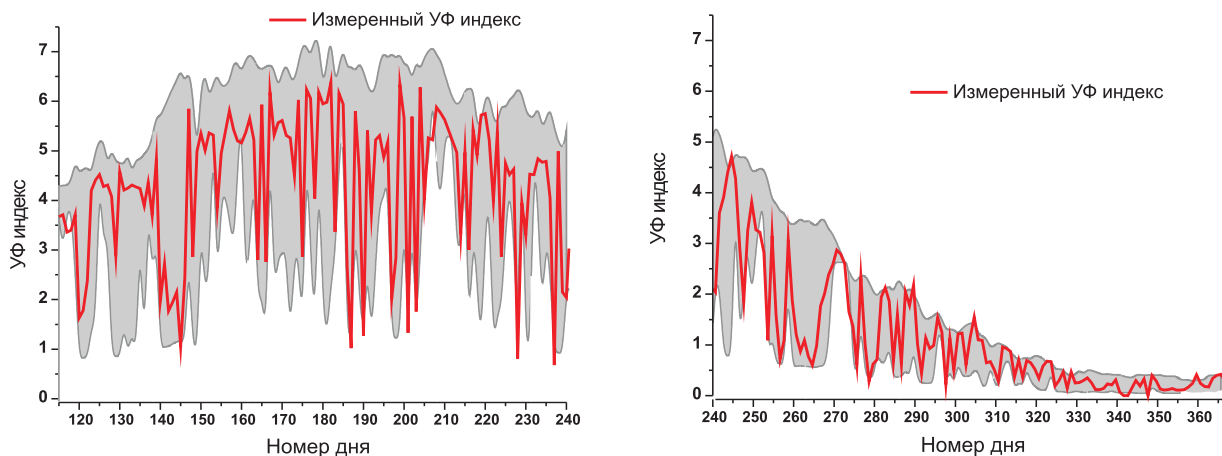


Рисунок 5.9 – Сезонное распределение УФ индекса в районе г. Минск (2008 г.) и рассчитанный диапазон значений для реально наблюдавшегося озона и реальных метеоусловий. Область серого цвета обозначает «коридор» для измеренных значений

проводились **измерения параметров аэрозолей** над территорией республики. На рисунках 5.10, 5.11 приведены среднегодовые функции распределения объемов аэрозольных частиц над г. Минск и обратные траектории трансграничного переноса воздушных масс.

В августе 2008 г. отмечено наиболее сильное возмущение стратосферного слоя со времени извержения вулкана Пинатубо (Филиппины, 1991 г.). В Минске 7 августа 2008 г. был зарегистрирован значительный рост содержания аэрозоля в слое 15-20 км. Анализ прямых и обратных траекторий показал, что направление переноса продуктов вулканических выбросов вулканов Окмок и Касаточи (оба вулкана находятся в гряде Алеутских островов) и время переноса

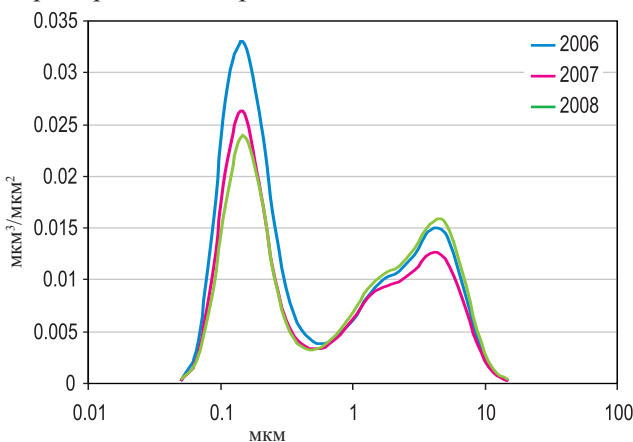


Рисунок 5.10 – Среднегодовые функции распределения объемов аэрозольных частиц в г. Минск в 2006-2008 гг.

соответствовали результатам наблюдений на лидарных станциях. Таким образом, были идентифицированы источники выбросов.

