

5 МОНИТОРИНГ ОЗОНОВОГО СЛОЯ

Мониторинг озонового слоя в Республике Беларусь регламентирован Законами Республики Беларусь, и проводится в рамках Государственной программы развития НСМОС. В 2009 г. на Минской озонометрической станции НИИЦ МО БГУ проводились регулярные измерения: общего содержания озона в столбе атмосферы (ОСО), концентраций приземного (тропосферного) озона, а также уровней приземного ультрафиолетового солнечного излучения.

Данные мониторинга ОСО служат экспериментальной базой для оценки состояния озонового слоя и его трансформации в результате антропогенного воздействия и естественных планетарных процессов. Они используются для изучения степени влияния этих процессов на климат в глобальном и региональном масштабах, а также для прогноза изменения уровней и доз биологически активного солнечного ультрафиолетового излучения у поверхности Земли.

Измерение спектров освещенности и оценка на их основе доз биологически активного солнечного ультрафиолетового излучения дает информацию о возможном риске возникновения у людей и животных онкологических заболеваний кожи, поражения органов зрения и иммунной системы, а также о возможности поражения сельскохозяйственных культур в период вегетации.

Данные мониторинга приземных концентраций озона, наряду с концентрациями атмосферных аэрозолей, являются важнейшей характеристикой загрязнения тропосферного воздуха и служат критерием безопасной жизнедеятельности человека и животных. В частности, 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 процессов трансграничного переноса загрязнений.

В 2009 г. *мониторинг общего содержания озона* (ОСО, Total Ozone) проводился на Минской озонометрической станции (27.47E, 53.83N) с помощью ультрафиолетового спектрометра ПИОН-УФ, предназначенного для измерения спектральной плотности энергетической освещенности (СПЭО) в диапазоне 285-450 нм. Определение ОСО по данным 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. Двухлетний 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), позволяет обеспечить точность измерения среднедневных значений ОСО в пределах $\pm 3 \div 4\%$.

Данные наземных измерений ОСО получены с использованием двух пар длин волн (323.5/305.5 и 329/308.9 нм) и проведены на Минской озонометрической станции. Результаты наземных наблюдений и сопоставления со спутниковыми измерениями (ОМІ) представлены на рисунке 5.1. Среднее относительное отклонение результатов наземных измерений ОСО от данных спутника ОМІ в 2009 г. не превысило 4%. Всего в процессе мониторинга ОСО в течение года измерено и обработано свыше 35 тыс. спектров.

Особенность динамики озоносферы над территорией Республики Беларусь в 2009 г. проявилась в том, что сезонный максимум среднемесячных величин, который ранее (с 1997 г.) наблюдался весной (в марте или апреле) зафиксирован в феврале. Значительное превышение нормы наблюдалось и в декабре (рис. 5.2). Среднемесячные значения общего содержания озона в атмосфере для февраля и декабря составили 412 ЕД и 338 ЕД,

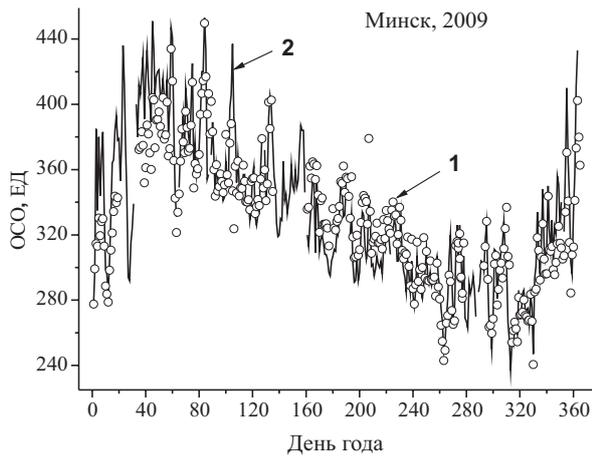


Рисунок 5.1 – Результаты наземных (1- ПИОН-УФ) и спутниковых (2 - ОМИ) измерений ОСО. Минск, 2009 г.

