

ВОПРОСЫ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ТРОПОСФЕРНОГО ВОЗДУХА В МЕГАПОЛИСЕ

Систер В.Г.¹, Цедилин А.Н.¹, Василенко А.П.¹

¹ФГБОУ ВО «Московский политехнический университет», Москва, e-mail: rector@mospolytech.ru

В статье представлены результаты мониторинга суммарных (природных и техногенных) концентраций тропосферного озона в условиях развития техносферы мегаполиса. Новизна работы - выявление возможности использования трансформируемого тропосферного озона (природного и техногенного) в качестве индикаторного газа для мониторинга экологической безопасности приземного воздуха путем проведения дополнительных исследований, в т.ч. и на свехурбанизированных территориях мегаполиса. Задача исследований – подтверждение ранее полученных закономерностей по сезонным и суточным изменениям концентраций и получение новых статистических данных на территории региона для последующей обработки и анализа. Были выявлены факторы, влияющие на изменения концентраций озона. Установлено, что концентрации суточных значений О₃, вследствие одновременно протекающих реакций образования и разложения, представляют собой сложный колебательный процесс с неопределенной частотой и амплитудой, в дневное и ночное время суток они сопоставимы (близки по значениям) и зависят от общей загрязненности воздуха. Математическое моделирование вследствие многофакторности процесса затруднительно и предпочтительно статистическое прогнозирование. Данные за период 2016-2017 гг. подтвердили ранее выявленные зависимости по сезонным и суточным изменениям и были использованы для статистического прогнозирования экологической безопасности тропосферного воздуха. Определено устойчивое превалирование реакции разложения озона (до полного разложения) над реакциями его образования при отсутствии движения воздушного потока для свехурбанизированных объектов мегаполиса (автотранспортные тоннели).

Ключевые слова: экологическая безопасность, среда обитания, озон, реакции образования и разложения, концентрация, зависимость, функция распределения.

QUESTIONS OF ENVIRONMENTAL SAFETY OF TROPOSPHERIC AIR IN MEGAPOLIS

Sister V.G.¹, Tsedilin A.N.¹, Vasilenko A.P.¹

¹"Moscow Polytechnic University", Moscow, e-mail: rector@mospolytech.ru

The article presents the results of the monitoring of the total (natural and anthropogenic) concentrations of tropospheric ozone in the conditions of development of the technosphere of the metropolis. The novelty of this work is to identify the possibility of using a transformable tropospheric ozone (natural and anthropogenic) as a tracer gas to monitor the environmental safety of surface air by conducting additional studies, including and beyond the urban areas of the metropolis. The objective of the research is the confirmation of previously obtained patterns of seasonal and diurnal changes in the concentrations and obtaining new statistical data in the region, for further processing and analysis. Identified the factors influencing changes in ozone concentrations. It is established that the concentration of daily values of O₃, due to simultaneously proceeding reactions of formation and decomposition, is a complex oscillatory process with uncertain frequency and amplitude in day and night, they are comparable (close values) and depend on the total air pollution. Mathematical modeling of the result of multifactorial process difficult and preferably statistical forecasting. Data for the period 2016-2017 confirmed previously identified based on seasonal and diurnal changes and were used for the statistical prediction of environmental safety of tropospheric air. Determined the prevalence of resistant reactions of ozone decomposition (up to the complete decomposition) on the reactions of its formation in the absence of airflow for svexhusheshnyh objects of a metropolis (transportation tunnels).

Keywords: ecological safety, environment, ozone, reactions of formation and decomposition, concentration, dependency, distribution function.

В связи с началом реновации жилищного фонда г. Москвы [1], как социально значимого технико-экологического «вытягивающего» проекта развития техносферы мегаполиса на ближайшие десятилетия, становятся актуальными вопросы внедрения

природоподобных («зеленых») технологий в строительство и ЖКХ [2], базирующихся на постоянном мониторинге качества среды обитания человека.

По данным Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ), среда обитания человека является основным объективным фактором, влияющим на продолжительность жизни и активное долголетие человека. Основа ее экологической безопасности - состояние тропосферного (приземного) воздуха в мегаполисах.

