

5 МОНИТОРИНГ ОЗОНОВОГО СЛОЯ

Введение

Мониторинг озонового слоя представляет собой систему наблюдений за состоянием озонового слоя, а также оценку и прогнозирование его изменений в целях своевременного выявления негативных воздействий природных и антропогенных факторов [27].

Основными задачами мониторинга озонового слоя являются:

- получение данных о состоянии озоносферы над конкретными пунктами на территории Республики Беларусь, которые будут использованы для валидации орбитальных наблюдений, для оценки общего экологического состояния отдельных регионов, а также как параметры климатических и др. моделей;

- исследование механизмов стратосферно-тропосферных связей, в частности, влияния стратосферных процессов на динамику тропосферы и формирование регионального климата;

- исследование механизмов образования приземных концентраций озона и разработка методики их краткосрочного и среднесрочного прогноза.

Наблюдения за состоянием озоносферы и уровнем приземного солнечного излучения на территории Республики Беларусь проводятся:

- на Минской озонометрической станции (№ 354) НИИЦ МО БГУ (ул. Курчатова, 7);

- в Учебно-научном центре «Нарочанская биологическая станция» имени Г.Г.Винберга;

- в Гомельском государственном университете имени Франциска Скорины.

Мониторинг общего содержания озона (далее – ОСО) в столбе атмосферы проводится с помощью приборов, разработанных в НИИЦ МО БГУ (спектрорадиометра ПИОН-УФ-П, двухканальных фильтровых радиометров ПИОН-Ф).

Для оценки состояния озоносферы привлекаются также данные наблюдений за содержанием приземного озона и иных веществ в атмосферном воздухе, проводимых Белгидрометом.

Основной посыл и вывод

Общее содержание озона в атмосфере является очень изменчивой характеристикой, изменчивость которой проявляется на различных временных масштабах. В средних широтах, в которых располагается территория Республики Беларусь, ОСО характеризуется значительным сезонным ходом и сильной межгодовой изменчивостью (рисунок 5.1).

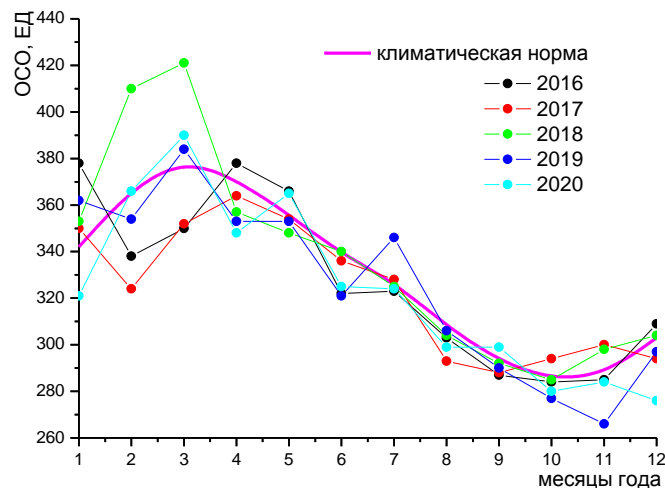


Рисунок 5.1 – Среднемесячные значения ОСО за период 2016-2020 гг. и климатическая норма

Сезонный ход для территории республики представлен климатической нормой (многолетние средние среднемесячных значений за период 1997-2020 гг.) и имеет типичный для средних широт ход – максимальные значения наблюдаются ранней весной (март), минимальные осенью (октябрь).

Следует отметить, что в период 1979-1993 гг. максимум годового хода наблюдался в апреле, в 90-х годах прошлого столетия он начал смещаться на более ранние сроки и после 2000 г. максимальные среднемесячные значения наблюдаются в марте. Положение годового минимума за рассматриваемый период (1979-2020 гг.) изменений не претерпело.

На сезонные вариации накладывается межгодовая изменчивость, которая может быть весьма велика и наиболее сильно проявляется в зимние и весенние месяцы.

Так, в 2018 г. среднемесячные значения ОСО в феврале и марте на 11-12 % превышали климатическую норму, а в 2016 и 2017 гг. были ниже нормы на 11-12 %. Такие существенные отклонения от климатической нормы обусловлены формированием значительных и долгоживущих положительных и отрицательных озоновых аномалий, располагающихся время от времени над территорией республики (рисунок 5.2).

Наиболее часто и большие по величине аномалии наблюдаются в зимне-весеннее время и осенью. Максимальное значение ОСО за рассматриваемый период зафиксировано 02.03.2018 и составило 528 ЕД, минимальное – 27.10.2019 и составило 228 ЕД.

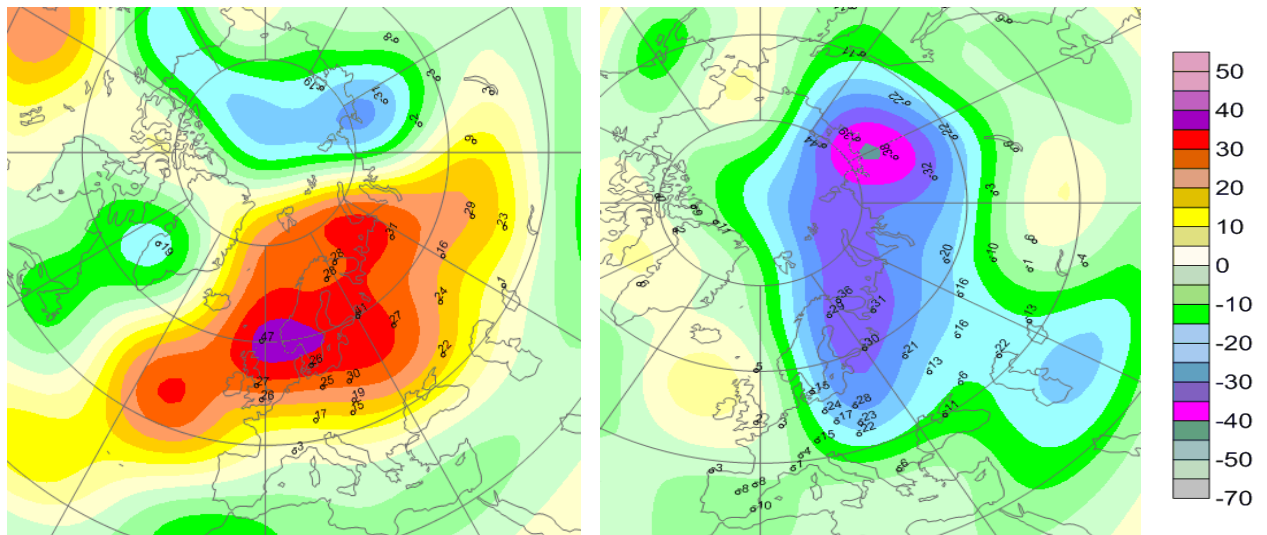


Рисунок 5.2 – Положительная озоновая аномалия 02.03.2018 и отрицательная озоновая аномалия 03.03.2016. Карты отклонений полей ОСО от многолетних средних значений, рядом приведена цветовая шкала отклонений в процентах

Подробная оценка

Стратосферный озон над территорией Республики Беларусь в 2020 г.

