

ОЗОН В ЧИСТОЙ АТМОСФЕРЕ

OZONE IN THE CLEAN ATMOSPHERE

В. В. Божкова, А. М. Людчик, Л. М. Болотько
V. Bozhkova, A. Liudchik, L. Bolotsko

*Белорусский государственный университет,
Национальный научно-исследовательский центр мониторинга озоносферы,
г. Минск, Республика Беларусь
hamster3991@mail.ru
Belarusian State University, National Ozone Monitoring Research Centre,
Minsk, Republic of Belarus*

Проанализировано поведение озона в загрязненном воздухе городов и чистом воздухе Березинского заповедника. Выявлены факторы, влияющие на концентрацию приземного озона. Определена климатическая норма приземного озона в «чистой» атмосфере на территории Беларуси на основании измерений концентрации озона и антропогенных загрязнителей воздуха в областных центрах.

The behavior of ozone in polluted urban air and clean air of the Berezinsky Reserve has been analyzed. Factors affecting the concentration of ground-level ozone were identified. The climatic normal of ground-level ozone in the «clean» atmosphere on the territory of Belarus was determined on the basis of measurements of concentrations of ozone and anthropogenic air pollutants in regional centers.

Ключевые слова: приземный озон, антропогенное загрязнение, метеоусловия, климатическая норма.

Keywords: ground-level ozone, anthropogenic pollution, meteorological conditions, climatic norm.

Озон в нижних слоях атмосферы отрицательно влияет на здоровье человека и животных, оказывает угнетающее действие на леса и сельскохозяйственные культуры в отличие от стратосферного озона, который защищает живые организмы от разрушающего действия солнечной радиации. Высокие концентрации приземного озона присутствуют как в атмосфере крупных городов, так и в сельских областях. Причём, в пригородах концентрация озона может быть выше, чем в самом городе.

Количество озона определяется балансом между его разрушением, фотохимическим образованием, горизонтальным переносом и термической конвекцией, приводящей к обмену воздухом с более высокими слоями атмосферы. Интенсивная горизонтальная адвекция и повышенные концентрации антропогенных загрязняющих веществ в городе тормозят фотохимическое производство озона, и его концентрация в значительной степени определяется реакцией с оксидом азота и сухим осаждением на поверхность. В более чистых районах доминирует процесс фотохимического образования озона из-за относительно низкого содержания загрязняющих веществ (оксидов азота, летучих органических соединений) в атмосфере [1].

В настоящее время автоматические пункты контроля качества воздуха национального Гидрометеоцентра действуют во всех областных городах Беларуси, а также в Березинском биосферном заповеднике. Круглосуточные наблюдения ведутся за аэрозольными частицами, диоксидом серы SO_2 , оксидом углерода CO , оксидом NO и диоксидом азота NO_2 , озоном O_3 и концентрациями таких летучих органических соединений (ЛОС), как бензол, толуол и ксилол. В работе были использованы данные наблюдений, содержащие сведения об O_3 , CO , NO , NO_2 и названных ЛОС, за 2014 г. для Минска (пункты наблюдений 1, 4, 11, 13) и Витебска, за 2014–2016, 2018 г. – для Березинского заповедника, за 2016 – 2018 г. – для Бреста, Гомеля, Гродно и Могилева.

Березинский заповедник находится вдали от городов и, соответственно, вдали от источников антропогенных загрязняющих веществ. Здесь регистрируются самые низкие значения концентраций антропогенных загрязнений. Поэтому заповедник является местом с наиболее чистой атмосферой. Все остальные пункты наблюдений находятся в типичной городской атмосфере. И, хотя они расположены в местах, различающихся насыщенностью источников загрязнений, уровень загрязнений в городах обычно превышает уровни, регистрируемые в заповеднике.

На основании имеющихся экспериментальных данных был получен усредненный за год суточный ход концентраций загрязняющих веществ отдельно для Березинского заповедника и для городов в качестве наглядного примера «чистой» и загрязнённой атмосферы, соответственно (рис. 1). Суточный ход в городе рассчитывался путём усреднения концентрации загрязняющих веществ по всем областным городам Беларуси.