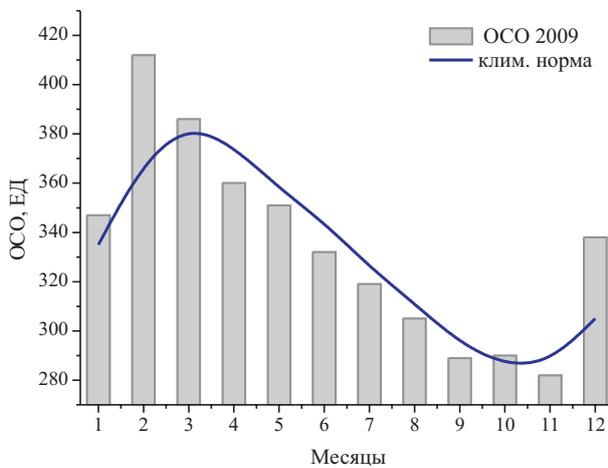


Рисунок 5.2 – Среднемесячные значения и климатическая норма ОСО для г. Минска

соответственно, что на 11-11,5% выше климатической нормы. В остальные месяцы значения ОСО были в среднем на 2,5-3,0% ниже нормы, за исключением января, марта и октября, когда среднемесячные значения были несколько выше нормы.

Максимальное значение ОСО составило 453 ЕД и наблюдалось 23.03.09, минимальное значение – 09.11.09 и составило 237 ЕД, т. е. абсолютные годовой максимум и минимум зафиксированы в обычное время.

Значительные уровни ОСО в феврале и в декабре обусловлены образованием в конце января в Северной Атлантике довольно большой по размерам стабильной области с высоким содержанием озона. Временами значения ОСО в ней превышали многолетнее среднее значение на 40%. Центр этой области в течение всего февраля располагался над Европейской частью Северо-Атлантического сектора, затрагивая своим краем территорию республики (рис. 5.3).

Повышенные среднемесячные значения в декабре обусловлены прохождением над территорией республики нескольких относительно небольших областей с повышенным содержанием озона, образование которых в это время года в Северном полушарии необычно.

Следует отметить, что динамика озоносферы над Европой в 2009 г. характеризовалась большой изменчивостью. Помимо стабильного максимума в феврале, над Европой наблюдалось большое число (18) отрицательных озоновых аномалий. Обычно резкое кратковременное значительное по величине снижение ОСО, т. е. отрицательные озоновые аномалии, характерно для весны и осени, когда происходит перестройка циркуляционных процессов в атмосфере. В последние годы прослеживается тенденция появления отрицательных озоновых аномалий в летнее время, проявилась она и в