Среднемесячные значения ОСО над территорией Республики Беларусь в течение 2020 г. в основном было близко к климатической норме (рисунки 5.1 и 5.3), отклонения среднемесячных значений составили $\pm 1-3\%$, за исключением зимних месяцев (январь, отклонения -5% , декабрь; отклонения -9%), в апреле наблюдался дефицит -6% .

Ежедневные значения общего содержания озона в 2020 г. представлены на рисунке 5.3. Максимальное значение ОСО отмечено 15.03.2020 и составило 462 ЕД. Минимальное значение ОСО составило 263 ЕД и наблюдалось 20.11.2020.

Как и в предыдущие годы, наблюдались положительные и отрицательные озоновые аномалии.

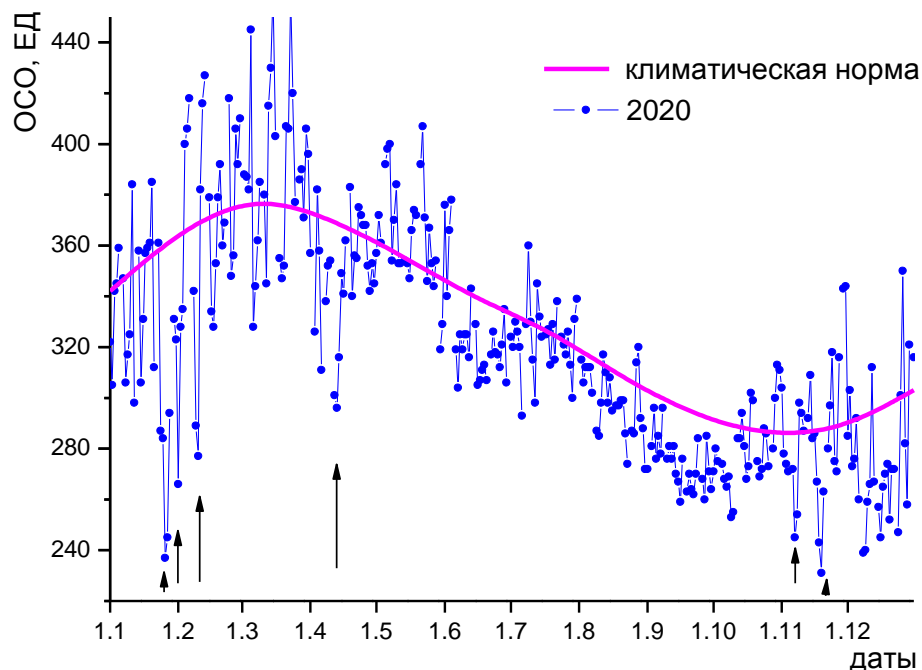


Рисунок 5.3 – Ежедневные значения ОСО и климатическая норма для г. Минска в 2020 г. Стрелками отмечены крупные отрицательные озонные аномалии

Наибольший дефицит озона в атмосфере над республикой, -29 %, наблюдался 26 и 27 января (рисунок 5.4) и был связан с редкой для Северного полушария ситуацией: стратосферный полярный вихрь в 2020 г., который формируется полярной зимой в северном полушарии, был очень сильным. Волновая активность гравитационных волн, которая в Северном полушарии обычно препятствует сильному охлаждению стратосферы, была чрезвычайно мала.

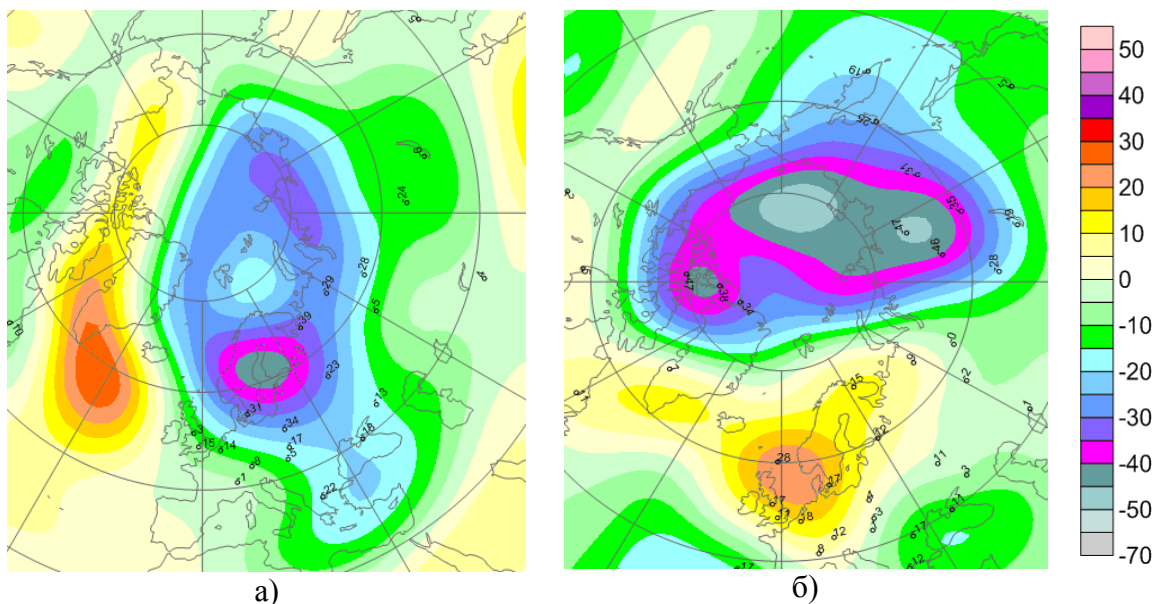


Рисунок 5.4 – Арктическая озонная дыра 27.01.2020 (а) и 03.03.2020 (б). Показаны отклонения от многолетних средних значений (цветовая шкала в процентах от нормы)

В результате этого внутри полярного вихря температура экстремально понизилась, что способствовало формированию полярных стратосферных облаков, на частицах которых происходит гетерогенное разрушение озона озоноразрушающими веществами. Таким образом, над акваторией Арктики сформировалась отрицательная озоновая аномалия (дыра), подобная той, которая формируется в конце зимы – начале весны вот уже длительное время над Антарктидой.

Сформировавшаяся над Арктикой область низких температур и полярных стратосферных облаков просуществовала довольно длительное время, до апреля, и привела к значительному истощению озона в этой области.

В конце марта зафиксировано рекордно низкое для Арктики общее содержание озона – 205 ЕД. Типичные самые низкие значения озона, наблюдаемые над Арктикой в марте, обычно составляют не менее 240 единиц Добсона.