Стартовая станция (красная точка): Минск

7 - дневные обратные траектории: кинематика, 2008-06-02 T12:00:00

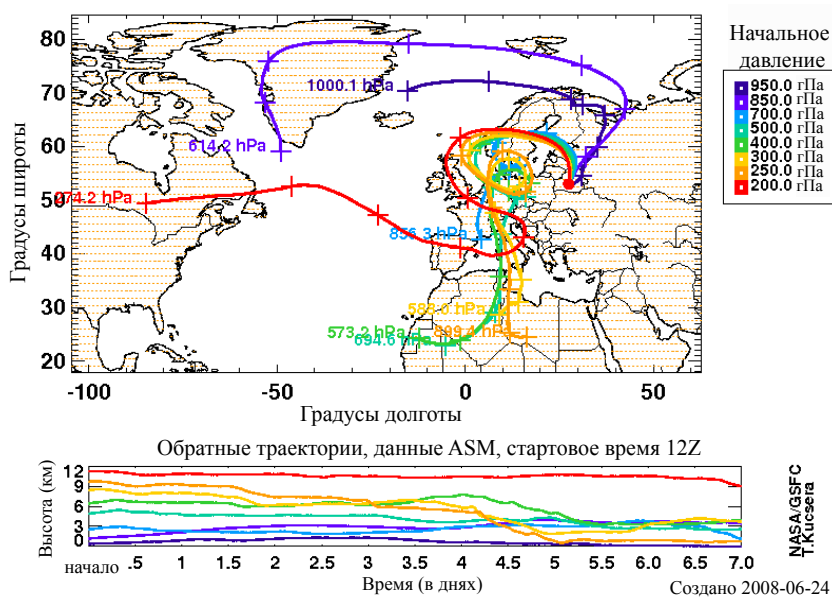


Рисунок 5.11 – Обратные траектории переноса воздушных масс для г. Минск, 2 июня 2008 г.

Концентрация озона в приземном слое атмосферы зависит как от естественных процессов, происходящих в тропосфере, так и от факторов, связанных с производственной деятельностью человека. При наличии коротковолнового солнечного излучения озон может образовываться в верхней тропосфере в среде прекурсоров озона – окислов азота и летучих органических соединений. Они содержатся в выхлопных газах транспортных средств и выбросах промышленных предприятий. В условиях прозрачной атмосферы, когда относительно коротковолновое солнечное излучение достигает тропосферы, а температура воздуха достаточно высока, концентрация озона в приземных слоях атмосферы может достигать значительных величин. Сочетание факторов метеорологического и антропогенного характера может приводить к возрастанию концентрации озона в приземной атмосфере до значений, превышающих предельно допустимые.

Мониторинг концентрации приземного озона проводится на Минской озонометрической станции НИИЦ МО БГУ, начиная с 2004 г. Для ежедневных измерений используется оптический трассовый измеритель ТриО-1, работающий по принципу аппаратуры DOAS. В ряде случаев проводились также параллельные измерения прибором ТЕI-49С (рис. 5.12).

Существующие на данный момент ПДК по приземному озону составляют: 45 ppb для 24-часового пребывания; 60 ppb – для восьмичасового и 80 ppb – для одночасового.

Максимальное зарегистрированное значение в 2008 г. составило 72 ppb (31 марта). В целом за 2008 год зафиксировано 35 дней, когда концентрация превышала 45 ppb (превышения наблюдались не круглосуточно).

На рисунке 5.13 представлены среднемесячные данные о концентрации озона, полученные в период 2004–2008 гг. на станции НИИЦ МО (Минск, Беларусь) и литовской станции Прейла. Значения концентрации приземного озона получены посредством усреднения в течение месяца результатов измерений в местный полдень. Обращает на себя внимание тот факт, что отклонение среднемесячной температуры в марте от нормы сопровождается появлением (либо исчезновением) максимума концентрации