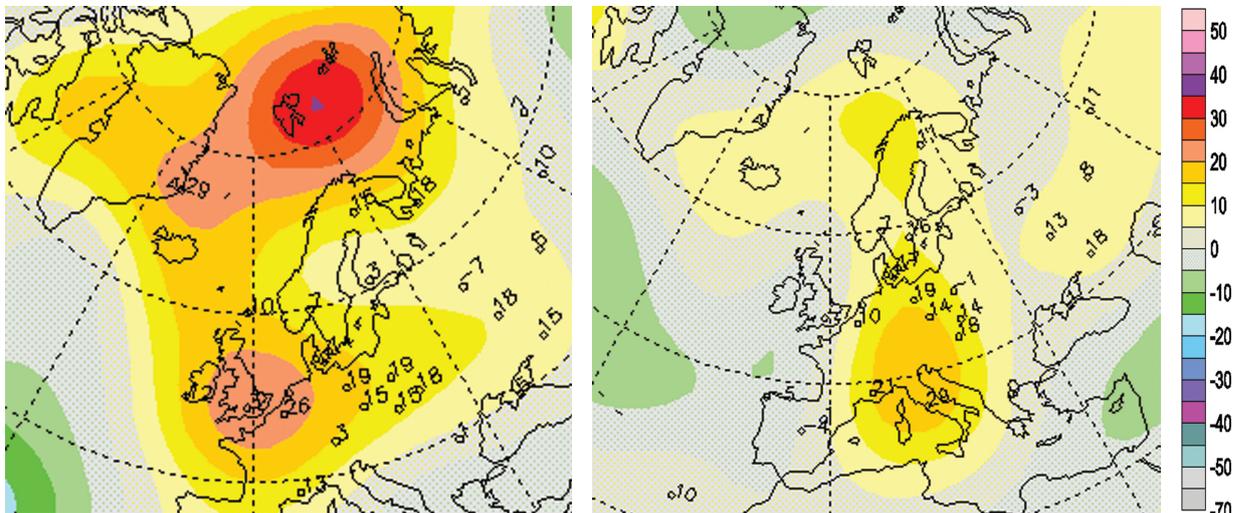


Рисунок 5.3 – Озоновые максимумы 11.02.09 и 01.12.09, %

2009 г. – над центральной Европой аномалии появлялись в июле и июне.

Не все аномалии, проходившие над Европой, затрагивали территорию республики. Всего в течение года над страной трижды наблюдалось снижение значений ОСО до 20% (2-3 марта, 8 апреля и 9 ноября). Остальные европейские аномалии затрагивали территорию республики только краем или исчезали раньше, чем оказывались над ней.

На рисунке 5.4 приведены ежедневные значения ОСО для г. Минска и соответствующая климатическая норма. Стрелками отмечены отрицательные озоновые аномалии.

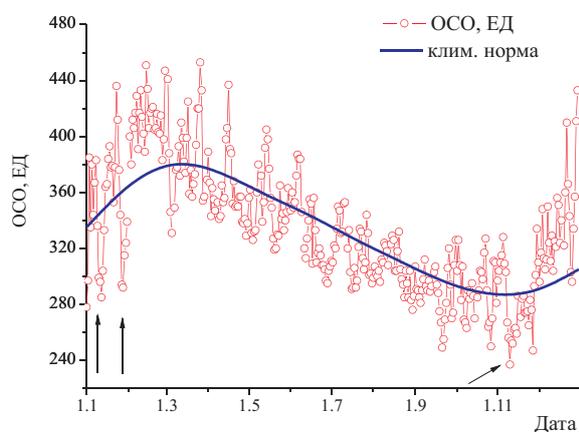


Рисунок 5.4 – Ежедневные значения ОСО для Беларуси в 2009 г.

Характерной особенностью географического расположения Республики Беларусь является то, что над ее территорией часто происходит смена воздушных масс различного происхождения. Чаще всего они приходят с запада и северо-запада, из Атлантики, реже над республикой располагаются воздушные массы арктического происхождения. Такой характер циркуляции

атмосферы над Беларусью вызывает частую и иногда резкую смену воздушных масс и сильную изменчивость ОСО над ней. Нередко, несмотря на небольшие размеры территории республики, различные ее регионы находятся под влиянием разных воздушных масс. Хотя границы синоптических образований не совпадают с зонами больших градиентов ОСО, можно предположить, что территория республики время от времени находится под областью, в которой ОСО быстро изменяется на небольших расстояниях, и распределение общего содержания озона по территории республики неоднородно.

Предварительный анализ показал, что ситуации, когда над республикой располагается зона градиентов ОСО, встречаются часто. Большие градиенты ОСО чаще всего наблюдаются в осенне-весенний период (хотя в последние годы нередко наблюдаются и летом). Величина градиента ОСО колеблется от 20 до 50 ЕД, и возрастает до 80-100 ЕД (в периоды, когда республика находится на периферии положительной или отрицательной озоновых аномалий).