Столь низкие значения ОСО в Арктике еще не фиксировались. Озоновая дыра в Арктике 2020 г. имела гораздо меньшую максимальную пространственную протяженность по сравнению с типичной протяженностью антарктической дыры.

Именно эта аномальная область с низкими значениями ОСО, перемещаясь вместе с вихрем, и обусловила значительный дефицит озона над территорией Республики Беларусь в конце января 2020 г. Эта же область с низкими ОСО затронула ненадолго территорию республики в феврале и начале апреля, вызвав понижение ОСО на -23 % и -20 % соответственно.

Подобные явления сильного истощения озона в Арктике происходят не часто – последний раз столь же сильное истощение озонового слоя наблюдалось над Арктикой весной 2011 г.

Состояние озоносферы в Южном полушарии

Важно отметить, что в последние годы вследствие расширения и углубления исследований стратосферных процессов имеет место общая тенденция рассматривать озоносферу Земли как единое целое. Между стратосферными процессами и состояниями озоносферы обоих полушарий все чаще прослеживается определенная взаимосвязь.

Область с дефицитом озона (озоновая дыра), ежегодно возникающая над Антарктикой, в 2020 г. являлась одной из самых крупных и глубоких за последние годы (рисунок 5.5).

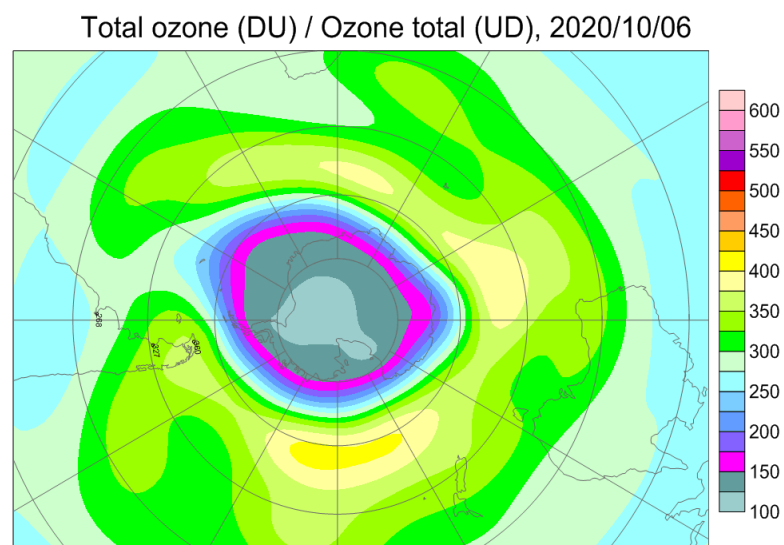


Рисунок 5.5 – Распределение полей общего содержания озона 06.10.2020 над Антарктидой. Рядом приведена цветовая шкала в единицах Добсона (ЕД)

Эксперты ВМО сообщили, что озоновая дыра 2020 г. быстро росла с середины августа и достигла пика в 24 миллиона квадратных километров в начале октября. Самым низким значением ОСО, зарегистрированным в 2020 г. над Антарктидой, является значение 95 ЕД, которое зафиксировано 1 октября.

Развитие явления варьируется год от года и после необычайно маленькой и кратковременной озоновой дыры в 2019 г., вызванной особыми метеорологическими условиями, в 2020 г. снова зарегистрировано довольно большое истощение озона, что подтверждает необходимость продолжения строгого соблюдения Монреальского протокола, запрещающего выбросы озоноразрушающих химических веществ.

Концентрации озона в приземном слое тропосферы

В отличие от стратосферного озона, защищающего живые организмы на Земле от разрушающего действия солнечного ультрафиолетового излучения, приземный озон является загрязняющим веществом, поскольку отрицательно влияет на здоровье человека и животных, оказывает угнетающее воздействие на леса и сельскохозяйственные культуры. Озон относится к загрязнителям атмосферы первого класса опасности.

В результате человеческой деятельности происходит увеличение концентрации приземного озона. Особенно заметно это в Северном полушарии. Концентрация озона в крупных городах, в условиях сильно загрязненной атмосферы, может достигать уровней, которые в десятки раз превышают естественные (фоновые) уровни и достаточны для ошутимого воздействия на живые организмы.

В 2020 г. на Минской озонметрической станции мониторинг концентрации озона в приземном слое атмосферы проводился созданным в НИИЦ МО БГУ оптическим трассовым измерителем озона ТриО-1 и сертифицированным газоанализатором (озонметром) ТЕИ-49С фирмы Thermo Environment Instruments (USA), который с 2019 г. является основным средством измерения. В 2020 г. наблюдения проводились до сентября. После этого ведется ремонт озонметра ТЕИ-49С.

Результаты наблюдений за приземными концентрациями озона на станции НИИЦ МО БГУ в 2013-2020 гг. приведены на рисунке 5.6. Измерения проводились в местный полдень (приблизительно 13.00 местного времени). Показаны также среднемесячные значения полуденных концентраций.

Анализ результатов показывает характерную закономерность – высокая корреляция полуденных концентраций с максимальными суточными значениями (коэффициент корреляции – около 0,9).

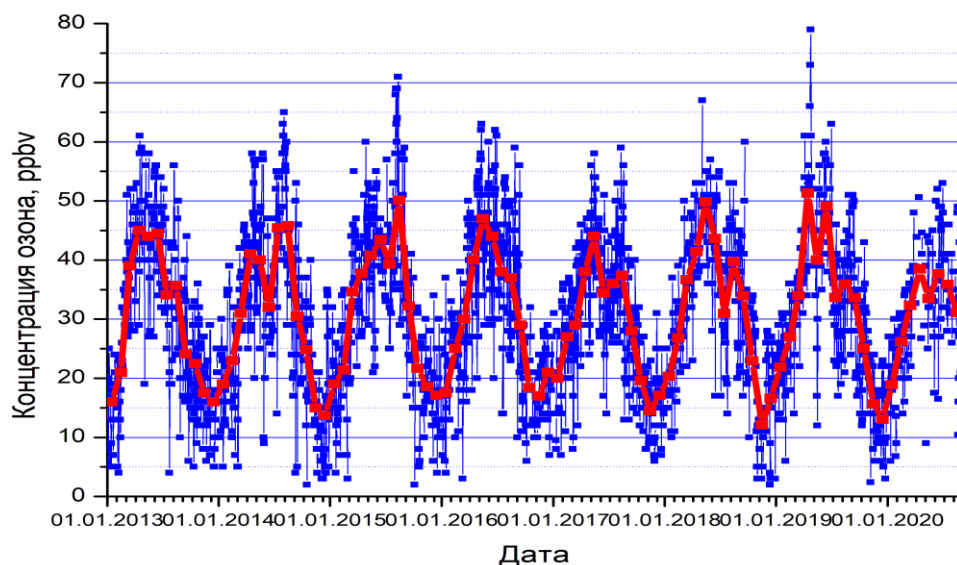


Рисунок 5.6 – Полуденные концентрации приземного озона в 2013-2020 гг. по данным Минской озонметрической станции НИИЦ МО БГУ

Анализ данных мониторинга и сравнительная оценка вариативности приземных концентраций озона в Минском регионе в период 2016-2020 гг.