Новизной данной работы является выявление возможности использования тропосферного озона (природного и техногенного) в качестве индикаторного газа для мониторинга экологической безопасности приземного воздуха в мегаполисах.

Задача исследований – оценка ранее полученных закономерностей изменений концентрации тропосферного озона и сбор статистических данных за 2016-2017 гг. на территории региона для последующей обработки и анализа.

В настоящее время на экологическую безопасность атмосферного воздуха существенное влияние оказывает озон (O_3). ВОЗ включила озон в список основных загрязнителей, содержание которых необходимо контролировать при определении качества воздуха. Озон в РФ относится к веществам первого класса опасности: ПДК_{м.р.} = 160 мкг/м³, ПДК_{с.с.} = 30 мкг/м³. Озон - составная часть атмосферы Земли. В стратосфере озон обладает планетарными защитными функциями. В «доиндустриальный» период в тропосфере его природная концентрация предположительно составляла 10-20 мкг/м³ [3]. В условиях антропогенного загрязнения воздуха мегаполиса суммарная концентрация озона (природная и техногенная) может значительно превышать установленные предельно допустимые концентрации [4; 5]. Природа и значимость данного явления уже несколько лет исследуется научным сообществом (ИОФ РАН, ИФА РАН, МГУ им. М.В. Ломоносова и др.). Данная работа проводится в рамках научно-технического сотрудничества с кафедрой метеорологии и климатологии географического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова.

Анализ публикаций по данной тематике, основанных преимущественно на фотокаталитических реакциях образования (из т.н. предшественников) и разложения озона и точечных источников трехмерного развития загрязнения, не всегда объясняет характерные для московского региона концентрации [6]. Поэтому проведение мониторинга необходимо для выявления присущего для мегаполиса процесса тропосферного трансформирования ($2O_3 - 3O_2$), разработки и реализации на основе наибольших и наименьших значений тропосферного озона в течение суток организационно-технических мероприятий по обеспечению экологической безопасности населения мегаполиса.

С использованием научно-технических публикаций в данной области и на основе собственных исследований, проводимых авторами с 2010 г. [4; 7; 8], установлено, что:

- концентрации наибольших значений тропосферного озона (используемых для оценки экологической безопасности приземного воздуха), измеренные в течение суток, вследствие одновременно протекающих реакций образования и разложения, зависят от климатических сезонных условий и представляют собой сложный колебательный процесс с неопределенной частотой и амплитудой;

- наибольшие значения тропосферного озона в воздухе в дневное и ночное время суток сопоставимы, что позволяет предположить отсутствие доминирования фотокаталитических реакций образования озона над территориями мегаполиса;

- вероятность превышения ПДК_{с.с.} (30 мкг/м³) концентрацией озона в тропосферном воздухе мегаполиса зависит от степени урбанизации исследуемых территорий (превалирования искусственной среды обитания человека над природной);

- математическое моделирование вследствие многофакторности процесса (одновременно протекающие реакции разложения и образования О₃, трехмерный механизм трансформации и др.) затруднительно, и на данном этапе изучения предпочтительны статистическая обработка результатов и прогнозирование.

Экспериментальные исследования проводились с использованием мобильного газоанализатора 3.02П-А. Газоанализатор озона 3.02П-А прошел экспертизу в уполномоченной организации при Агентстве по охране окружающей среды США (EPA) и одобрен EPA в качестве средства измерения озона для задач атмосферного мониторинга. Предел допускаемой вариации показаний не более 0,5 доли от предела допускаемой основной погрешности.

В основу работы анализатора положен эффект гетерогенной хемилюминесценции, возникающей в результате экзотермической реакции озона с окисляемыми химическими веществами композиции (ХЛ-сенсора). Сущность этого метода состоит в том, что химическое взаимодействие молекул озона с химической композицией датчика сопровождается хемилюминесценцией. Интенсивность хемилюминесценции пропорциональна содержанию озона в анализируемой газовой смеси. Максимум интенсивности возникающего излучения находится в области 560 нм. Поступление анализируемой пробы газа в хемилюминесцентный реактор обеспечивается встроенным микронасосом.

Для дополнительной оценки использовались данные «Мосэкомониторинга», где в режиме реального времени представлены текущие данные с автоматических станций контроля загрязнения атмосферы (АСКЗА).