Положение градиентных зон над Беларусью разнообразно. Иногда градиенты направлены вдоль широты или долготы, иногда – с юго-запада на северо-восток. Расположение градиентной зоны претерпевает сильные межсуточные изменения, иногда за один-два дня расположение зоны градиентов меняется на 90°. Примеры таких ситуаций с большими градиентами ОСО над территорией республики и с быстрой сменой расположения градиентной зоны приведены на рисунке 5.5.

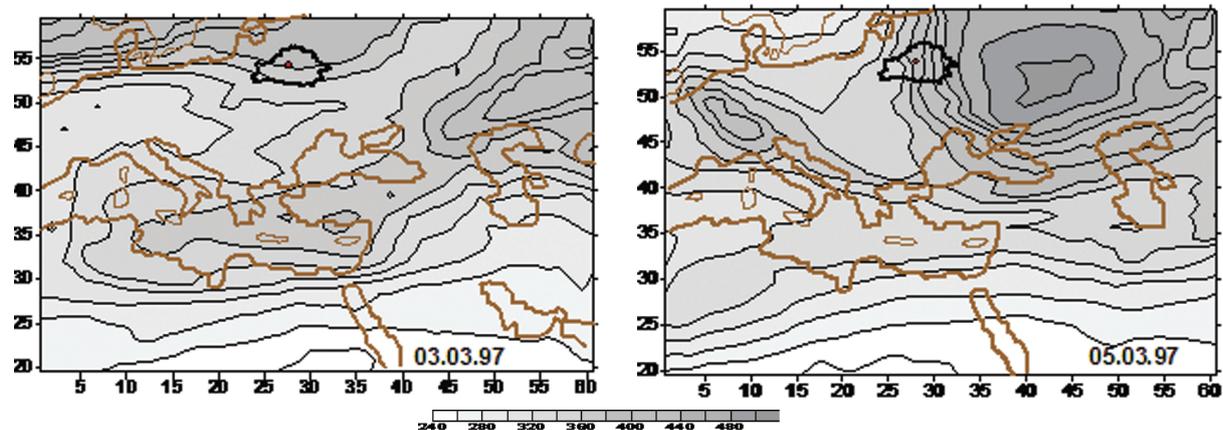


Рисунок 5.5 – Примеры расположения зон больших градиентов ОСО над территорией республики. Расстояние между изолиниями 20 ЕД (цветовая шкала показывает значения ОСО в ЕД)

Для пунктов, расположенных на Минской озонометрической станции и учебно-научном центре «Нарочанская биологическая станция» в районе оз. Нарочь, наблюдается либо синхронное (с небольшими сдвигами по абсолютной величине) изменение значений ОСО, либо практически полное совпадение (рис. 5.6). Однако в отдельные дни значения измеренных ОСО находились в противофазе относительно друг друга. Так, 15 апреля значение ОСО для г. Минска равнялось 437 ЕД, тогда как для района оз. Нарочь – всего 335 ЕД (рис. 5.7).

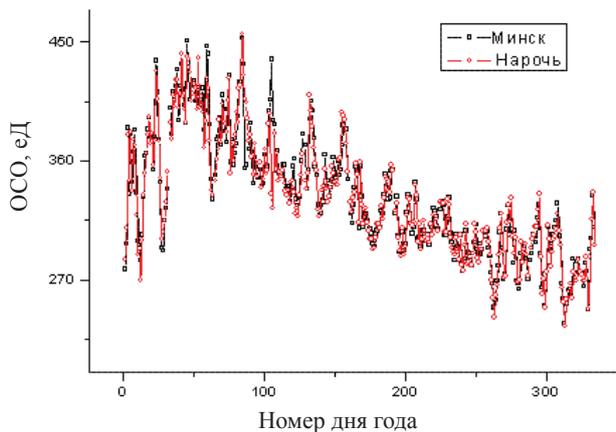


Рисунок 5.6 – Ежедневные значения ОСО для районов г. Минска и оз. Нарочь, 2009 г.