В 2014 г. была определена динамичная климатическая норма концентрации приземного озона для г. Минска. Характерной особенностью динамичной нормы является учет многолетнего тренда климатического параметра за период, использованный для расчета нормы. Было показано, что многолетний тренд приземного озона имеет тенденцию к постепенному снижению наблюдаемых концентраций, и рисунок 5.6 не противоречит сделанному выводу.

Указанная тенденция, вообще говоря, не согласуется с результатами наблюдений в Западной Европе, где в последние десятилетия отмечается постепенный рост концентрации приземного озона. Точно природа такого поведения приземного озона пока не установлена. Возможно, причиной являются: высокая влажность воздуха, сильная облачность, влияющая на уровень фотохимической активности солнечного излучения у поверхности земли, и специфика антропогенного загрязнения воздуха. Эта проблема требует дальнейшего изучения.

Следует также отметить, что в основном наблюдения за приземным озоном проводятся в городах Беларуси, где содержание загрязняющих веществ в атмосферном воздухе способствует разрушению приземного озона. Иными словами, концентрация приземного озона в городах Беларуси обычно ниже, чем в сельской местности. Это, в частности, подтверждается сравнением поведения концентраций приземного озона в городах и в Березинском биосферном заповеднике. Основными причинами изменения годового и суточного хода концентраций приземного озона являются антропогенное загрязнение воздуха и изменение климата.

Тенденция к снижению наблюдаемых концентраций приземного озона была отмечена несколько лет назад на основании расчетов климатической нормы приземного озона и его многолетнего тренда в г. Минск, эта тенденция получает подтверждение в последние и в других городах Беларуси, в первую очередь за счет интенсификации автомобильного движения.

Загрязнение воздуха оказывает существенное влияние на концентрацию приземного озона. В некоторых случаях оно способствует генерации озона, в других – его разрушению. В условиях Республики Беларусь, как правило, реализуется последний случай. Уменьшению концентраций также способствуют относительно низкие температуры и высокая влажность воздуха.

На основании данных мониторинга атмосферного воздуха, проводимого Белгидрометом, установлено, что в течение суток наибольшие концентрации загрязняющих веществ чаще всего регистрируются в утреннее и вечернее время и значительно реже днем. Рост концентраций в утренние часы не зависит от сезона и происходит в одно и то же время, а вечерний пик частоты повышенных концентраций смещается на более позднее время суток при переходе от зимы к лету. Рисунок 5.8 иллюстрирует сказанное.

Результаты мониторинга атмосферного воздуха свидетельствуют о зависимости концентраций загрязняющих веществ от метеорологических элементов. В частности, именно дневной «провал» в частоте возникновения повышенных концентраций антропогенных загрязняющих веществ в атмосферном воздухе городов обязан усилению термической конвекции (снижению вертикальной устойчивости атмосферы), способствующей эффективному переносу воздуха в более высокие слои тропосферы, и повышению скорости ветра, приводящему к выносу загрязнений за пределы города. Суточный ход вертикальной устойчивости атмосферы над городами Республики Беларусь показывает в среднем несущественные различия по всей территории страны: устойчивость повсеместно максимальна в ночное время, минимальна в послеполуденное и постепенно увеличивается от лета к зиме. Это подтверждается расчетами вертикального градиента температуры в планетарном пограничном слое (рисунок 5.9).

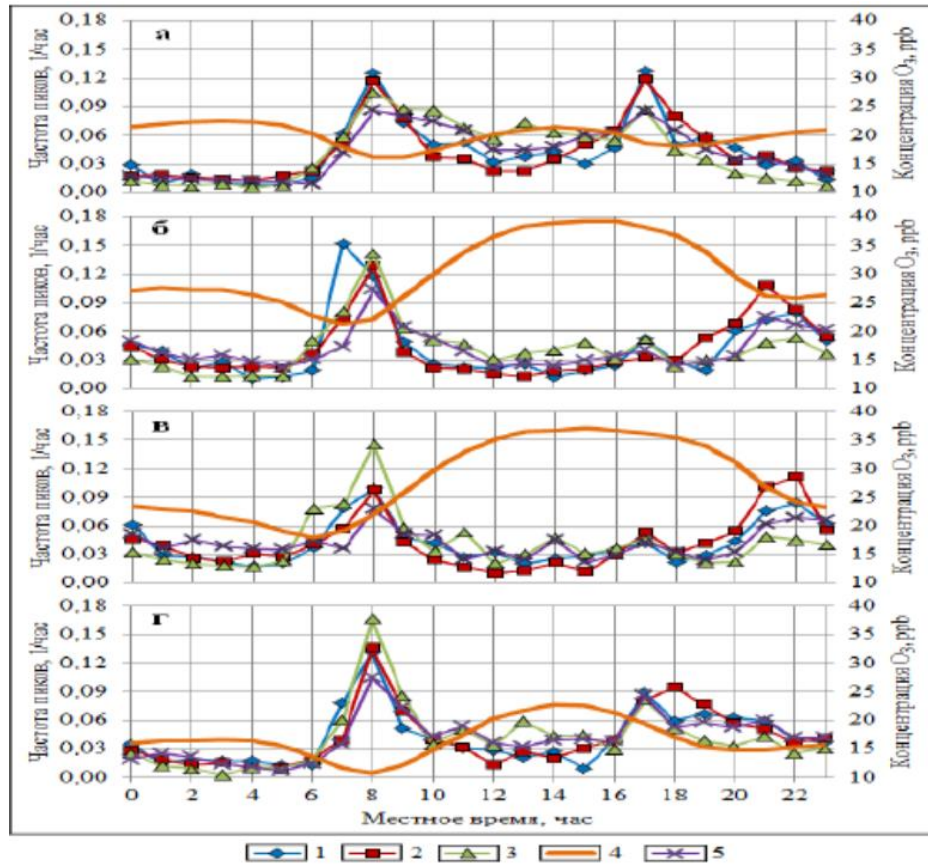


Рисунок 5.8 – Распределение частоты появления повышенных концентраций антропогенных загрязняющих веществ по времени суток и суточный ход концентрации озона в разные сезоны. Кривые построены на основании результатов наблюдений в областных центрах республики за период 2014 – 2016 гг.: а – зима, б – весна, в – лето, г – осень. 1 – CO, 2 – NO₂, 3 – NO, 4 – O₃, 5 – ЛОС (летучие органические соединения)

