

РАДИАЦИЯ И БИОСФЕРА

УДК 504.3.054+0.64.2.001.18

## Пространственно-временная изменчивость содержания приземного озона в Санкт-Петербурге, Кировской области и Крыму в 2011–2012 гг.

С.Н. Котельников<sup>1</sup>, Е.В. Степанов<sup>1</sup>, В.П. Челибанов<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup> *Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН  
119991, г. Москва, ул. Вавилова, 38*

<sup>2</sup> *Приборостроительное предприятие «ОПТЭК»  
199178, г. Санкт-Петербург, Малый проспект В.О., 58*

Поступила в редакцию 15.03.2016 г.

Представлены временные вариации концентраций озона в приземном слое атмосферы Санкт-Петербурга, мало урбанизированного района на юге Кировской области (г. Вятские Поляны) и Карадагского природного заповедника в Крыму. Проведен сравнительный анализ динамики концентраций приземного озона в этих районах, и продемонстрированы основные закономерности сезонных и суточных вариаций. Показана широтная зависимость концентраций приземного озона.

*Ключевые слова:* приземный озон, пограничный слой атмосферы, широтная зависимость; ground-level ozone, the boundary air layer, latitudinal dependence.

### Введение

Последние десятилетия отмечены все более пристальным вниманием исследователей всего мира к тропосферному озону. Это обусловлено тем, что озон, являясь малой газовой составляющей атмосферы, играет ключевую роль в фотохимии тропосферы, а его содержанием определяется баланс многих атмосферных газов [1]. Увеличение активности исследований в данной области в последние годы связано также с осознанием той степени опасности для здоровья населения и окружающей природной среды, которую могут представлять повышенные концентрации приземного озона. Например, было установлено, что в странах Европейского Союза с повышением содержания озона в приземной атмосфере можно прямо или косвенно связать гибель более 20 тыс. человек ежегодно [2]. Наиболее обширные исследования, посвященные проблеме тропосферного озона, проводятся в США, Канаде, странах Европейского Союза, Японии и Китае. Учитывая исключительно токсические свойства повышенных концентраций озона, в США широко масштабные исследования по влиянию озона на живые системы начались в 50-е гг. прошлого века [3]. Результаты долговременных и непрерывных измерений приземных концентраций озона (ПКО) на

сотнях станций мониторинга в этих странах, а также лабораторных и эпидемиологических исследований служат основанием для совершенствования экологической политики и ужесточения национальных стандартов по приземному озону. В то же время имеющиеся в настоящее время данные о пространственно-временной изменчивости тропосферного озона на территории России очень ограничены. Накопление и анализ таких данных является чрезвычайно важным и актуальным [4].

Учитывая особую важность указанной проблемы для нашей страны, Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН совместно с приборостроительным предприятием «ОПТЭК» в начале 2010 г. создали действующую сеть автоматических станций мониторинга атмосферного воздуха для научных исследований, апробации современных сетевых технологий и аналитического оборудования в условиях России [5]. Станции были размещены в городах Санкт-Петербург и Вятские Поляны Кировской обл., а также на территории Карадагского природного заповедника в Крыму.

Целью настоящей работы является представление первых результатов долговременных исследований ПКО в мегаполисе (г. Санкт-Петербург), мало урбанизированном районе (г. Вятские Поляны) и курортном районе (Карадаг) в 2011 и 2012 гг., их предварительный анализ и демонстрация основных закономерностей пространственно-временных вариаций тропосферного озона на территории России. В исследовании использовались ряды данных ПКО, полученных в результате опытной эксплуатации указанной сети автоматических станций.

\* Сергей Николаевич Котельников (skotelnikov@mail.ru); Евгений Валерьевич Степанов (EugeneStepanov@yandex.ru); Владимир Петрович Челибанов (chelibanov@mail.ru)

## Материалы и методика

На указанных станциях мониторинга для измерения озона используются газоанализаторы моделей 3.02П-А, разработанные и выпускаемые серийно приборостроительным предприятием «ОПТЭК» (г. Санкт-Петербург). Для определения концентраций тропосферного озона в газоанализаторах применяется метод гетерогенной хемилюминесценции. На станции мониторинга ОРТЕС-М (Малый проспект Васильевского острова, г. Санкт-Петербург; 59°56'27" с.ш.; 30°15'15,2" в.д.) газоанализатор озона установлен на третьем этаже здания и забор анализируемого воздуха осуществляется через пробоотборный зонд ПЗ ВЗ «ПРОБА».

