АКТУАЛЬНОСТЬ НАБЛЮДЕНИЙ И ПРОГНОЗА ПРИЗЕМНОГО ОЗОНА В РОССИИ

А.М. Звягинцев $^{1)*}$, И.Н. Кузнецова $^{2)}$, И.Ю. Шалыгина $^{2)}$, М.И. Нахаев $^{2)}$, Е.А. Лезина $^{3)}$, В.А. Лапченко $^{4)}$, М.П. Никифорова $^{3)}$, В.И. Демин $^{6)}$

 $^{1)}$ Центральная аэрологическая обсерватория, * Россия, 141700, г. Долгопрудный, Моск. область., ул. Первомайская, д. 3; * zvyagintsev45@yandex.ru 2) Гидрометеорологический научно-исследовательский центр РФ, Россия, 123242, г. Москва, Большой Предтеченский переулок, д.11-13 3) ГПУ Мосэкомониторинг, Россия, 119019, г. Москва, ул. Новый Арбат, д. 11, стр. 1 4) Карадагская научная станция им. Т.И. Вяземского – природный заповедник РАН, Россия, 298188, г. Феодосия, пгт. Курортное, ул. Науки, 24 5) Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского (филиал), Россия, 299038, г. Севастополь, ул. Астана Кесаева, д. 14 6) Полярный Геофизический Институт, Россия, 184209, г. Апатиты, Академгородок, д. 26а

Резюме. Дан краткий обзор наблюдений приземного озона и его прогнозирования на территории России. Приведены некоторые результаты наблюдений, указывающие на актуальность мониторинга приземного озона в России. К таким результатам относятся, в частности, крайне высокие концентрации озона в период аномальных волн тепла в Московском регионе летом 2002 и 2010 гг., сопровождавшихся лесными и торфяными пожарами. Некоторые элементы системы мониторинга приземного озона в России уже существуют. Одним из первоочередных мероприятий по его развитию является прогнозирование концентраций приземного озона с помощью химическо-транспортных моделей.

Ключевые слова. Загрязнение атмосферы, мониторинг, приземный озон, наблюдения, прогноз, гигиенические нормы, курорты России.

ACTUALITY OF OBSERVATIONS AND FORECASTING OF SURFACE OZONE IN RUSSIA

A.M. Zvyagintsev^{1)*}, I.N. Kuznetsova²⁾, I.Yu. Shalygina²⁾, M.I. Nakhaev²⁾, E.A. Lezina³⁾, V.A. Lapchenko⁴⁾, M.P. Nikiforova⁵⁾, V.I. Demin⁶⁾

```
1) Central aerological observatory,
3, Pervomayskaya st., 141700, Dolgoprudny, Moscow Region, Russia; *zvyagintsev45@yandex.ru
                           2) Hydrometeorological Center of Russia,
                  9-13, Bolshoi Predtechenskii per., 123242, Moscow, Russia
```

3) Mosecomonitoring, State Environmental Institution, 11, bldg 1, Novyi Arbat st., 119019, Moscow, Russia

⁴⁾ Karadag scientific station Viazemsky - RAS Nature Reserve, 24, Nauki st., 298188, u.v. Kurortnoe, Feodosiya, Russia ⁵⁾ Crimean Federal University Vernadsky, 14, Astana Kesaeva st., 299038, Sevastopol, Russia

6) Polar geophysical institute,

26a, Academgorodok st., 184209, Apatity, Russia

Summary. A brief review of observations of surface ozone and its forecasting at the Russian territory is presented. Some results of observations are given. These

results point out actuality of ozone monitoring in Russia; among them there are very high ozone concentrations during summer heat waves in 2002 and 2010 in the Moscow region which were accompanied by forest and peat wildfires. Some elements of ozone monitoring system in Russia already exist. One of the urgent task of creating ozone monitoring system is ozone forecasting using chemistry-transport models.

Keywords. Atmospheric pollution, monitoring, surface ozone, observations, forecasting, critical levels, resort areas of Russia.

Введение

Озон в атмосфере является малой газовой составляющей, его отношение смеси на различных высотах лежат в диапазоне 1-10⁴ млрд⁻¹. В отличие от многих других малых газовых составляющих он является естественным компонентом состава атмосферы, поскольку образуется из кислорода под действием солнечной радиации. Повсеместные измерения озона в приземном слое атмосферы после его открытия в 1839 г. начались уже в 1870-х гг., но через 10-20 лет были прекращены, так как выяснилось, что они были недостаточно точны (Rubin, 2001). Новый этап в измерениях приземной концентрации озона начался в 1940-х гг., когда методы химического определения концентраций озона в воздухе были уже достаточно хорошо разработаны, и в Лос-Анжелесе были зарегистрированы многочисленные случаи фотохимического смога, вызывавшего расстройство здоровья. Было установлено, что основным компонентом смога являлся озон (Haagen-Smit, 1952). Были разработаны газоанализаторы озона непрерывного действия с записью на диаграммной ленте, и на ряде станций Европы и Северной Америки начались систематические исследования приземного озона. Следующий этап, который, по-видимому, следует считать началом мониторинга приземного озона в глобальном масштабе (почти на всех континентах), начался в 1980-х гг. после появления газоанализаторов, основанных на оптическом методе измерений, и персональных компьютеров, способных записывать данные измерений. Это позволило резко увеличить количество и качество измерений.