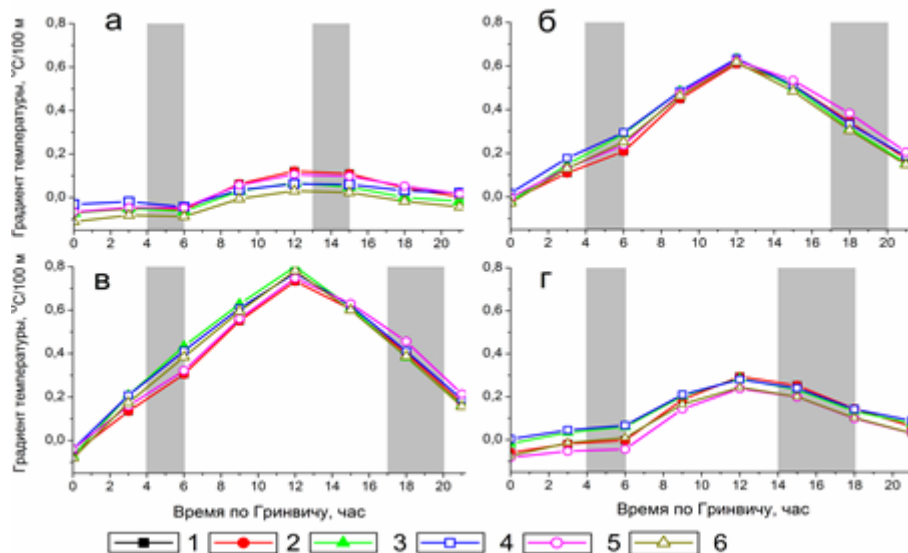


Рисунок 5.9 – Средний суточный ход вертикального градиента температуры в пограничном слое тропосферы в разные сезоны: а – зима, б – весна, в – лето, г – осень. 1 – Брест, 2 – Гомель, 3 – Могилев, 4 – Витебск, 5 – Гродно, 6 – Минск. Закрашены интервалы времени, отвечающие наибольшей частоте появления повышенных концентраций антропогенных загрязняющих веществ

Увеличение градиента свидетельствует об уменьшении устойчивости – интенсификации термической конвекции, снижение – о повышении устойчивости.

На рисунке 5.10 показан суточный ход вертикального градиента температуры в различные сезоны в областных городах Республики Беларусь. Результаты получены путем усреднения доступных данных прогнозных расчетов в каждый из сезонов за 2013-2015 гг. для Минска и Витебска, за 2014-2016 гг. для Гомеля и Гродно и за 2013-2016 гг. для Бреста и Могилева. Видно, что наиболее высока устойчивость атмосферы в зимнее время. При этом она слабо зависит от времени суток. Весной и летом устойчивость повышается в ночные часы и падает в дневное время. Минимум устойчивости (максимум вертикального градиента температуры) обычно наступает в послеполуденное время (около 12 часов по Гринвичу). В осенний период параметр устойчивости занимает промежуточное положение между зимними и весенне-летними значениями.

Во все сезоны пики повышенных концентраций загрязняющих веществ (серые области на графиках рисунка 5.10) отвечают пониженным, однако не минимальным (а зимой – даже несколько повышенным) значениям вертикального градиента температуры. Поэтому нельзя утверждать, что именно этот параметр оказывает определяющее влияние на сезонный сдвиг вечернего максимума загрязнений и на постоянство утреннего.

Суточный ход климатической нормы скорости ветра проявляет особенности, похожие на поведение максимумов концентраций загрязняющих веществ: вечером снижение скорости ветра также смещается по времени суток в зависимости от сезона, а утреннее повышение постоянно во времени и не зависит от сезона (рисунок 5.10).

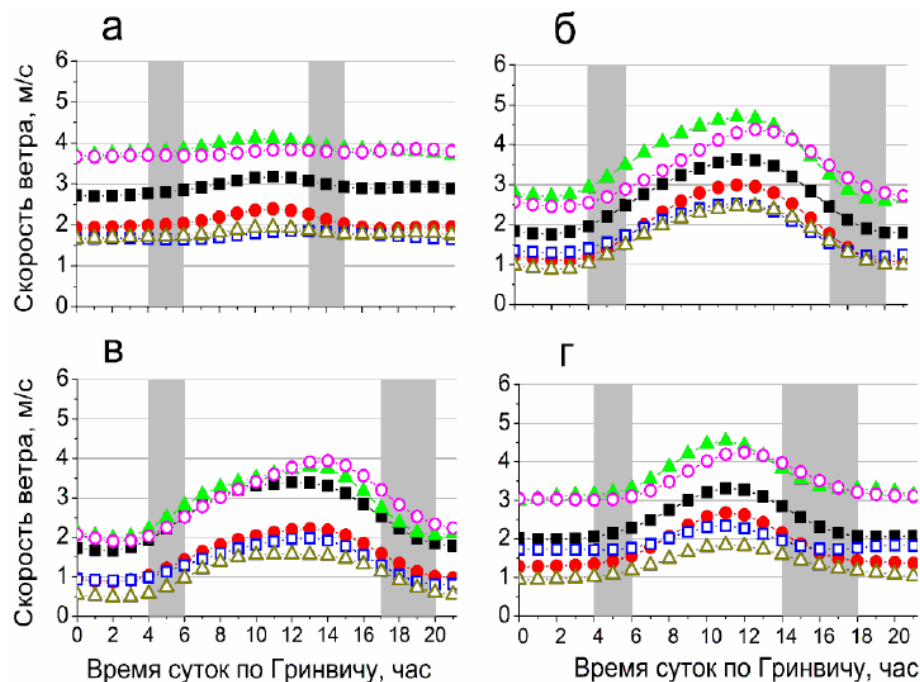


Рисунок 5.10 – Климатические нормы суточного хода скорости ветра в областных центрах Беларуси: а – зима, б – весна, в – лето, г – осень. 1 – Брест, 2 – Гомель, 3 – Могилев, 4 – Витебск, 5 – Гродно, 6 – Минск. Закрашены интервалы времени, отвечающие наибольшей частоте появления повышенных концентраций антропогенных загрязняющих веществ

Время вечернего пика частоты повышенных концентраций загрязняющих веществ следует за сезонным смещением минимума скорости ветра. Однако не только поведение скорости ветра и интенсивности термической конвекции являются причинами появления двух суточных максимумов концентрации антропогенных загрязнений. Основными источниками загрязнений в крупных городах в настоящее время являются автомобильный транспорт, промышленные предприятия и предприятия теплоэнергетики. Интенсивность

выбросов автотранспорта увеличивается утром, выходит на плато в дневное время и снижается с наступлением темного времени суток. Выбросы большинства промышленных предприятий происходят в течение рабочего дня и заканчиваются после пяти-шести часов местного времени при работе в одну смену, или в 23-24 часа при двухсменной работе. Немногое число предприятий работает круглосуточно. Следовательно, интенсивность источников загрязнения атмосферного воздуха городов снижается в ночное время.