Станция мониторинга «Вятские Поляны» расположена в парковой зоне г. Вятские Поляны (56°13' с.ш., 51°4' в.д., высота над уровнем моря 74 м). Измерительный комплекс установлен на пятом этаже пятиэтажного дома, забор анализируемого воздуха осуществляется через фторопластовую трубку, выведенную наружу через окно. Город Вятские Поляны расположен на юге Кировской обл., население вместе с районом составляет около 50 тыс. человек. Предприятий с вредными газовыми выбросами на территории района нет. Региональный воздушный фон загрязняющих веществ формируется за счет местного автотранспорта и дальнего переноса. Ближайший мегаполис — г. Казань — находится на расстоянии 180 км.

На станции мониторинга «Карадаг» (45°2' с.ш., 35°23' в.д., высота над уровнем моря 180 м) использовался аналогичный газоанализатор в составе автоматической станции, отбор анализируемого воздуха проводился на высоте 2,5 м от уровня Земли.

Статистическая обработка временных рядов осуществлялась с помощью стандартного пакета STATISTICA.

## Результаты и обсуждение

На рис. 1 приведен суточный ход концентрации озона, рассчитанный по всему годовому массиву среднечасовых значений за 2011 и 2012 гг., а на рис. 2 сезонный ход с месячным усреднением также за 2011 и 2012 гг. на упомянутых выше станциях мониторинга.

На показатели суточного и сезонного хода ПКО влияет множество факторов, в том числе географическое расположение места измерений и время года. Результаты многочисленных экспериментальных исследований показали [6], что основная генерация озона происходит в пограничном слое атмосферы (ПСА), который располагается до высоты 1,2 км от поверхности Земли. Образование озона в этом слое происходит в результате фотохимических реакций с участием газов-предшественников. Для увеличения концентрации озона в атмосфере, его синтеза необходимо наличие достаточного количества его прекурсоров (предшественников), таких веществ, как оксиды азота, углеводороды, ряда других га-

зов. Важным является и наличие достаточного количества солнечной радиации, которая инициирует фотохимические процессы в атмосфере [6].

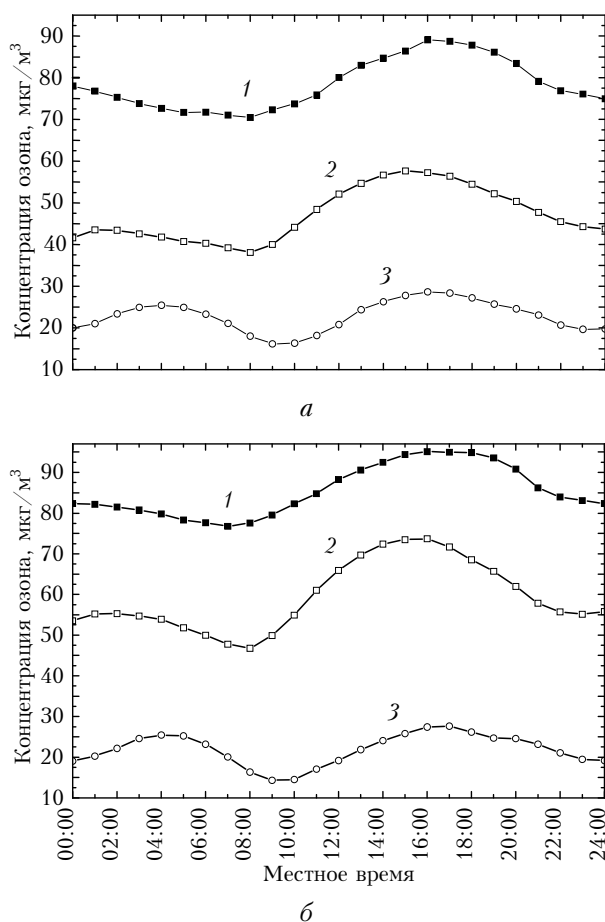


Рис. 1. Усредненный за год суточный ход ПКО на станциях «Карадаг» (1), «Вятские Поляны» (2), на Малом проспекте Васильевского острова (3) в 2011 (а) и 2012 г. (б)

Суточный ход ПКО на всех станциях, как видно на рис. 1, имеет ночной и дневной максимумы и минимум в утренние часы. Подобный суточный ход ПКО с наличием ночного и дневного максимумов наблюдается и в других регионах, в частности на станции мониторинга в районе Томска [6]. Появление ночного максимума ПКО не может быть объяснено в рамках лишь фотохимического механизма образования тропосферного озона. Предложенное в [6] объяснение этого явления заключается в том, что ночной максимум формируется озоном, поступающим из вышележащих слоев ПСА. Если воздушный слой с максимальной концентрацией озона, образовавшегося днем в результате фотохимических реакций, расположен не слишком высоко, то в течение ночи, когда снижается температура воздуха и почвы и ослаблена турбулентность, часть озона может спуститься к поверхности Земли [6].