Озон является токсичным газом, поражающим при повышенных концентрациях, прежде всего, органы дыхания (WHO, 2006). Он раздражает слизистую оболочку дыхательных путей и глаз, повреждает сурфактант легких. В повышенных концентрациях озон вызывает кашель, отечность и першение в горле, чувство сдавливания в груди, заложенность. Снижается функция легких — затрудняется дыхание, отсутствует возможность сделать глубокий вдох, дыхание становится неглубоким, частым, поверхностным. Воспаляются и повреждаются клетки эпителия трахеи, бронхов и альвеол. Появляется повышенная восприимчивость дыхательной системы к инфекции. Обостряется астма, повышается восприимчивость к другим аллергенам, обостряются другие хронические патологии легких. Нарушается развитие

легочной системы у детей с последующими хроническими заболеваниями и нарушением функций во взрослом возрасте. Группами населения, которые особенно чувствительны к повышенным концентрациям озона, являются люди, страдающие астмой, хроническим бронхитом, эмфиземой; дети потому, что в возрасте, когда легкие ребенка развиваются, они чаще других находятся на открытом воздухе, особенно в летнее время; пожилые люди, у которых уже имеется патология легких; активные люди всех возрастов при занятиях спортом или профессиональной деятельностью на открытом воздухе; некоторые здоровые люди с большей чувствительностью к озону или генетической предрасположенностью.

Мониторинг приземного озона проводится с целями: 1) своевременно выявить эпизоды с опасными для здоровья концентрациями озона, предупредить население о грозящих опасностях для здоровья и предложить оптимальные стратегии поведения; 2) установить долговременные тенденции изменения концентрации озона; 3) получить данные наблюдений для проведения и верификации моделирования. Целью настоящей работы является описание современного состояния мониторинга приземного озона в России и кратко обосновать его необходимость.

Результаты и их обсуждение

Всемирной организацией здравоохранения (ВОЗ) озон включен в список пяти основных загрязняющих веществ, содержание которых необходимо контролировать при определении качества воздуха (WHO, 2006). В России озон относится к веществам первого (наивысшего) класса опасности (ГН, 2003). Опасной для здоровья концентрацией озона в России считается гигиеническая норма – средняя за 20-30 мин концентрация 160 мкг м⁻³ (ГН, 2003); в странах Европейского Союза – средняя за 8 ч концентрация 160 мкг м⁻³ (ЕС, 2008); в США – среднее за 8 ч отношение смеси 70 млрд⁻¹ (ЕРА, 2015); по рекомендациям ВОЗ – средняя за 8 ч концентрация 100 мкг м⁻³ (WHO, 2006) (на высотах 0-300 м над у.м. отношение смеси 1 млрд⁻¹ примерно соответствует концентрации 2 мкг м⁻³).

Ориентировочная зависимость опасности воздействия отношения смеси озона на здоровье приведена на рис. 1.

Наибольшее число случаев признания качества воздуха неудовлетворительным в США связано с повышенными уровнями озона (рис. 2). В Западной Европе наиболее опасным загрязнителем воздуха считаются мелкие взвешенные вещества (РМ_{2.5}), на втором месте – приземный озон. Повышенные уровни приземного озона в Западной Европе связаны с повышенными температурами и, нередко, с многочисленными пожарами, как это произошло, например, летом 2003 г. (рис. 3); в экстремальных ситуациях регистрируют многочисленные случаи преждевременной смертности, связанные с высокими уровнями озона (Filleul et al., 2006; Stedman, Kent, 2008).