Результаты проведенных исследований подтверждают ранее полученные закономерности изменений концентрации тропосферного озона над территорией

Московского региона.

Так, концентрации наибольших значений тропосферного озона, измеренные в течение суток (как и средние месячные значения), зависят от климатических сезонных условий.

На рис. 1 и 2 показаны наибольшие дневные и ночные концентрации озона в течение суток для различных климатических сезонов (зима – весна) за 2016-2017 гг.

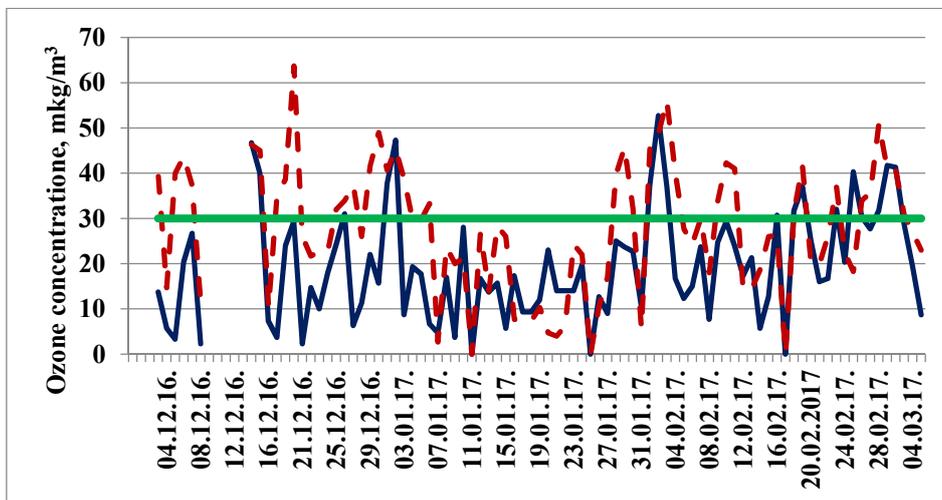


Рис. 1. Наибольшие и наименьшие дневные и ночные концентрации озона в районе Раменки (территория МГУ) за зимний период 2016-2017 гг.: — дневные концентрации озона; - - - ночные концентрации озона; — ПДК с.с. (30 мкг/м³)

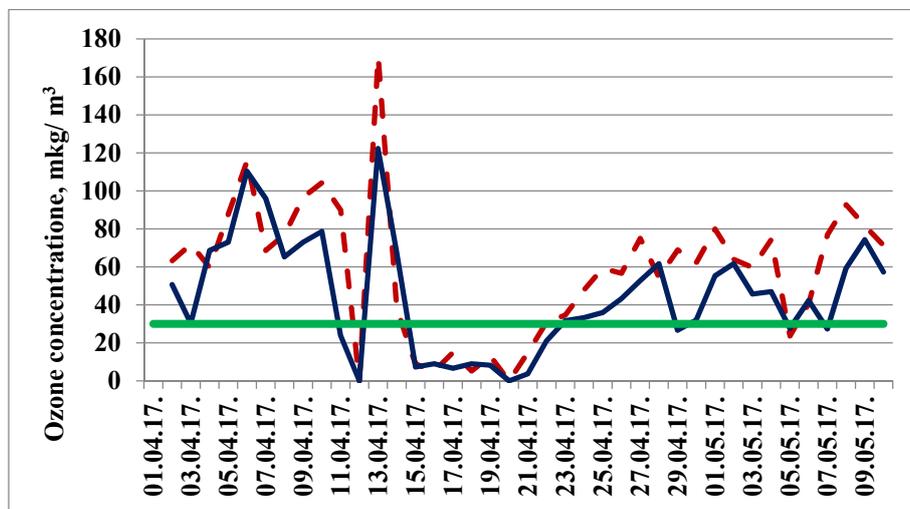


Рис. 2. Наибольшие дневные и ночные концентрации озона в районе Раменки (территория МГУ) за весенний период 2016-2017 гг.: — дневные концентрации озона; - - - ночные концентрации озона; — ПДК с.с. (30 мкг/м³)

Концентрации наибольших значений тропосферного озона, измеренные в течение суток, представляют собой сложный колебательный процесс с неопределенной частотой и амплитудой, что затрудняет математическое моделирование процессов образования и разложения озона над территорией мегаполиса.