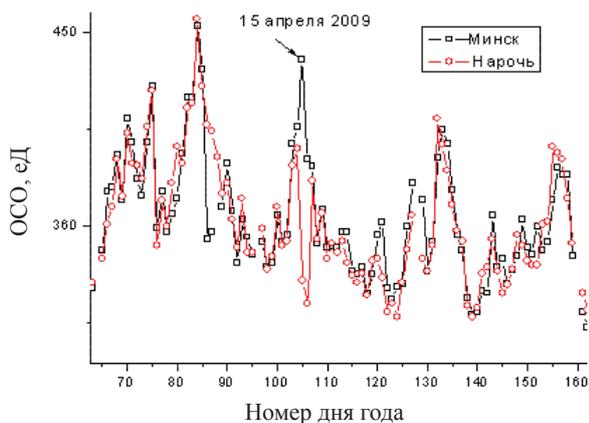


Рисунок 5.7 – Ежедневные значения ОСО для районов г. Минска и оз. Нарочь, весна 2009 г.

Для лучшего понимания значений ОСО, характерных для территории нашей страны, ниже представлен материал по арктической «озоновой дыре». Весной 2009 г. площадь антарктической «озоновой дыры» была сравнима по площади с «озоновой дырой», наблюдаемой в прошлые годы, и незначительно меньше, чем в 2008 г. Дефицит озона во время этого события составил более 50%, минимальные значения – величину 120 ЕД в конце сентября (рис. 5.8).

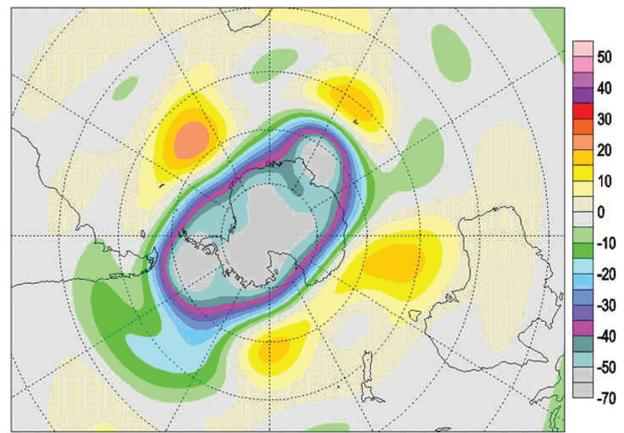


Рисунок 5.8 – Озоновая антарктическая аномалия

Измерения *спектральной плотности энергетической освещенности* (СПЭО) в спектральном диапазоне 285-450 нм проводились 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 фиксировались все данные метеонаблюдений (высота и балл облачности, дальность видимости, температура воздуха, влажность, давление атмосферы). В течение 2009 г. измерено и обработано более 35 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 5.9 показано распределение суточных эритемных доз, измеренных в 2009 г.

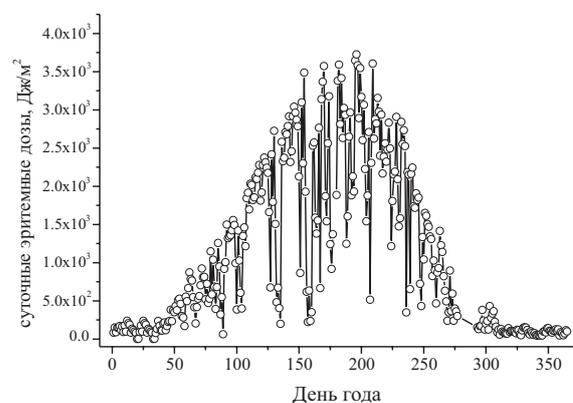


Рисунок 5.9 – Экспериментальные значения суточных эритемных доз солнечного УФ излучения, 2009 г.

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 2009 гг.