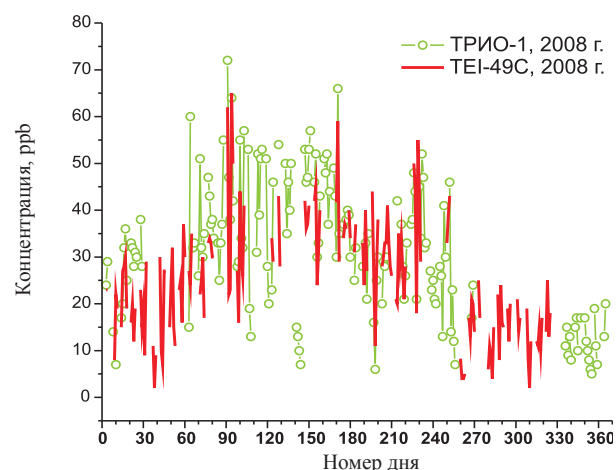


Рисунок 5.12 – Результаты измерений концентрации приземного озона на Минской озонометрической станции в 2008 г.

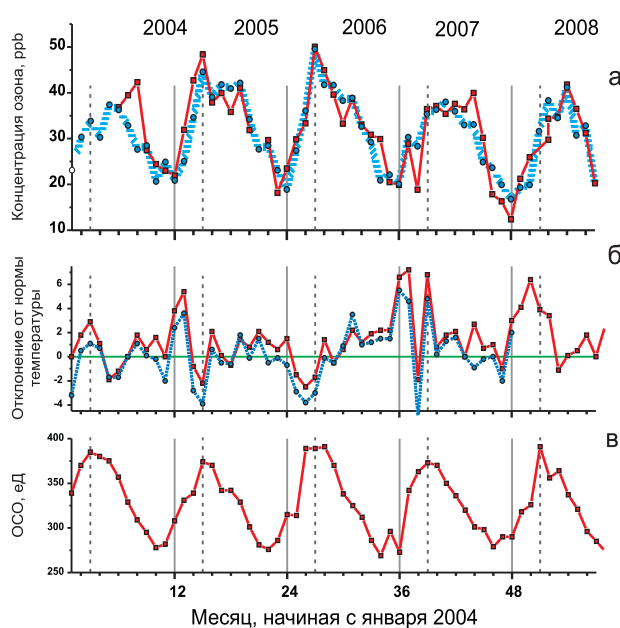


Рисунок 5.13 – Годовой ход концентрации приземного озона (а), отклонения среднемесячной температуры от климатической нормы (б) и общего содержания озона (в) за период 2004–2008 гг. Пунктиром отмечены значения для марта месяца каждого года.

приземного озона. Такая закономерность требует дальнейшего изучения.

Содержание двуокиси азота в атмосфере испытывает значительные суточные вариации. Наиболее быстрые изменения содержания NO_2 происходят в моменты восхода и захода Солнца. При измерениях во время сумерек, по мере восхода или захода Солнца, эти быстрые изменения происходят одновременно в разных слоях атмосферы, и, следовательно, NO_2 в разных слоях в эти периоды находится в различных фазах суточного хода. Более того, в разных фазах суточного хода NO_2 находятся области атмосферы, отстоящие друг от друга по

горизонтали в направлении положения Солнца. Поэтому очень важно сделать поправку на суточный ход NO_2 и учесть асимметрию утренних и вечерних изменений содержания NO_2 , связанную с медленным ночным накоплением и дневным фотолизом N_2O_5 .

Это достигается с использованием нестационарной фотохимической модели. Концентрация озона в модели считается фиксированной, концентрации остальных примесей рассчитываются. Параметры модели: вертикальные распределения озона, температуры (от которых зависят скорости реакций) и плотности воздуха, – полагаются сезонно зависимыми и заимствуются из эмпирических моделей, приведенных к широте наблюдения. Ослабление солнечной радиации при ее прохождении через атмосферу рассчитывается с учетом сферичности атмосферы. Отметим, что модель является замкнутой, поскольку включает только фотохимические процессы в приближении кислородно-азотной атмосферы, и поэтому легко применима для расчета суточного хода в разнообразных условиях.