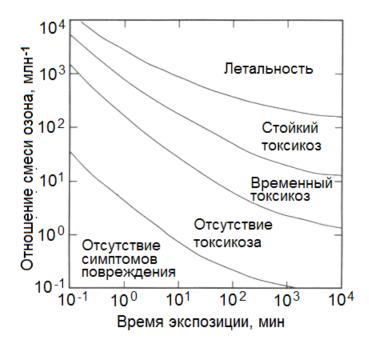


Рисунок 1. Ориентировочная зависимость опасности воздействия отношения смеси озона на здоровье

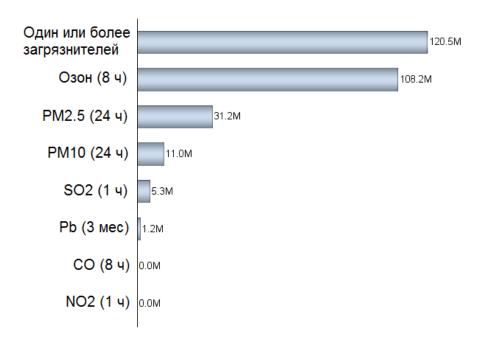


Рисунок 2. Число людей (в миллионах), живущих в США в местности, где наблюдались превышения национальных стандартов качества воздуха в 2015 г. (по данным EPA, США) (https://www.epa.gov/sites/production/files/2016-06/ctypeoplechart2015.png)

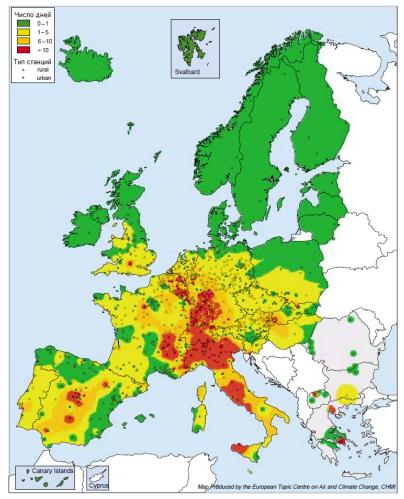


Рисунок 3. Число превышений пороговой величины концентрации озона для информирования населения (> 180 мкг м⁻³ для среднего за 1 ч), наблюденных на сельских и городских станциях Европы в период с апреля по август 2003 г. (Fiala et al., 2003)

Большую озабоченность в странах Северной Америки и Европы вызывает отрицательное влияние приземного озона на продуктивность лесов, развитие растений и урожайность сельскохозяйственных культур, в частности, пшеницы (Семенов и др., 1999; Harmens et al., 2016). Экономические потери от влияния озона на урожайность в США и Европе исчисляются миллиардами долларов. Дальнейшее продолжение климатических изменений, сопровождающееся повышение концентраций приземного озона, может только усугубить эту проблему (Lobell, Gourdji, 2012), а снижение вредных выбросов (в частности, оксидов азота), по-видимому, позволит сократить экономические потери.

В настоящее время в Европе наблюдения приземного озона выполняют тысячи станций, вовлеченных в международные, национальные и местные программы исследований. В нашей стране первые длительные (продолжительностью более 10 лет) регулярные измерения концентрации приземного озона были начаты почти одновременно в конце 1980-х - начале 1990-х гг. в

горах Северного Кавказа (Еланский, Сеник, 1995), в Томске (Белан, 1996), на Кольском полуострове (Белоглазов, 1996), в Москве и ее окрестностях (Звягинцев, Кузнецова, 2002; Горчаков и др., 2006; Еланский и др., 2007). С 2002 г. в Московском регионе создана густая сеть автоматизированных наблюдений ГПУ "Мосэкомониторинг", и озон измеряется на 10-20 станциях как в г. Москве, так и в Московской области. Кроме того, регулярные наблюдения озона в нашей стране проводятся в некоторых биосферных заповедниках России (в т.ч. в Крыму (Лапченко, Звягинцев, 2014)), а также в городах С.-Петербург, Сочи, Обнинск и др. Благодаря систематическим наблюдениям в Московском регионе: а) были установлены основные закономерности сезонных и внутрисуточных вариаций озона в приземном воздухе (Звягинцев, Кузнецова, 2002; Звягинцев, 2004; Горчаков и др., 2006; Еланский и др., 2007); б) исследована пространственная изменчивость озона регионального и синоптического масштаба (Звягинцев и др., 2008); в) проведены сравнения режима озона в московском мегаполисе с наблюдающимся в зарубежных европейских городах (Звягинцев и др., 2010б).

Концентрация приземного озона зависит от пространственного расположения в атмосфере источников и стоков озона и определяется динамическими и фотохимическими процессами. Схематическое вертикальное распределение отношения смеси озона приведено на рис. 4. Поток озона направлен от большего отношения смеси озона к меньшему. Рис. 4 иллюстрирует, что основной источник озона находится в верхней стратосфере. На высоте тропопаузы отношение смеси озона составляет около 100 млрд⁻¹, а на верхней границе пограничного слоя (около 1.5 км над земной поверхностью) – около 50 млрд⁻¹; источников и стоков в свободной тропосфере, которые могли бы существенно исказить вертикальный профиль отношения смеси озона, практически не бывает. Земная поверхность представляет сток для озона и на территории России практически всегда под верхней границей пограничного слоя отношение смеси озона падает. И лишь в редких случаях, когда в пограничном слое создаются благоприятные условия для интенсивной фотохимической генерации озона, отношение смеси приземного озона может вырасти до опасных для здоровья значений.