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

Суммарная годовая доза, зарегистрированная в 2009 г. (396 кДж/м²), несколько выше, чем в 2008 и 2007 годах, но не превышает средней дозы за весь период измерений (2003-2009 гг.) ~ 400 кДж/м².

На рисунке 5.10 приведено годовое распределение экспериментальных значений УФ индекса и рассчитанных для локального полудня и идеальной атмосферы (безоблачная, без аэрозолей и поглощающих тропосферных газов, альbedo подстилающей поверхности, равное 0,05). При расчетах использовались экспериментально измеренные значения ОСО.

Рисунок отражает факт влияния атмосферных параметров, в частности, облачности,

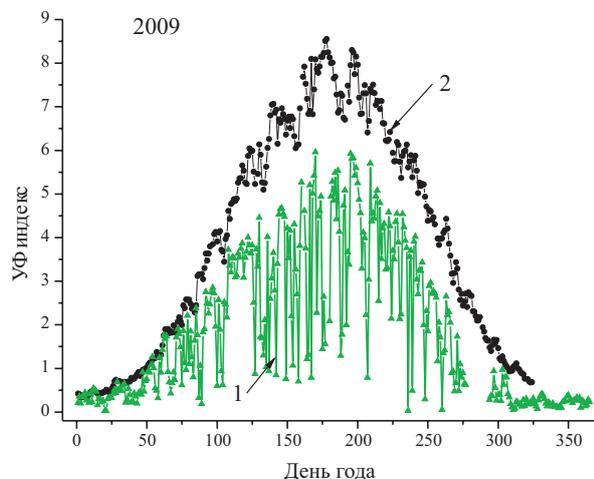


Рисунок 5.10 – Годовое распределение величин УФ индекса в Минском регионе, 2009 г. 1 – экспериментальные значения, 2 – рассчитанные для идеальной атмосферы (без облаков, аэрозолей и поглощающих примесей)

на уровни приземного солнечного УФ излучения. Тем не менее, изменения ОСО, особенно во время озоновых аномалий, когда возможно понижение содержания атмосферного озона на 20-25% по сравнению с многолетними данными, также могут существенно влиять на дозу биологически активного солнечного УФ излучения (в частности, могут приводить к «скачкам» УФ индекса в пределах одной – полутора единиц).

Измерения *концентраций приземного озона* проводились на Минской озонометрической станции с помощью оптического трассового измерителя ТрИО-1. Основные результаты мониторинга представлены на рисунке 5.11. Концентрации озона зарегистрированы в локальный полдень, около 10 часов утра по Гринвичу.

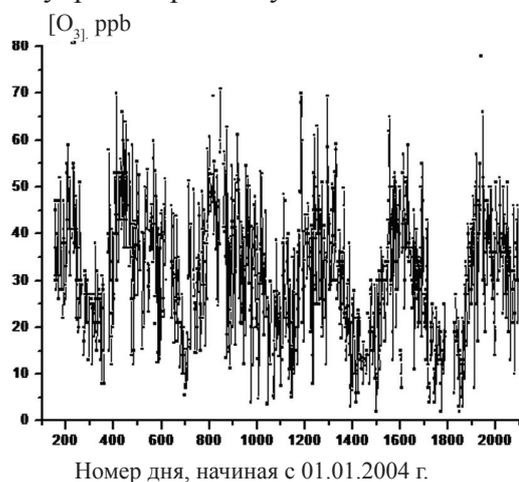


Рисунок 5.11 – Концентрации приземного озона, измеренные на озонометрической станции НИИЦ МО БГУ за период 2004-2009 гг.

Несмотря на некоторые годовые различия, сезонные изменения концентраций приземного озона в основных чертах повторяются из года в год. Тем не менее, значительные по амплитуде дневные изменения концентрации затрудняют возможность сделать более точные заключения относительно дневного и сезонного хода этих вариаций.