Указанные выше особенности суточного хода ПКО хорошо видны на рис. 1, где показан усредненный за год суточный ход ПКО на станциях мониторинга на Карадаге, в Вятских Полянах

и Санкт-Петербурге в 2011–2012 гг. На всех указанных станциях отчетливо виден ночной максимум ПКО. Дневной максимум ПКО на станциях мониторинга отмечается в послеобеденное время в районе 15:00–18:00. Также на рис. 1 четко видна широтная зависимость абсолютных значений ПКО. Как видно, общий уровень ПКО возрастает от севера к югу, что можно объяснить увеличением интегральной интенсивности солнечной радиации на более низких широтах. Также отчетливо видна временная разница в начале утреннего роста ПКО. Например, в Санкт-Петербурге он обозначается в районе 10:00, а на станциях Вятские Поляны и Карадаг около 08:00, что потенциально может быть связано с процессами начала фотохимического образования озона.

На рис. 2 показан годовой ход усредненных за месяц ПКО на рассматриваемых станциях мониторинга в 2011 и 2012 гг. Амплитуда годового хода также хорошо отражает широтное различие в расположении станций. На юге России, в атмосфере Карадагского заповедника, наблюдаемые среднемесячные абсолютные ПКО значительно выше, чем в северном Санкт-Петербурге и в Вятских Полянах.

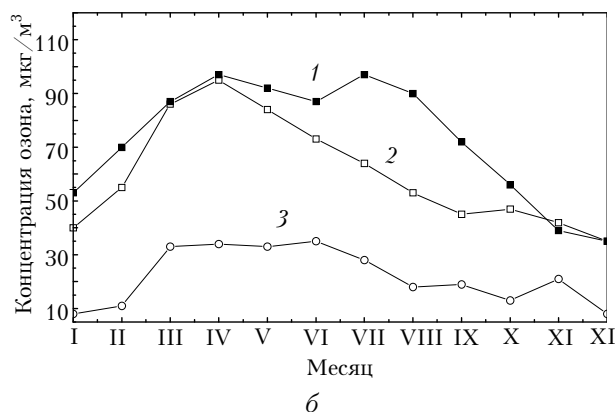
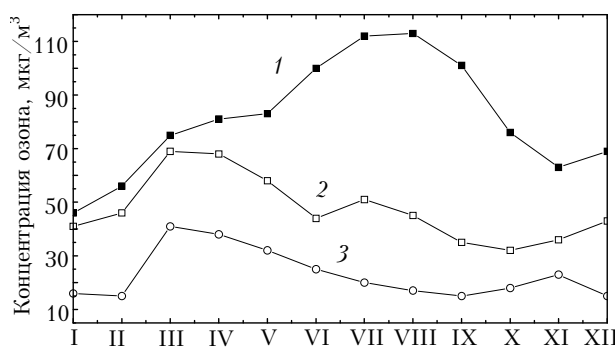


Рис. 2. Сезонный ход усредненных за месяц ПКО на станциях Карадаг (1), Вятские Поляны (2), Санкт-Петербург (3) в 2011 (а) и 2012 г. (б)

Как видно, в Вятских Полянах и на Карадаге весенний максимум в 2011 и 2012 гг. начал формироваться в январе, а в Санкт-Петербурге — только в феврале. В Вятских Полянах и на Карадаге проявился характерный и отчетливый летний макси-

мум ПКО в 2011 г., причем на юге его амплитуда значительно превосходит амплитуду весеннего максимума. В Санкт-Петербурге летний максимум ПКО в 2011 г. отсутствовал, но проявился отчетливый осенний максимум в ноябре. Он начал отчетливо формироваться уже в сентябре. В Вятских Полянах начало формирования осеннего максимума отмечается в октябре, а на Карадаге в ноябре. В 2012 г. на Карадаге наблюдается весенний и летний максимумы ПКО, а в Вятских Полянах и Санкт-Петербурге только весенний и осенний максимумы, причем в Санкт-Петербурге два осенних максимума — в сентябре и ноябре. Приведенный выше внутригодовой ход озона достаточно разнообразен. Подобная особенность внутригодовой изменчивости наблюдается и в районе г. Томска [6].