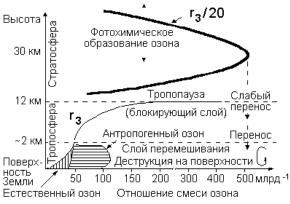


Рисунок 4. Схема вертикального распределения отношения смеси озона в атмосфере (Schutath, 1984)

Выше 1.5 км над земной поверхностью сезонный ход отношения смеси озона в тропосфере относительно невелик, а суточные ходы озона и температуры и вовсе слабые. В то же время суточный ход приземной температуры достаточно велик, что приводит к значительным деформациям пограничного слоя в течение суток, особенно в теплый период (рис. 5) (Stull, 1988). В ночное время, особенно при инверсии температуры, поток озона к земной поверхности существенно ослабевает, и в приземном слое его отношение смеси падает из-за разрушения озона на поверхности. В районе полудня возникает интенсивное перемешивание пограничного слоя, и отношения смеси озона у поверхности и у верхней границы пограничного слоя становятся близки (Taubman et al., 2006; Morris et al., 2010). Этим в значительной степени и объясняется суточный и сезонный ход приземного озона, а также различия этих ходов на разных высотах (рис. 6).



Рисунок 5. Суточные изменения пограничного слоя атмосферы (Stull, 1999)
Представлена суточная эволюция ПСА в период существования области высокого давления.
В течение суток в ПСА можно выделить три основных слоя: турбулентный слой перемешивания, гораздо менее турбулизованный остаточный слой, образовавшийся из турбулентного слоя перемешивания, и стабильный ночной пограничный слой, который характеризуется наличием периодов со спорадической турбулентностью

Такой механизм поступления озона в приземный слой из стратосферы обычно не может вызвать концентрации приземного озона выше 70 млрд⁻¹ (соответствует 140 мкг м⁻³), наблюдаемые при фотохимическом смоге. Понимание того, какие процессы могут привести к концентрациям приземного озона более 160 мкг м⁻³, было предугадано Хаагеном-Смитом (1952) и обосновано в работах (Chameides, Walker, 1973; Crutzen, 1973). К настоящему времени четко установлено, что при неблагоприятных метеорологических ситуациях и достаточном уровне солнечной радиации озон образуется в фотохимических реакциях его предшественников. К последним относятся летучие органические соединения (углеводороды) и оксиды азота (сумма NO и NO₂) (Белан, 2010; Jасоb. 1999; Seinfert, Pandis, 2006). Углеводороды могут быть как антропогенного, так и естественного (в первую очередь, эмиссии деревьями: изопрен от лиственных и терпены от хвойных (Белан, 2010)) проис-

хождения; оксиды азота в смоговых ситуациях всегда имеют антропогенное происхождение. Концентрации озона антропогенного происхождения нелинейно зависят от скоростей эмиссий углеводородов и оксидов азота (рис.7) и связанных с ними концентраций этих загрязнителей в воздухе. Из рис. 7, в частности, видно, что при недостатке углеводородов, которая часто имеется в городах, увеличение концентрации оксидов азота приводит к уменьшению уровней озона.

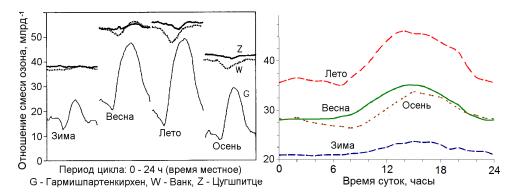


Рисунок 6. Средний суточный ход отношения смеси приземного озона на германских станциях Гармишпартенкирхен (740 м над у.м.), Ванк (1776 м над у.м.) и Цугшпитце (2962 м над у.м.; слева) (Scheel et al., 2003)) и Карадаге в Крыму (180 м над у.м.) (справа) (Лапченко, Звягинцев, 2014) в различные сезоны

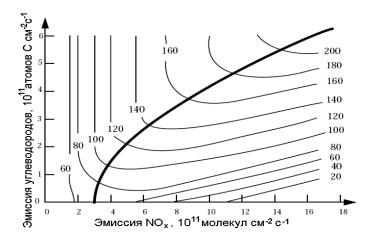


Рисунок 7. Модельные значения отношения смеси фотохимически образованного озона (млрд $^{-1}$) в зависимости от скоростей эмиссии оксидов азота и углеводородов (Sillman, 1990). Толстая линия разделяет NO_{χ} -ограниченный (слева сверху) и углеводородно-ограниченный (справа снизу) режимы фотохимического образования озона

При том, что регулярные наблюдения в Московском регионе были начаты в 1991 г., первые эпизоды с повышенными концентрациями (больше гигиенического норматива 160 мкг м⁻³) были зарегистрированы лишь в конце 1990-х годов (Звягинцев, Кузнецова, 2002). С тех пор эпизоды озонового загрязнения наблюдаются в Московском регионе почти каждый год. Загрязнение особенно