На рис. 3 представлены средние месячные сезонные значения приземных концентраций озона за 2016-2017 гг.

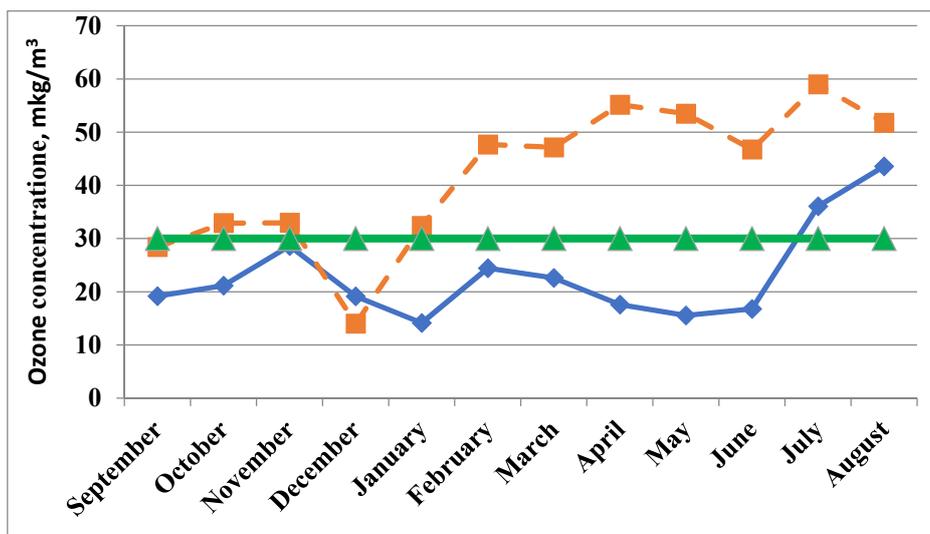


Рис. 3. Средний годовой ход приземной концентрации озона за 2016-2017 гг.:

-- Звенигород; - МГУ; - ПДК с.с. (30 мкг/м³)

Представленные на рис. 3 средние месячные сезонные значения приземных концентраций озона для г. Звенигорода (рекреационная зона, мало урбанизированная территория) и территории МГУ им. М.В. Ломоносова (окруженной многочисленными транспортными магистралями) показывают влияние на тропосферную концентрацию озона урбанизации исследуемых территорий.

По результатам мониторинга значений концентраций озона за сутки была проведена статистическая обработка данных по двум районам Московского региона: Северное Тушино (урбанизированная территория) и Звенигород (рекреационная зона, мало урбанизированная территория), и построены зависимости функции распределения от концентрации озона.

В качестве исследуемой случайной величины (СВ) X была выбрана наибольшая концентрация приземного озона, принимающая значения x_1, x_2, \dots, x_n . Методом сплошного обследования по результатам наблюдений в зимний период 2016-2017 гг. по каждому району были построены вариационные ряды и интервальные статистические ряды, на базе которых построены графики эмпирической функции распределения $F_n(x)$ выбранной случайной величины X .

$$\text{Функция распределения: } F_n(x) = \frac{n(x)}{n},$$

где $n(x)$ – число наблюдений, при которых СВ X приняла значения меньше x

$$(X < x);$$

n – общее число наблюдений.

Функция распределения используется для оценки вероятности превышения ПДК_{с.с.} (30 мкг/м³).