С учетом сказанного можно утверждать, что при условии постоянной в течение суток интенсивности источников антропогенных загрязнений повышенная вертикальная устойчивость атмосферы и снижение скорости ветра в ночное время способствуют росту концентраций загрязняющих веществ в воздухе в этот период суток. Однако интенсивность источников достоверно падает ночью, и концентрации загрязняющих веществ в воздухе, как показывают наблюдения, действительно снижаются. Поэтому эффекты торможения рассеяния загрязнений проявляются только утром и вечером, когда еще достаточно эффективны причины, их вызывающие, а интенсивность источников уже (утром) или еще (вечером) велика.

Иными словами, снижение концентраций загрязнений в городском воздухе после их вечернего пика обусловлено снижением интенсивности выбросов, несмотря на уменьшение эффективности рассеяния загрязнений. Точно также увеличение загрязненности воздуха в утренние часы следует связывать с повышением активности источников выбросов, а нарастающие процессы рассеяния окончательно формируют утренний пик, обеспечивая последующее снижение концентраций загрязнений.

Таким образом, главной причиной появления утреннего и вечернего пиков загрязнения воздуха в городах являются выбросы автомобильного транспорта, начало и конец интенсивного движения которого коррелируют со временем максимальных концентраций загрязнений воздуха и следуют тем же сезонным изменениям. При этом суточный ход метеорологических элементов, оказывающих влияние на рассеяние загрязняющих веществ, также играет существенную роль.

Суточный ход концентрации приземного озона существенно отличается от поведения концентраций антропогенных загрязняющих веществ в городах Беларуси: достигает высоких показателей днем и постепенно снижается в ночное время. Повышенные концентрации прекурсоров озона в утренние и вечерние часы также вносят вклад в уменьшение его концентраций в городском воздухе.

Если исключить влияние различающихся метеорологических элементов и загрязнения воздуха, концентрации озона, измеренные в разных регионах страны, должны быть близкими друг другу. Скорректированные на случай одинаковых условий значения измеренных концентраций озона для атмосферного воздуха вне антропогенных источников, влияющих на озон, должны быть репрезентативными для всей территории страны, по крайней мере, в периоды, когда она находится под воздействием одной воздушной массы. Поэтому рационально ввести в употребление и использовать на практике термин «климатическая норма приземного озона для «чистой» атмосферы и среднего климата Беларуси». Именно такая норма должна служить «точкой отсчета» для учета влияния метеорологических и антропогенных факторов на приземный озон, а также оценки его долговременных изменений (тренда) в небольшой по территории стране.

Некоторые результаты расчетов ожидаемых концентраций озона с использованием разработанной в НИИЦ МО БГУ модели «чистой нормы» и полученного уравнения регрессии в сравнении с измеренными значениями для всех областных центров приведены на рисунках 5.11-5.17.

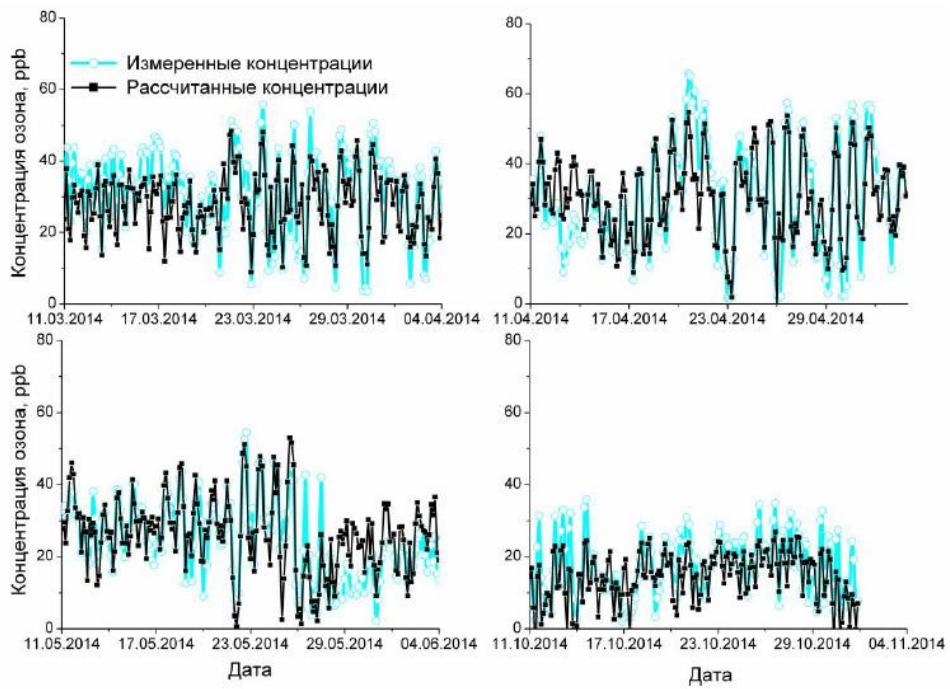


Рисунок 5.11 – Сравнение концентраций озона по данным мониторинга атмосферного воздуха на пункте наблюдения, расположенного по адресу г. Минск, ул. Корженевского, с рассчитанными по уравнению регрессии

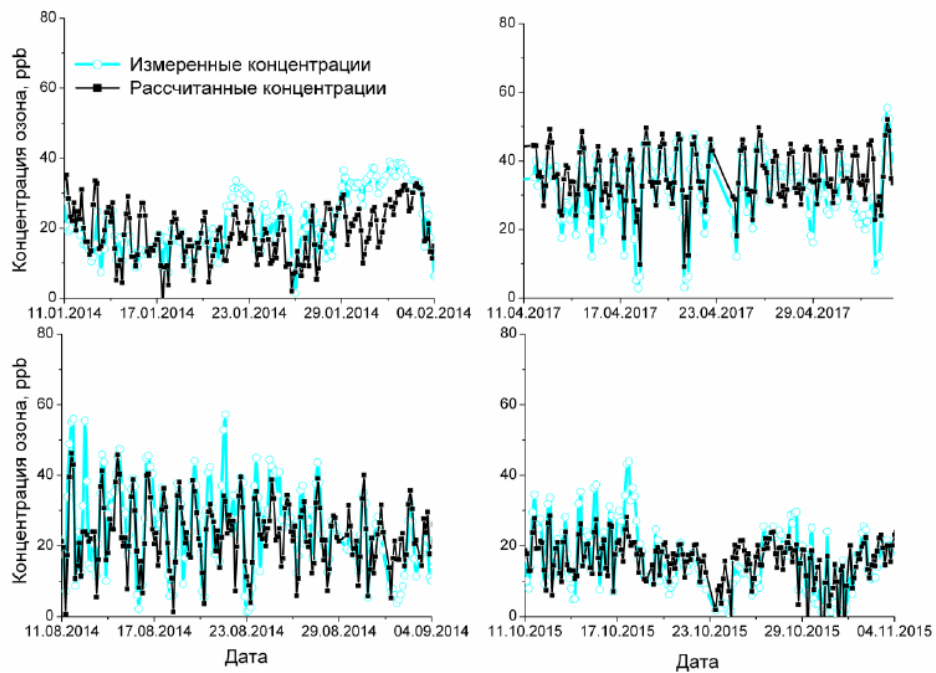


Рисунок 5.12 – Сравнение концентраций озона по данным мониторинга атмосферного воздуха на пункте наблюдения, расположенного по адресу г. Минск, ул. Радиальная, 50, с рассчитанными по уравнению регрессии