сильно проявилось в периоды обширных лесных и торфяных пожаров летом 2002 и 2010 гг., когда в Москве максимальные средние за 1 ч концентрация озона достигла 360, а в ее окрестностях (г. Зеленоград) – 500 мкг м $^{-3}$ (Звягинцев и др., 2004; Еланский и др., 2011; Звягинцев и др., 2011). За последнее время в Московском регионе в 2014 г. наблюдалось 4 случая превышения гигиенической нормы, в 2015 г. – 0 и в 2016 г. – 1. Озоновые эпизоды зарегистрированы и на черноморском побережье Крыма (Лапченко, Звягинцев, 2014), но там они не столь значительны – превышения гигиенической нормы не превышают 20 %. Появление таких эпизодов дало толчок для разработки в Центральной аэрологической обсерватории и Гидрометцентре России совместно с Главной геофизической обсерваторией статистических методов прогнозирования максимальных концентраций приземного озона (Звягинцев и др., 2010а). Была разработана методика краткосрочного прогноза, одобренная Центральной методической комиссией по прогнозам (ЦМКП) Росгидромета в 2007 г., установлены необходимые метеорологические условия озоновых эпизодов (Звягинцев и др., 2016). Основным необходимым условием (но не достаточным) их возникновения является застой воздушной массы в период малооблачной жаркой и сухой погоды, а также высокая температура (более 27°С), что проиллюстрировано на рис. 8. Наиболее высокие концентрации в озоновых эпизодах обнаруживаются на территориях распространения шлейфов московских загрязнений, т.е., в пригородах Москвы. По нашим исследованиям, самые высокие концентрации озона в Обнинске (в 100 км к юго-западу от Москвы) наблюдались при поступлении загрязненного московскими источниками воздуха, чему способствовали особые метеорологические условия и термобарическая структура атмосферного пограничного слоя.

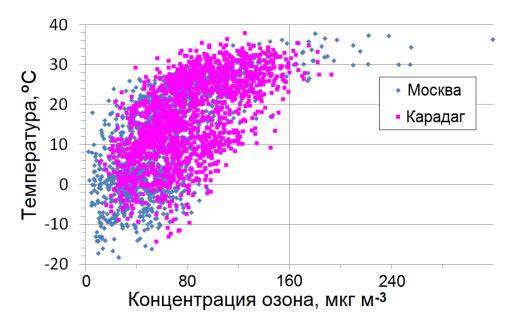


Рисунок 8. Поле рассеяния концентрации озона в зависимости от температуры (Звягинцев и др., 2016)

Близкие к экологической катастрофе события лета 2010 г. на Европейской территории России — масштабное пирогенное загрязнение атмосферы на территориях с высокой плотностью населения стимулировали развитие методов прогнозирования переноса продуктов горения и озонового загрязнения уже на более высоком уровне: на основе применения современных химических транспортных моделей с усвоением оперативных данных спутниковых наблюдений за очагами горения (Konovalov et al., 2011). В связи с актуальностью проблемы загрязнения атмосферы продуктами природных пожаров на фоне климатических тенденций работы в области модельных расчетов с усвоением данных об эмиссиях тем или иными способом в настоящее время активно развиваются зарубежными и отечественными учеными.

Особо подчеркнем, что известные закономерности пространственного распределения приземного озона (Tarasova et al., 2007; Hjellbrekke, Solberg, 2016), а также проведенные нами сравнения режима озона на черноморском побережье и прибрежных станциях Балканского полуострова (Шалыгина и др., 2017) дают основание утверждать, что озоновые эпизоды с опасными для здоровья и растительности уровнями могут формироваться как в приморских зонах массового отдыха, так, по-видимому, и в густонаселенных южных регионах нашей страны. Начатые НПО "Тайфун" (http://www.typhoon.obninsk.ru/) в Сочи автоматизированные измерения озона имеют большую научную и практическую ценность, но с учетом высокой неоднородности поля приземного озона, формируемой под воздействием микроклиматических, топографических и др. факторов, локальные измерения имеют в большей степени ограниченную информативность. В отсутствие регулярных наблюдений можно предполагать, что в зоне риска возникновения опасных озоновых эпизодов, очевидно, находятся Поволжье и Южный Урал, промышленный Юг Сибири и Дальнего Востока, единичные случаи высоких уровней озона фиксировались в маршрутных измерениях TROICA Института физики атмосферы PAH (http://www.ifaran.ru/). Проблема организации наблюдений за приземным озоном, по нашему мнению, должна быть решена в ближайшие годы и не только силами Росгидромета.