Прекурсоры озона (CO , NO_2 , NO , ЛОС) в городах имеет выраженную суточную динамику (рис. 1а). Их повышенные концентрации регистрируются утром и вечером, в то время как днем и ночью вероятность их появления заметно снижается. Следует также отметить сильную корреляцию между данными веществами. Такое поведение антропогенных загрязняющих веществ объясняется суточной активностью их источников и меняющимися метеоусловиями: скоростью ветра и вертикальной устойчивостью атмосферы [2].

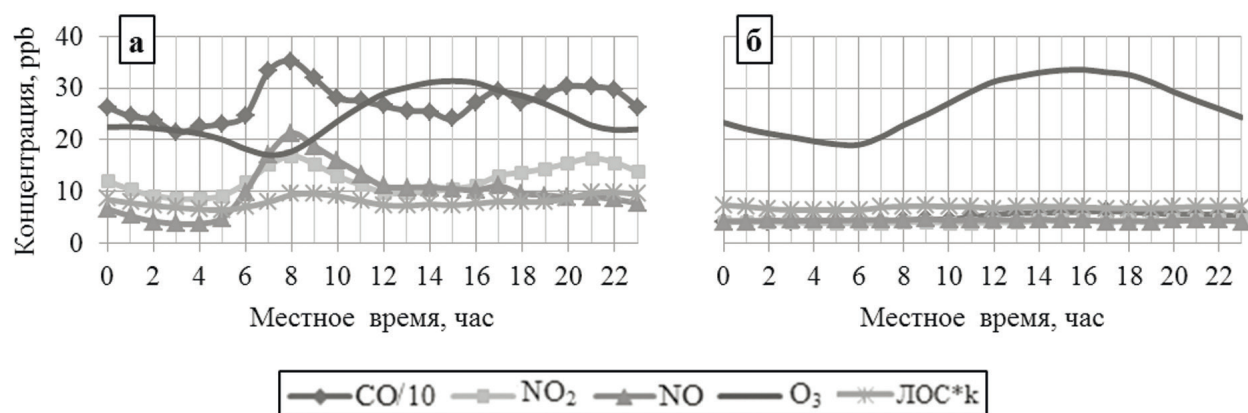


Рисунок 1 – Суточный ход концентрации загрязняющих веществ (а) в загрязнённой атмосфере ($k = 10$), (б) в «чистой» атмосфере ($k = 100$).

Загрязненный воздух городов способствует более быстрому разрушению озона, что подтверждается антикорреляцией озона с прекурсорами как в годовом, так и в суточном ходе концентраций. Максимальные концентрации озона наблюдаются днем, когда интенсификация процессов вертикального перемешивания снижает концентрации антропогенных загрязнений в приземном воздухе и способствует притоку озона из более высоких слоев тропосферы.

Концентрации антропогенных загрязняющих веществ в заповеднике значительно ниже, чем в городах (рис. 1б), и в основном определяются переносом ветром загрязнённого воздуха. Поэтому практически отсутствует их суточный ход, несмотря на такой же, как в городах, суточный ход устойчивости атмосферы и скорости ветра [2]. Вертикальное перемешивание не приводит к изменениям ввиду однородности состава тропосферы по высоте в хорошо перемешанном воздухе, и точно так же ветер приносит воздух с теми же концентрациями загрязнений.