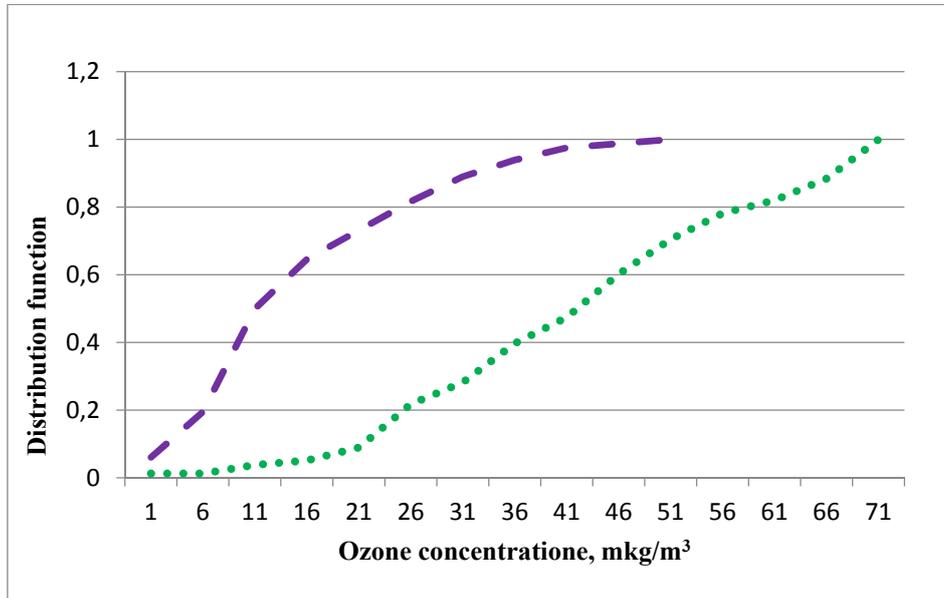


Рис. 4. Зависимость функции распределения от концентрации озона (зимний период 2016-2017 гг.): — СЗАО район Северное Тушино; ... Звенигород

Из представленных графиков (рис. 4) видно, что вероятность превышения ПДК_{с.с.} (30 мкг/м³) в воздухе мало урбанизированных территорий в 2,5–3,0 раза выше, чем для урбанизированных территорий, и функции распределения возможно использовать для прогнозирования экологической безопасности воздуха для территорий с различной урбанизацией.

Для подтверждения выявленной тенденции в рамках данных исследований были определены с использованием мобильных средств измерений концентрации О₃ для сверхурбанизированных территорий мегаполиса. В качестве подобных объектов были выбраны Гагаринский и Лефортовский тоннели автомобильного транспорта в г. Москве. Измерения концентраций озона проводили непосредственно в воздушной среде тоннелей, одновременно фиксировали концентрации О₃ на ближайших станциях АСКЗА (рис. 5).

Анализ концентраций О₃ в воздушной среде мегаполиса позволяет предположить, что урбанизация исследуемых территорий и, как следствие, повышение общей загрязненности воздуха сдвигает реакцию $2\text{O}_3 \rightarrow 3\text{O}_2$ в сторону разложения озона. Для сверхурбанизированных объектов (возможно, за счет аэрозолей различных типов) реакции разложения являются доминирующими и концентрация озона в воздухе не определяется.

Исследования концентраций озона в 2016-2017 гг. позволили авторам предложить использование О₃ в качестве индикатора экологической безопасности тропосферного

воздуха в мегаполисе (урбанизированная территория).