На рисунке 5.14 представлены результаты измерений общего содержания NO_2 на Минской озонометрической станции с

начала 2007 г. Измерения выполнялись регулярно утром и вечером в сумерки по рассеянному из зенита солнечному излучению. Часть данных измерений отбраковывалась. Основным критерий отбраковки – нестационарность регистрируемых спектров: искажение их основных спектральных особенностей, связанных с поглощением озона и NO_2 . Причиной этого может быть быстро движущаяся неоднородная или разорванная облачность, влияние водяного пара, и, главным образом, нестационарность приземного содержания NO_2 во время сильных эпизодов загрязнения, а также низкий и густой туман, который наблюдался зимой 2006-2007 гг. в г. Минск и не позволял проводить корректные измерения ввиду большого разброса экспериментальных данных и невозможности проведения процедуры среднеквадратичного сглаживания. Расположение линии тренда показывает корректность фотохимической модели суточного хода относительного содержания диоксида азота в атмосфере.

Примеры результатов измерений общего содержания диоксида азота на Минской озонометрической станции в 2008 г. приведены на рисунке 5.15.

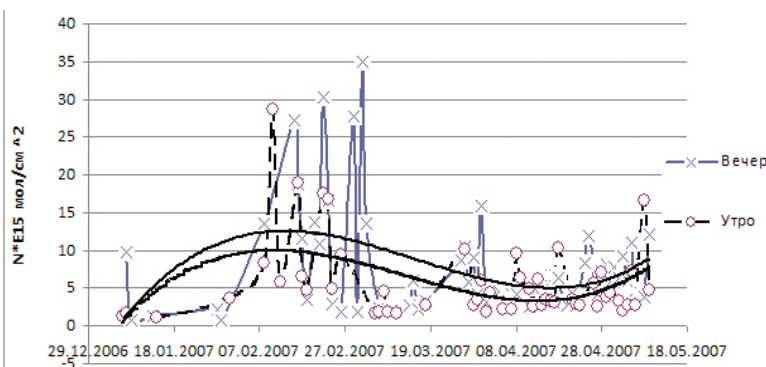


Рисунок 5.14 – Общее содержание NO_2 во время вечерних и утренних измерений, 2007 г.

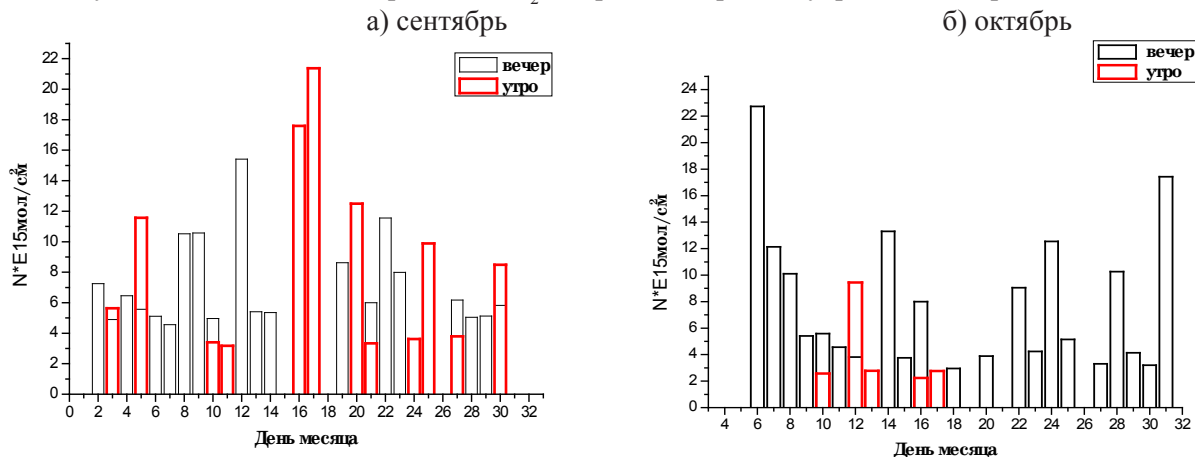


Рисунок 5.15 – Общее содержание NO_2 во время вечерних и утренних измерений, 2008 г.