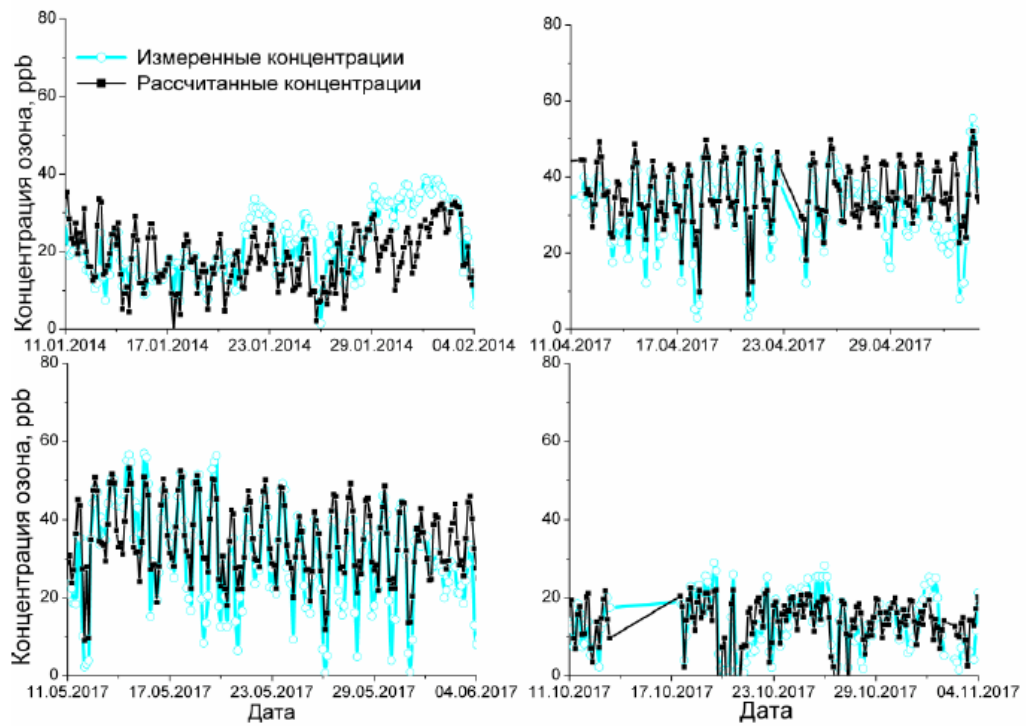


Рисунок 5.13 – Сравнение концентраций озона по данным мониторинга атмосферного воздуха на пункте наблюдения, расположенного по адресу г. Могилев, пер. Крупской, 5, с рассчитанными по уравнению регрессии

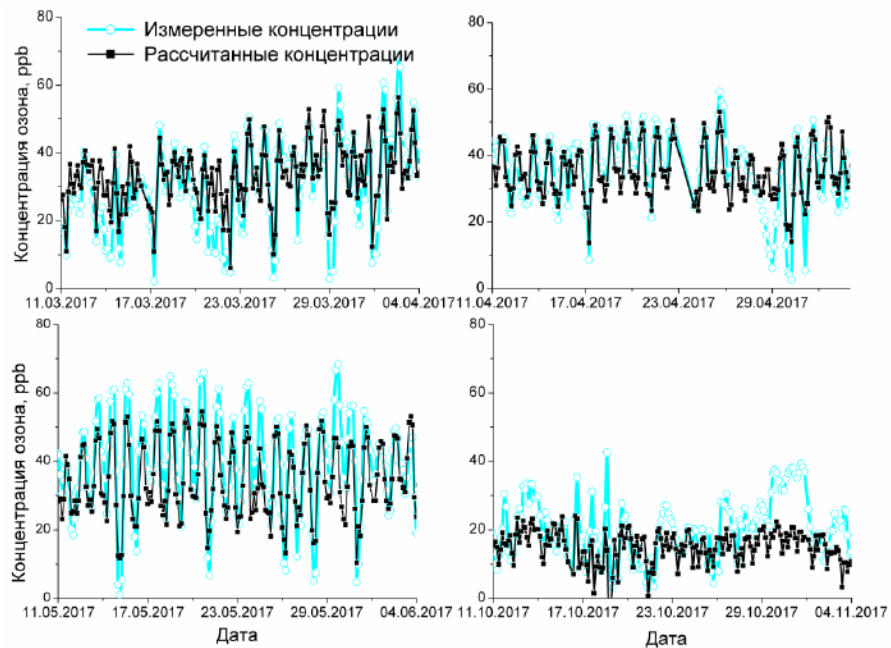


Рисунок 5.14 – Сравнение концентраций озона по данным мониторинга атмосферного воздуха на пункте наблюдения, расположенного по адресу г. Брест, ул. Северная, 75, с рассчитанными по уравнению регрессии

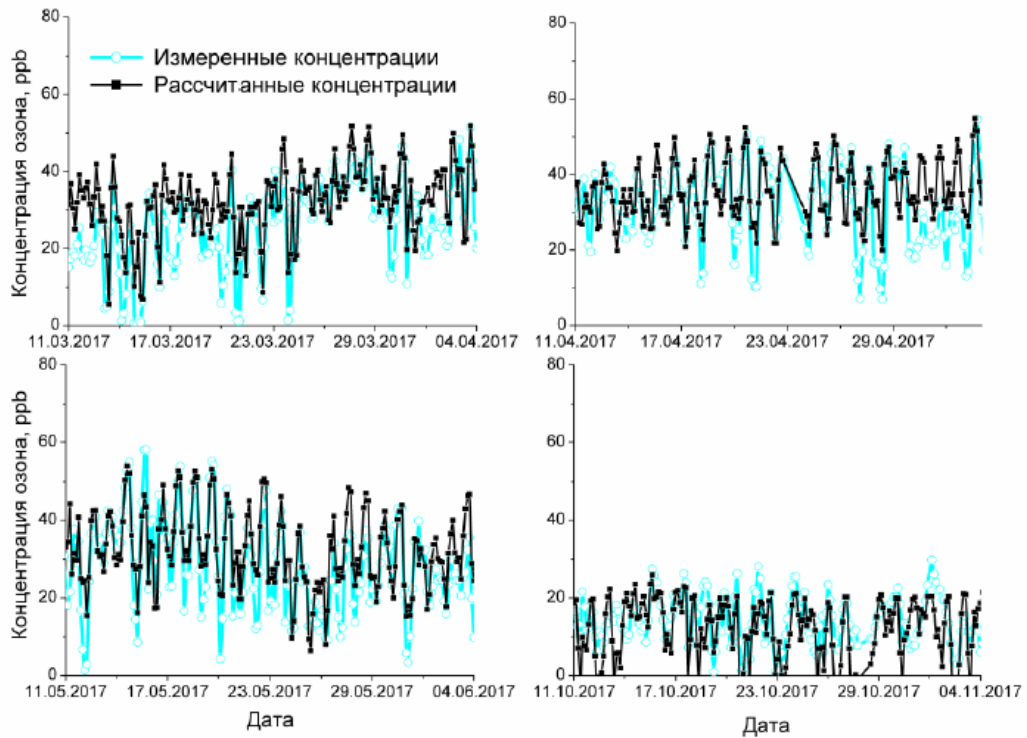


Рисунок 5.15 – Сравнение концентраций озона по данным мониторинга атмосферного воздуха на пункте наблюдения, расположенного по адресу г. Гомель, ул. Барыкина, 319, с рассчитанными по уравнению регрессии