Концентрация озона в заповеднике так же, как и в городе, увеличивается днем и снижается к ночи, достигая минимума утром (рис. 1б). Суточный ход концентрации озона здесь не подвержен влиянию динамики его прекурсоров (из-за отсутствия какого-либо заметного хода концентрации этих веществ). Оксиды азота и ЛОС не оказывают разрушающего влияния на озон в связи с их низким содержанием в атмосфере. Это подтверждается фактом отсутствия второго локального минимума озона в отличие от города, где пик повышения концентрации загрязнений вечером вызывает разрушение озона и, соответственно, снижение его концентрации. Таким образом, в «чистой» атмосфере изменения концентрации озона вызваны метеоусловиями, суточный ход которых не имеет вечернего минимума [2], как и озон. Стоит также отметить несколько повышенный общий уровень озона в заповеднике по сравнению с городом. Это связано с отсутствием разрушающего действия высоких концентраций оксидов азота, углерода и ЛОС. Повышение концентрации приземного озона может происходить за счет его фотохимического образования. Для такого процесса в атмосфере должны присутствовать достаточные концентрации оксидов азота (более $0,1 \text{ мкг/м}^3$) и ЛОС [3], что и наблюдается в заповеднике – концентрации загрязняющих веществ здесь низкие, но не нулевые.

Для количественной оценки влияния различных факторов на приземный озон в [4] была предложена методика статистической обработки результатов наблюдений с целью определения коэффициентов уравнения регрессии, аппроксимирующего зависимость концентрации озона от метеоусловий и антропогенных загрязнений воздуха. Если исключить влияние различающихся метеоусловий и загрязнения воздуха, концентрации озона, измеренные в разных регионах Беларуси, должны быть близкими друг другу. Скорректированные на случай одинаковых метеоусловий (климатических норм метеопараметров, усредненных по территории Республики) значения измеренных концентраций озона для «чистой» атмосферы (свободной от влияющих на озон антропогенных загрязнений) 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 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.

Следует сделать замечание по поводу определения «чистой» атмосферы. В качестве средних метеорологических условий предлагается использовать значения метеопараметров, отвечающих минским климатическим нормам. Понятие «чистой» атмосферы не подразумевает полное отсутствие прекурсоров озона. Генерация приземного озона, инициированная солнечным излучением, происходит только при наличии оксидов азота. И они всегда присутствуют даже в удаленных от промышленных центров районах. Оксиды азота могут иметь естественное происхождение и могут приноситься с воздушными массами из загрязненных районов. В связи с этим понятие «чистой» атмосферы подразумевает нулевые концентрации угарного газа и летучих органических соединений, а концентрации NO и NO₂ равными среднегодовым значениям для Березинского заповедника – 2,2 и 1,85 ppb соответственно.

Для определения климатической нормы приземного озона в чистой атмосфере использованы все доступные измерения концентрации озона и антропогенных загрязнений на пунктах Гидрометеоцентра контроля качества воздуха во всех областных центрах Беларуси и климатические нормы метеопараметров для г. Минска (рис. 2). На рисунке кривые, относящиеся к «грязной норме» получены посредством обработки измеренных концентраций озона, кривые «чистой нормы» – посредством обработки измерений, из которых исключены вклады, обусловленные отклонением реальных метеоусловий от нормальных минских, и вклады за счет антропогенных загрязнений.