Ценность мониторинга приземного озона могут существенно повысить химические транспортные модели. Этот современный численный инструмент для прогнозирования, целью которого является предупреждение о наступлении экологически неблагоприятных условий озонового загрязнения, позволяет после должной верификации обеспечить объективные расчеты, в т.ч., для территорий, где наблюдения за озоном не проводятся, что особо важно с учетом размеров территорий, могущих оказаться в шлейфах активной генерации озона. В Гидрометцентре России в последние годы создана экспериментальная технология расчетов двух моделей ХТМ СНІМЕRE (Зарипов и др., 2011) и СОЅМО-Ru7-ART (Вильфанд и др., 2014); группа молодых сотрудников в настоящее время разрабатывает методы постобработки модельных расчетов концентраций озона на фоновых и городских территориях.

Выводы

- 1. В России существует необходимость мониторинга приземного озона, особенно в крупных мегаполисах и южных сельскохозяйственных и курортных регионах.
- 2. В России существуют элементы наблюдательной сети мониторинга приземного озона, но в недостаточном количестве, и качество наблюдений на них не соответствует требуемым ВМО критериям (Galbally et al., 2013). Поэтому необходимо создание наблюдательных станций, соответствующих требованиям ВМО.
- 3. Одним из первоочередных мероприятий по развитию в России системы мониторинга приземного озона также является его прогнозирование с помощью химическо-транспортных моделей.

Список литературы

Белан Б.Д. 1996. Проблема тропосферного озона и некоторые результаты его измерений. – Оптика атмосферы и океана, т. 9, № 9, с. 1184-1213.

Белан Б.Д. 2010. Озон в тропосфере. – Томск, изд-во ИОА СО РАН, 525 с.

Белоглазов М.И., Васильев А.Н., Ларин В.Ф. и др. 1996. Антропогенное влияние на приземный озон в районе Кольского полуострова. — Известия РАН. Физика атмосферы и океана, т. 32, № 1, с. 88-95.

Вильфанд Р.М., Кузнецова И.Н., Шалыгина И.Ю. и др. 2014. Мониторинг и прогнозирование качества воздуха в Московском регионе. — Биосфера, т. 6, № 4, с. 3-15.

ГН 2003. Гигиенические нормативы ГН 2.1.6.1338-03 "Предельно допустимые концентрации (ПДК) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе населенных мест".

Горчаков Г.И., Семутникова Е.Г., Зоткин Е.В. и др. 2006. Вариации газовых компонент загрязнения в воздушном бассейне г. Москвы. — Известия РАН. Физика атмосферы и океана, т. 42, № 2, с. 176-190.

Еланский Н.Ф., Сеник И.А. 1995. Измерения приземной концентрации озона на Высокогорной научной станции Кисловодск: сезонные и суточные вариации. — Известия АН. Физика атмосферы и океана, т. 31, № 2, с. 251-259.

Еланский Н.Ф., Локощенко М.А., Беликов И.Б. и др. 2007. Закономерности изменчивости концентраций малых газовых составляющих в приземном воздухе г. Москвы. — Известия РАН. Физика атмосферы и океана, т. 43, \mathbb{N} 2, с. 219-231.

Еланский Н.Ф., Мохов И.И., Беликов И.Б. и др. 2011. Газовые примеси в атмосфере над Москвой летом 2010 г. — Известия РАН. Физика атмосферы и океана, т. 47, N 6, с. 729-738.

Зарипов Р.Б., Коновалов И.Б., Кузнецова И.Н. и др. 2011. Использование моделей WRF ARW и CHIMERE для численного прогноза концентрации приземного озона. — Метеорология и гидрология, № 4, с. 48-60.

Звягинцев А.М., Кузнецова И.Н. 2002. Изменчивость приземного озона в окрестностях Москвы: результаты десятилетних регулярных наблюдений. – Известия РАН. Физика атмосферы и океана, т. 38, \mathbb{N} 4, с. 486-495.

Звягинцев А.М. 2004. Основные периодичности временного хода приземного озона в Европе. — Метеорология и гидрология, № 10, с. 46-55.

Звягинцев А.М., Беликов И.Б., Егоров В.И. и др. 2004. Положительные аномалии приземного озона в июле-августе 2002 г. в Москве и ее окрестностях. – Известия РАН. Физика атмосферы и океана, т. 40, № 1, с. 75-86.

Звягинцев А.М., Какаджанова Г., Крученицкий Г.М. и др. 2008. Периодическая изменчивость приземной концентрации озона в западной и центральной Европе по данным наблюдений. — Метеорология и гидрология, $N \ge 3$, с. 38-47.

Звягинцев А.М., Беликов И.Б., Еланский Н.Ф. и др. 2010а. Статистическое моделирование максимальных суточных концентраций приземного озона. — Оптика атмосферы и океана, т. 23, № 2, с. 127-135.