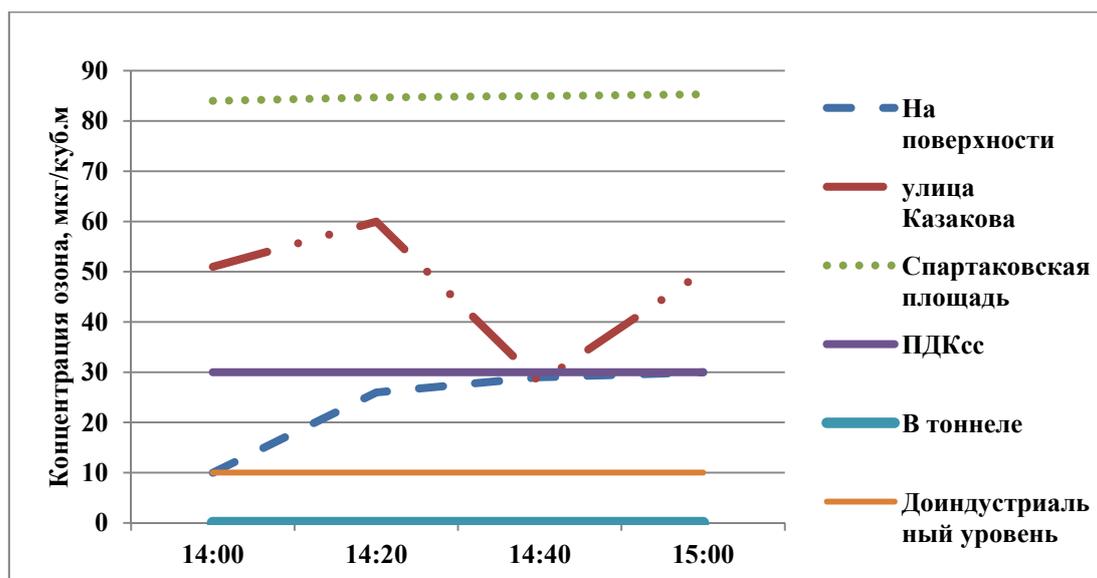


Рис. 5. Концентрации озона в Лэфортковском тоннеле, на поверхности, ближайших станциях АСКЗА (17.05.2017 г.): — на поверхности; — улица Казакова; ... Спартаковская площадь; — ПДК с.с. (30 мкг/м³); - в тоннеле; — доиндустриальный уровень (10 мкг/м³)

При значениях концентраций О₃ ниже «доиндустриальных» (10 мкг/м³) можно предположить вредные условия среды обитания человека за счет общей загрязненности воздушной среды мегаполиса, по аналогии с воздухом сверхурбанизированных объектов.

При превышении «доиндустриальных» концентраций О₃ до ПДКс.с. можно предположить благоприятные (рекреационные) условия среды обитания человека.

При значениях концентраций О₃ выше ПДКс.с. до 70-100 мкг/м³ можно предположить безопасные (не оказывающие влияние на состояние здоровья) условия среды обитания человека.

Для подтверждения возможности использования О₃ в качестве индикатора планируется биологическое тестирование воздуха для территорий и объектов с различной урбанизацией.

Представленные экспериментальные данные мониторинга показателей атмосферного воздуха в 2016-2017 гг. подтверждают, что концентрации тропосферного озона зависят от сезонных и суточных изменений и представляют собой сложный колебательный процесс с неопределенной амплитудой и частотой, связанный с одновременным протеканием физико-химических реакций образования и разложения озона. Для их обработки и выявления значимых факторов возможно использование статистических методов.

Также прослеживается взаимосвязь концентрации озона и географического расположения района исследований О₃, степени его урбанизации.

Рассмотрена возможность использования О₃ в качестве индикатора при мониторинге экологической безопасности территорий мегаполиса.

Работа выполнена при поддержке гранта РГНФ № 16-06-00363.

Список литературы

1. О дополнительных гарантиях жилищных и имущественных прав физических и юридических лиц при осуществлении реновации жилищного фонда в городе Москве: Закон города Москвы от 17 мая 2017 года № 14. - М., 2013. – 193 с.
2. Систер В.Г. Внедрение «зеленых» технологий в Российской Федерации / В.Г. Систер, Е.М. Иванникова, А.Н. Цедилин // Альтернативная энергетика и экология. – 2016. - № 11-12 (199-200). - С. 88-92.
3. Александров Э.Л. Озоновый щит Земли и его изменения / Э.Л. Александров и др. - СПб.: Гидрометеиздат, 1992. – 288 с.
4. Систер В.Г. Исследование концентрации озона в приземном атмосферном воздухе в условиях мегаполиса / В.Г.Систер и др. // Чистый город. – 2011. - № 1. – С. 35-40.
5. Башлакова О.И. Экологическая безопасность как основа устойчивого развития современной России // Среднерусский вестник общественных наук. – 2015. - № 2 (№ 38). – С. 16-22.
6. Ларин И.К. Химическая физика озонового слоя. - М.: Изд-во ГЕОС, 2013. – 159 с.
7. Методы оценки концентраций тропосферного озона / Воробьева А.В. // Материалы VIII Московского международного конгресса «Биотехнология: состояние и перспективы развития» (20-24 марта 2015). - С. 117-122.
8. Скибицкая К.А. Исследование влияния природных и техногенных факторов окружающей среды на концентрацию приземного озона в атмосферном воздухе Московского региона / К.А Скибицкая и др. // Биотехнологии в комплексном развитии регионов: сб. мат. междунар. науч.-практ. конф. – 2016. - С. 34.