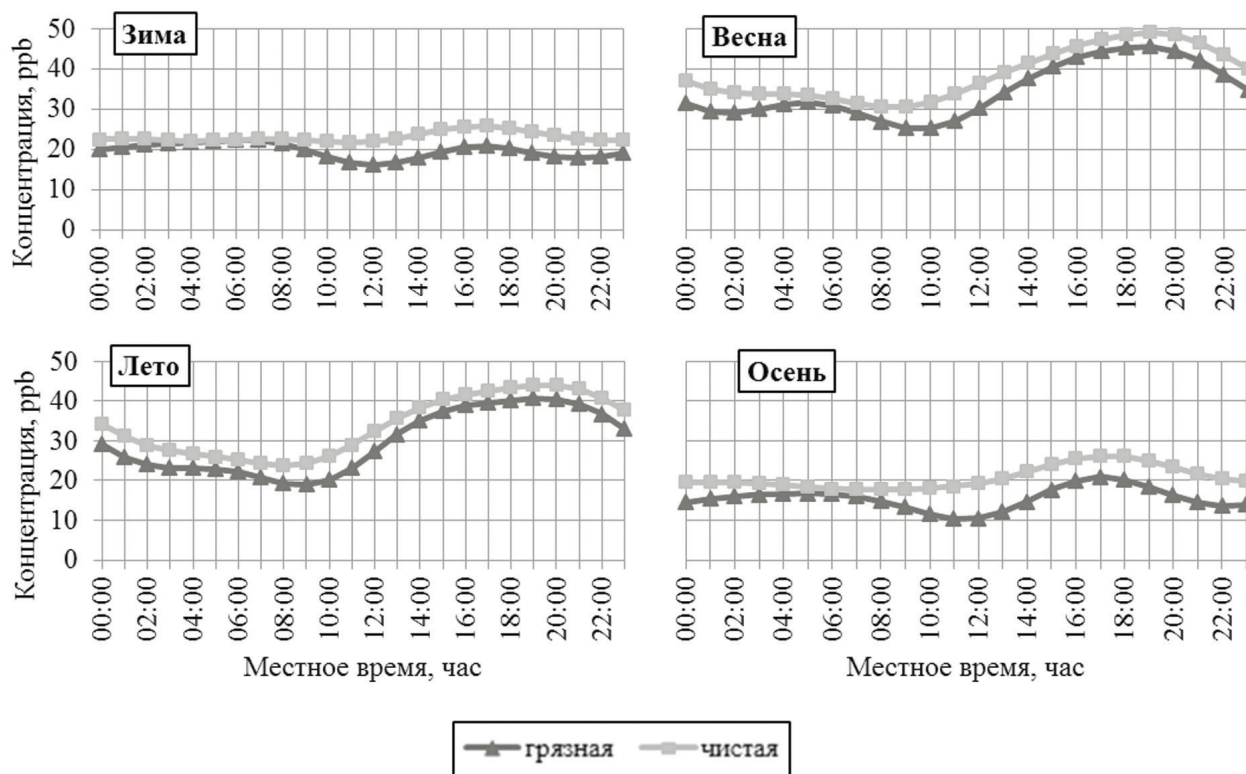


Рисунок 2 – Сравнение нормы приземного озона, определенной по экспериментальным данным из всех областных центров («грязной» нормы), с «чистой» нормой, определенной для условий чистой атмосферы и стандартных (нормальных минских) метеоусловий

Как следует из рис. 2, «чистая норма» приближается к «грязной» в ночное время суток. Это особенно характерно для осенне-зимнего периода. Уменьшается также глубина утреннего и вечернего провалов в суточном ходе концентрации озона, вызванных увеличением степени загрязнения городского воздуха в это время. Это, очевидно, вполне естественно для случая чистой атмосферы и подтверждает качественно верный характер полученного решения.

«Чистая норма» приземного озона получена в результате достаточно сложной обработки большого объема данных наблюдений в загрязненной атмосфере областных городов Беларуси. Причина заключается в отсутствии рядов длительных наблюдений за приземным озоном в местах, которые можно было бы отнести к «условно чистым». В настоящее время мы располагаем только весьма коротким рядом наблюдений в Березинском заповеднике. Тем не менее, представляет интерес сравнить результаты определения «чистой нормы» озона, полученной из «грязных» данных, с имеющимися весьма ограниченными наблюдениями в Заповеднике (рис. 3). Данные о среднем суточном ходе концентрации озона в различные сезоны для Заповедника определены на основании усреднения измерений за 8 зимних и весенних месяцев, 6 летних и 3 осенних.

Прекрасное совпадение березинских наблюдений с «чистой зимней нормой» свидетельствует о корректности использованного подхода. Неплохое соответствие наблюдается также и в весенний сезон.