Звягинцев А.М., Беликов И.Б., Еланский Н.Ф. и др. 2010б. Изменчивость концентраций приземного озона в Москве и Киеве. — Метеорология и гидрология, N 12, с. 26-35.

Звягинцев А.М., Блюм О.Б., Глазкова А.А. и др. 2011. Загрязнение воздуха на Европейской части России и в Украине в условиях жаркого лета 2010 года.
— Известия РАН. Физика атмосферы и океана, т. 47, № 6, с. 757-766.

Звягинцев А.М., Кузнецова И.Н., Шалыгина И.Ю. и др. 2016. Причины и факторы положительных аномалий приземной концентрации озона в Московском регионе и на юго-восточном побережье Крыма. — Оптика атмосферы и океана, т. 29, N = 6, с. 493–502.

Лапченко В.А., Звягинцев А.М. 2014. Приземный озон в Крыму. – Пространство и Время, № 2(16), с. 254-257.0

Семенов С.М., Кунина И.М., Кухта Б.А. 1999. Тропосферный озон и рост растений в Европе. – М., ИЦ "МиГ", 208 с.

Шалыгина И.Ю., Кузнецова И.Н., Звягинцев А.М. и др. 2017. Приземный озон на побережьях Балканского полуострова и Крыма. — Оптика атмосферы и океана, т. 30, № 6. DOI: 10.15372/AOO20170600.

Chameides W.L., Walker J.C.G. 1973. A photochemical theory for tropospheric ozone. – J. Geophys. Res., vol. 78, No. 36, pp. 8751-8760.

Crutzen P.J. 1973. A discussion of the chemistry of some minor constituents in the stratosphere and troposphere. – Pure and Applied Geophysics, vol. 106, pp. 1385-1399.

EC 2008. Directive 2008/50/EC of the European Parliament and of the Council of 21 May 2008 on ambient air quality and cleaner air for Europe. – Available at: http://eur-lex.europa.eu/legal-content/en/TXT/?uri=CELEX%3A32008L0050 (accessed 17 April 2017).

EPA 2015. National Ambient Air Quality Standards (NAAQS) for Ozone. – Available at: https://www.epa.gov/ozone-pollution/2015-national-ambient-air-quality-standards-naaqs-ozone (accessed 17 April 2017).

Fiala J., Cernikovsky L., de Leeuw F. et al. 2003. Air pollution by ozone in Europe in summer 2003. Overview of exceedances of EC ozone threshold values during the summer season April–August 2003 and comparisons with previous years. – Topic report 3/2003, Copenhagen, European Environment Agency, 33 p.

Filleul L., Cassadou S., Médina S. et al. 2006. The relation between temperature, ozone and mortality in nine French cities during the heat wave of 2003. – Environmental Health Perspectives, vol. 114, No. 9, pp. 1344-1347.

Galbally I.E., Schultz M.G. et al. 2013. Guidelines for continuous measurements of ozone in the troposphere. – WMO-GAW Report, No. 209, Geneve: WMO. 76 p.

Haagen-Smit A.J. 1952. Chemistry and physiology of Los Angeles smog. – Ind. and Eng. Chem. Res., vol. 44, pp. 1342–1346.

Harmens H., Mills G., Hayes F. et al. 2016. Air Pollution and Vegetation. – ICP Vegetation Annual Report 2015/2016. Gwynedd, UK: CEH, 35 p.

Hjellbrekke A.-G., Solberg S. 2016. Ozone measurements 2014. – EMEP/CCC-Report 3/2016. Norway: NILU, 110 p.

Jacob D.J. 1999. Introduction to Atmospheric Chemistry. – Princeton, NJ, University Press. 266 p.

Konovalov I.B., Beekmann M., Kuznetsova I.N. et al. 2011. Atmospheric impacts of the 2010 Russian wildfires: integrating modelling and measurements of an extreme air pollution episode in the Moscow region. – Atmos. Chem. Phys., vol. 11, No. 19, pp. 10031–10056.

Lobell D.B., Gourdji S.M. 2012. The influence of climate change on global crop productivity. – Plant Physiology, vol. 160, pp. 1686–1697.

Morris G.A., Ford B., Rappenglueck B. et al. 2010. An evaluation of the interaction of morning residual layer and afternoon mixed layer ozone in Houston using ozonesonde data. – Atmos. Environ., vol. 44, p. 4024–4034.

Rubin M.B. 2001. The history of ozone. The Schoenbe in period, 1839-1868. – Bull. Hist. Chem., vol. 26, No. 1, pp. 40-56.

Scheel H.E., Sladkovic R., Brunke E.G. et al. 1994. Measurements of lower tropospheric ozone at mid-latitudes of the Northern and Southern Hemisphere. – In: Ozone in the Troposphere and Stratosphere. Part 1. Proc. Quadr. Ozone Symp. 1992, NASA Conf. Publ. 3266, pp.11-14.