Еще одной причиной существования показанной нами выше широтной зависимости ПКО может оказаться также широтная зависимость содержания диоксида азота в воздухе. Это соединение, по-видимому, является одним из озonoобразующих веществ в фотохимических реакциях, происходящих в тропосфере. В работе [7] приводятся данные о том, что в северных городах, лежащих в пределах 60–70° с.ш., доля  $\text{NO}_2$  в общем содержании окислов азота  $\text{NO}_x$  всегда меньше, чем в других районах. При общем содержании  $\text{NO}_x$  в воздухе на уровне 191 мкг/м<sup>3</sup> концентрация  $\text{NO}_2$  в городах северных районов составляет всего 48 мкг/м<sup>3</sup>, а в городах, расположенных в пределах 41–50° с.ш., она достигает 87 мкг/м<sup>3</sup>. В этой же работе сообщается, что концентрации диоксида азота растут по мере уменьшения широты места от 23 мкг/м<sup>3</sup> на 70° с.ш., до 63 мкг/м<sup>3</sup> на 30° с.ш. При этом коэффициент корреляции между широтой места и концентрацией  $\text{NO}_2$  равен 0,789 [7].

## Заключение

Значительное превышение предельно допустимых концентраций (ПДК) озона было отмечено уже с начала измерений тропосферного озона в атмосфере Карадагского заповедника в начале 90-х гг. прошлого века [8]. Причем в атмосфере заповедника ПКО превышали ПКО в г. Киев. Сравнительный анализ по количеству превышений ПДК озона на станциях мониторинга Вятские Поляны, Санкт-Петербург и Карадаг в 2011–2012 гг. показал наибольшие превышения этого показателя на станции мониторинга Карадаг. В исследовании [7] приводятся расчеты, показывающие, что в южных городах России значительно больше вероятность превышения ПДК озона по сравнению с северными городами. В этом же исследовании прогнозируются ПКО в южных городах России порядка 300 мкг/м<sup>3</sup>. Такие концентрации озона могут представлять серьезную опасность для биосферы и здоровья населения. Результаты наших экспериментальных исследований, приведенных выше, подтверждают возможность данного предположения.

Высокие приземные концентрации озона наблюдаются не только в атмосфере городов, где вы-

сок уровень предшественников озона в воздухе, но и в мало урбанизированных районах (сельских и курортных районах), причем условия в этих районах могут быть более благоприятными для образования повышенных концентраций озона [8], особенно с подветренной стороны городов. Этот факт имеет особое социальное значение, так как за городом, как правило, расположены зоны рекреации.

Авторы благодарят инженерный коллектив станции мониторинга на Карадаге за высокопрофессиональную эксплуатацию предоставленного им аналитического оборудования.

1. *Crutzen P.J., Zimmermann P.H.* The changing photochemistry of the troposphere // *Tellus*. AB. 1991. V. 43, N 4. P. 136–151.
2. *Amann M., Derwent D., Forsberg B., Hänninen O., Hurley F., Krzyzanowski M., de Leeuw F., Liu S.J., Mandin C., Schneider J., Schwarze P., Simpson D.* Health risks of ozone from long-range transboundary air pollution WHO 2008 Regional Office for Europe. URL:

[http://www.euro.who.int/\\_\\_data/assets/pdf\\_file/0005/78647/E91843.pdf](http://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0005/78647/E91843.pdf)

3. *Chambers L.A., Griswold S.S., Motley H.L.* Report of a case of exposure to high ozone concentrations for two hours // *AMA Arch. Ind. Health*. 1957. N 15. P. 108–110.
4. *Проблемы мониторинга приземного озона и пути нейтрализации его вредного влияния* // Труды Второго Международного Совещания-семинара. М.: ФИАН, 2013. 118 с.
5. *Звягинцев А.М., Иванова Н.С., Крученицкий Г.М., Челибанов В.П., Котельников С.Н., Лапченко В.А.* Содержание озона над территорией Российской Федерации в 2012 г. // *Метеорол. и гидрол.* 2013. № 2. С. 121–127.
6. *Белан Б.Д.* Озон в тропосфере. Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2010. 478 с.
7. *Безуглая Э.Ю., Смирнова И.В.* Воздух городов и его изменения. Спб.: Астерион, 2008. 253 с.
8. *Котельников С.Н., Миляев В.А., Степанов Е.В.* Содержание озона в приземном слое атмосферы курортных районов и крупных городов // *Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем*. Т. XIX. Спб.: Гидрометеиздат, 2004. С. 64–71.

*S.N. Kotelnikov., E.V. Stepanov, V.P. Chelibanov.* **Spatial and temporal variability of ground-level ozone in St. Petersburg, the Kirov region, and Crimea in 2011–2012.**

Temporal variations of ozone concentrations in the troposphere of St. Petersburg (Russia), little urbanized area in the South of Kirov region (the town of Vyatskiye Polyany) and the Karadag nature reserve in Crimea are presented. A comparative analysis of the dynamics of surface ozone concentrations in these areas was conducted and the basic features of seasonal and diurnal variations was demonstrated. Latitudinal dependence of the concentrations of ground-level ozone are presented.