Весьма часто данные, усредненные по достаточно длинному временному интервалу, представляются более подходящими для обнаружения связей между атмосферными явлениями. В частности, концентрации озона, усредненные помесячно, оказались более информативными для анализа сезонных изменений и выявили специфический характер сезонного хода для различных лет наблюдений.

Годовые сезонные пики (весна и лето) отражены на рисунке 5.12а. Осенью и зимой концентрации приземного озона минимальны. Необходимо отметить, что сильный весенний максимум появляется не каждый год. Весенний максимум, вероятно, обусловлен активизацией процессов вертикального обмена в нижней тропосфере. Как результат, воздух с повышенным содержанием озона притекает из свободной тропосферы к земной поверхности. Летний же максимум, скорее всего, имеет фотохимическое происхождение и связан, главным образом, с активизацией процессов образования озона под действием УФ излучения в загрязненной атмосфере.

На рисунке 5.12b представлены отклонения среднемесячной температуры от климатической нормы для Беларуси и подобные отклонения для станции Preila (Республика Литва 55°20' N, 21°00' E, 5 м над уровнем моря) за период 2004-2009 гг.

Связь между положительными или отрицательными флуктуациями температуры и отсутствием либо наличием весеннего максимума концентрации приземного озона хорошо прослеживается для обоих пунктов наблюдения. Для двух данных мест амплитуда максимума обратно пропорциональна температуре воздуха: более высокая среднемесячная температура марта соответствует самой низкой амплитуде весеннего максимума концентрации озона. В частности, значительные положительные аномалии температуры в марте наблюдались (возникли) в 2004, 2007 и 2009 гг. Именно в эти годы весенний максимум концентрации приземного озона практически исчезал. В 2005 и 2006 гг., наоборот, среднемесячная температура в обоих пунктах была ниже нормы, и это сопровождалось сильно выраженным весенним максимумом концентрации приземного озона.

Достаточно трудно анализировать взаимосвязь (взаимоотношение) флуктуаций температуры и концентрации приземного озона в зимние месяцы, когда концентрации озона минимальны и ошибки их измерения могут быть весьма существенны.

Ситуация, в некотором роде отличная от описанной выше, наблюдалась в 2009 г.

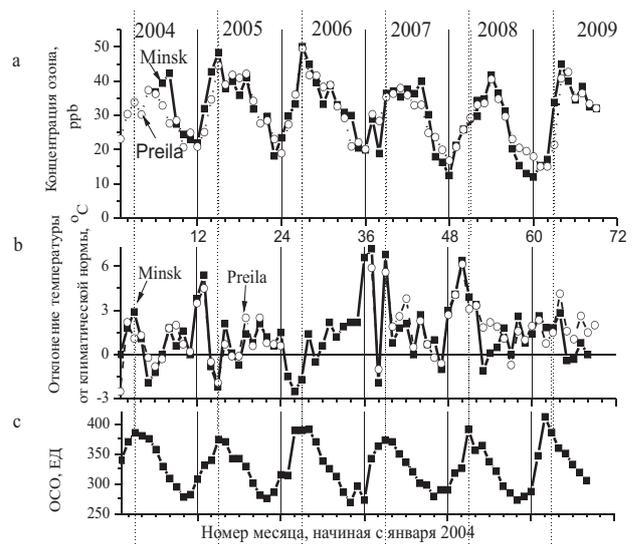


Рисунок 5.12 – Среднемесячные концентрации приземного озона в г. Минске и на станции Preila. (a), отклонения среднемесячных температур от климатической нормы в г. Минске и на станции Preila (b) и сезонный ход общего содержания озона в г. Минске (c). Март обозначен прерывистой (точечной) линией.

Прежде всего, весенний озоновый максимум хоть и наблюдался, но был сдвинут на апрель в г. Минске и на май в Литве на станции Preila (рис. 5.12а). Это может быть объяснено тем, что средняя температура в марте была несколько выше (необходимой для того), чтобы ожидать появления озонового максимума именно в этот период.