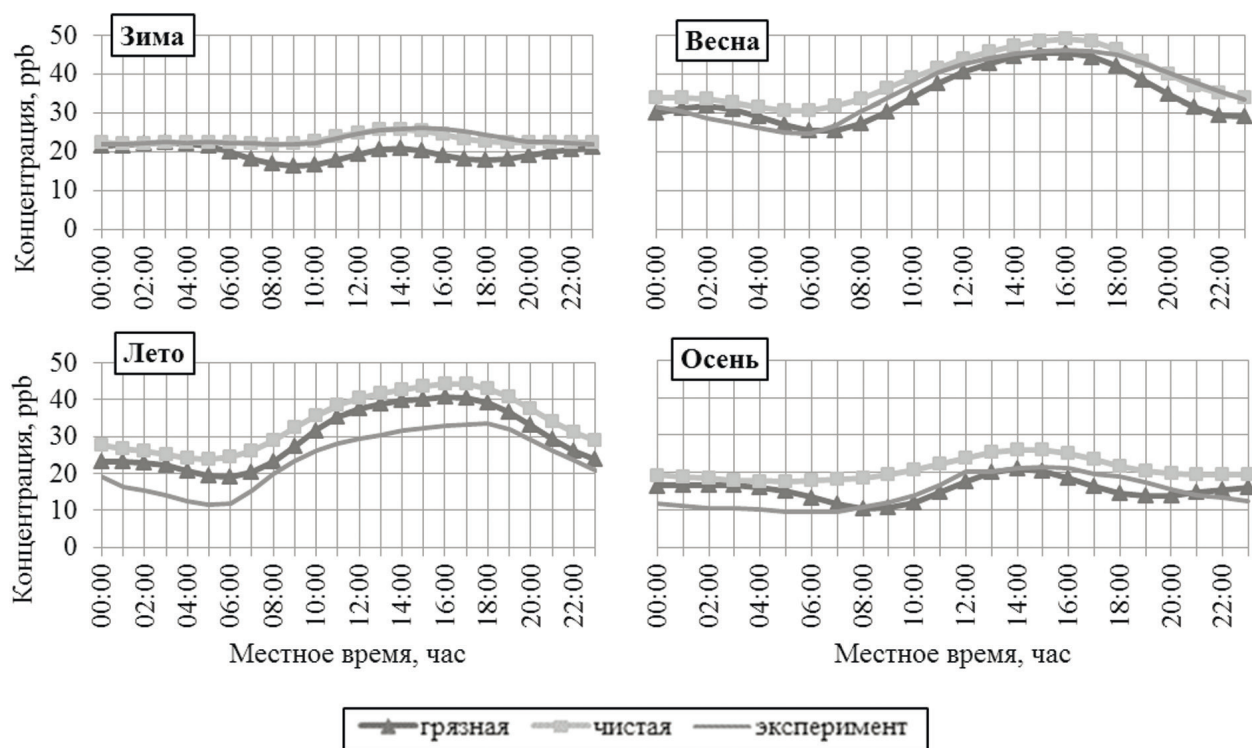


Рисунок 3 – Сравнение суточного хода концентрации озона в Березинском заповеднике с «чистой» и «грязной» климатическими нормами озона в разные сезоны

Однако явное несоответствие как «чистой», так и «грязной» нормам летом и осенью требует дальнейшего анализа. Возможными причинами являются следующие:

1. Малое суммарное число наблюдений в Березинском заповеднике в летний и осенний сезоны.
2. Некорректная работа измерителей концентрации озона в некоторые периоды.
3. Атмосфера заповедника не соответствует принятому определению «чистой», особенно в летний и осенний периоды.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Nicholson, J. P.* Modelling horizontal and vertical concentration profiles of ozone and oxides of nitrogen within high-latitude urban areas / J.P. Nicholson, K.J. Weston, D. Fowler // *Atmos. Environ.* – 2001. – No. 35. – P. 2009–2022.
2. *Божкова, В. В.* Суточный ход концентрации антропогенных загрязнений воздуха в городах Беларуси. / В.В. Божкова и др. // *Природные ресурсы.* – 2018. – № 2. – С. 79–86.
3. *Seinfeld, J. H.* Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change / J. H. Seinfeld, S. N. Pandis // New York, John Wiley & Sons, Inc. – 2006. – 1225 p.
4. *Людчик, А. М.* Статистическая оценка антропогенного воздействия на приземный озон / А. М. Людчик и др. // *Природные ресурсы.* – 2015. – № 1. – С. 95–105.