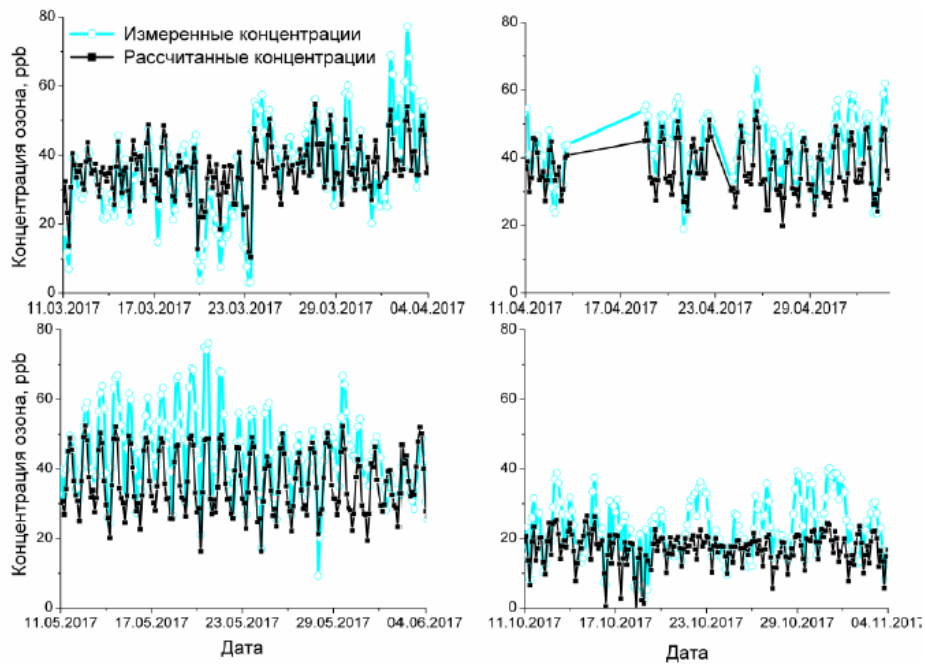


Рисунок 5.16 – Сравнение концентраций озона по данным мониторинга атмосферного воздуха на пункте наблюдения, расположенного по адресу г. Гродно, ул. Обухова, 15, с рассчитанными по уравнению регрессии

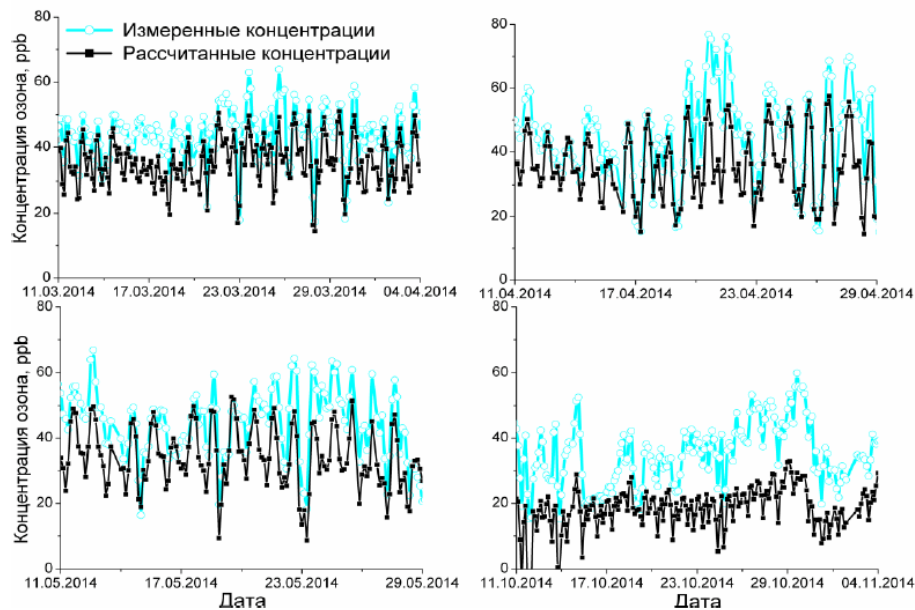


Рисунок 5.17 – Сравнение концентраций озона по данным мониторинга атмосферного воздуха на пункте наблюдения, расположенного по адресу г. Витебск, ул. Чкалова, 14, с рассчитанными по уравнению регрессии

В основном согласие вполне удовлетворительное, хотя присутствуют случаи, когда рассчитанные концентрации озона существенно отличаются от измеренных. Модель показала удовлетворительное (но не абсолютное) соответствие с результатами экспериментальных наблюдений. Одной из причин неполного соответствия является ограниченное число учитываемых прекурсоров озона антропогенного и естественного происхождения.

Система мониторинга атмосферного воздуха развивается, и в последние годы в перечень наблюдаемых параметров включены диоксиды серы и углерода, а также твердые частицы. Это позволяет учесть названные вещества в регрессионной модели зависимости концентрации приземного озона от антропогенных загрязнений воздуха и, таким образом, существенно повысить ее качество. Решение названной задачи будет способствовать развитию понимания климатологии приземного озона и разработке методов прогнозирования его опасных концентраций.

Прогноз

Полученные результаты позволяют сделать прогноз поведения приземного озона на территории Республики Беларусь в ближайшем будущем. В сельской местности, удаленной от источников антропогенных загрязнений, концентрация приземного озона на протяжении ряда лет стабильна: годовой ход концентрации воспроизводится из года в год и подвержен только влиянию медленно меняющегося климата.

Антропогенное загрязнение городов в настоящее время не достигло опасных уровней, приводящих к интенсивной генерации приземного озона. В теперешней ситуации загрязнение воздуха городов антропогенными выбросами приводит только к снижению концентрации приземного озона по сравнению с сельской местностью. Такие вещества, как диоксид серы и твердые частицы действуют в том же направлении – понижают концентрацию приземного озона.