Тем не менее, существующее подобие сезонных изменений концентраций приземного озона в г. Минске и на станции Preila, их общая зависимость от температуры (для весеннего максимума) означает: обе станции в период 2004-2009 гг. большую часть времени были подвержены влиянию идентичного (либо одного и того же) поля тропосферного озона, определенного размерами и движением тропосферных воздушных масс, и только локальные метеорологические факторы различным образом «модулировали» это поле, приводя к специфическим дневным концентрациям и их дневному ходу в обоих местах. Эти различия, естественно, исчезали после усреднения по временному интервалу, превышающему типичный для данного региона период синоптических явлений (несколько дней или более).

Анализ результатов наблюдений показал:

– появление весеннего озонового максимума непосредственно связано со

среднемесячной температурой: максимум появляется (возникает) при достаточно низкой температуре и не появляется, когда температура возрастает. Однако физическая природа указанной связи недостаточно понятна, и неясно от чего зависит время начала весеннего максимума;

– флуктуации влажности и атмосферных осадков не приводят к значительным различиям среднемесячных концентраций приземного озона в г. Минске;

– общее содержание озона в столбе атмосферы не влияет на концентрацию приземного озона;

– анализ амплитуд дневных изменений температуры для г. Минска в 2004-2008 гг. не подтверждает предположения, что интенсивность вертикального воздушного обмена определяется не самой поверхностной температурой, а разностью между дневными и ночными температурами воздуха;

– наличие либо отсутствие снега сильно влияет на концентрацию озона. Сравнение сезонного хода приземного озона со временем снеготаяния в г. Минске за весь период наблюдения показывает, что эти два процесса достаточно близко связаны (табл. 5.2). В частности, сохранение снежного покрытия до конца марта однозначно указывает на наличие весеннего озонового максимума. Если снег тает раньше (например, в середине марта), максимум не появляется.

Поверхностная концентрация приземного озона определяется (по крайней мере, в весенний период) взаимодействием двух главных факторов: интенсивностью процессов вертикального атмосферного «перемешивания» внутри планетарного граничного слоя, а также наличием либо отсутствием

снежного покрова. Оба фактора зависят от одного параметра – температуры приземного воздуха. Интенсивность «перемешивания» возрастает с ростом температуры, приводя к росту концентрации озона у поверхности земли. В то же время, снежный покров исчезает по мере роста температуры и это, в свою очередь, ускоряет разрушение озона на земной поверхности и ведет к падению его концентрации. Таким образом, именно второй фактор главным образом обуславливает наличие либо отсутствие весеннего озонового максимума. Чем позже тает снег, тем более выраженный весенний озоновый максимум наблюдается и тем более он сдвинут к концу весны. После исчезновения снежного покрова эффективность разрушения озона на земной поверхности слабо меняется со временем, и первый фактор становится главным при инициализации следующего, летнего озонового максимума.

В 2009 г. были проведены работы по модернизации и расширению возможностей лидарного комплекса Института физики НАН Беларуси, обеспечивавшего измерение вертикальных профилей атмосферного озона и характеристик аэрозолей в диапазоне высот 8-35 км.

В рамках работ в 2009 г. был разработан и создан приемный модуль комплексной лидарной системы для зондирования озона. Были также разработаны и изготовлены дополнительные опто-электронные блоки, обеспечивающие зондирование озона в зоне 1,5-8 км и контроль аэрозоля в тропосфере.

Таблица 5.2 – Сопоставление времени таяния снега с появлением весеннего озонового максимума в г. Минске

Год	2004	2005	2006	2007	2008	2009
Время таяния снега	Середина марта	Начало апреля	Начало апреля	Середина марта	Очень рано	Конец марта
Наличие или отсутствие весеннего максимума концентрации приземного озона	Не наблюдался	Наблюдался в марте	Наблюдался в марте	Не наблюдался	Не наблюдался	Наблюдался в апреле