Schurath U. 1984. Entstehung und Verbreitung von anthropogenem Ozon in der Bundesrepublik Deutschland. – Wissenschaft und Umwelt, No. 2.

Seinfeld J.H., Pandis S.N. 2006. Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change. – New York: John Wiley & Sons, Inc., 1225 p.

Sillman S., Logan J.A., Wofsy S.C. 1990. The sensitivity of ozone to nitrogen oxides and hydrocarbons in regional ozone episodes. – J. Geophys. Res., vol. 95, No. D2, pp. 1837-1851.

Stedman J.R., Kent A.J. 2008. An analysis of the spatial patterns of human health related surface ozone metrics across the UK in 1995, 2003 and 2005. – Atmos. Environ., vol. 42, No. 8, pp. 1702-1716.

Stull R.B. 1988. An introduction to boundary layer meteorology. – Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 670 p.

Tarasova O.A., Brenninkmeijer C.A.M., Joeckel P. et al. 2007. A climatology of surface ozone in the extra tropics: cluster analysis of observations and model results. – Atmos. Chem. Phys., vol. 7, pp. 6099-6117.

Taubman B.F., Hains J.C., Thompson A.M. et al. 2006. Aircraft vertical profiles of trace gas and aerosol pollution over the mid-Atlantic U.S.: statistics and meteorological cluster analysis. – J. Geophys. Res., vol. 111, D10S07.

WHO 2006. Air Quality Guidelines: Global Update 2005. Particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide. – Geneve, WHO, 484 p.

References

Belan B.D. 1996. Problema troposfernogo ozona i nekotorye rezul'taty ego izmerenii [The problem of tropospheric ozone and some results of its measurements]. *Optika atmosfery i okeana – Optics of atmosphere and ocean*, vol. 9, no. 9, pp. 1184-1213. (In Russian).

Belan B.D. 2010. *Ozon v troposfere* [Ozone in the troposphere]. Tomsk, IOA SO RAN, Publ., 525 p. (In Russian).

Beloglazov M.I., Vasil'ev A.N., Larin V.F. i dr. 1996. Antropogennoe vliianie na prizemnyi ozon v raione Kol'skogo poluostrova [Anthropogenic influence on ground-level ozone in the Kola Peninsula]. *Izvestiia RAN. Fizika atmosfery i okeana* – *Izv. Physics of atmosphere and ocean*, vol. 32, no. 1, pp. 88-95. (In Russian).

Vil'fand R.M., Kuznetsova I.N., Shalygina I.Iu. i dr. 2014. Monitoring i prognozirovanie kachestva vozdukha v Moskovskom regione [Monitoring and forecasting air quality in the Moscow region]. *Biosfera – Biosphere*, vol. 6, no. 4, pp. 3-15. (In Russian).

GN 2003. Gigienicheskie normativy GN 2.1.6.1338-03 "Predel'no dopustimye kontsentratsii (PDK) zagriazniaiushchikh veshchestv v atmosfernom vozdukhe

naselennykh mest" [Hygienic standards GN 2.1.6.1338-03 "Maximum permissible concentration (MPC) of polluting substances in atmospheric air of populated areas"]. (In Russian).

Gorchakov G.I., Semutnikova E.G., Zotkin E.V. i dr. 2006. Variatsii gazovykh komponent zagriazneniia v vozdushnom basseine g. Moskvy [Variations of the gas component of pollution in the air basin of Moscow]. *Izvestiia RAN. Fizika atmosfery i okeana – Izv. Physics of atmosphere and ocean*, vol. 42, no. 2, pp. 176-190. (In Russian).

Elanskii N.F., Senik I.A. 1995. Izmereniia prizemnoi kontsentratsii ozona na Vysokogornoi nauchnoi stantsii Kislovodsk: sezonnye i sutochnye variatsii [Measurements of surface ozone concentrations at high mountain scientific station Kislovodsk: the seasonal and diurnal variations]. *Izvestiia AN. Fizika atmosfery i okeana – Izvestiya an. Physics of atmosphere and ocean,* vol. 31, no. 2, pp. 251-259. (In Russian).

Elanskii N.F., Lokoshchenko M.A., Belikov I.B. i dr. 2007. Zakonomernosti izmenchivosti kontsentratsii malykh gazovykh sostavliaiushchikh v prizemnom vozdukhe g. Moskvy [Regularities of variability of concentrations of trace gases in the surface air of Moscow]. *Izvestiia RAN. Fizika atmosfery i okeana – Izv. Physics of atmosphere and ocean*, vol. 43, no. 2, pp. 219-231. (In Russian).

Elanskii N.F., Mokhov I.I., Belikov I.B. i dr. 2011. Gazovye primesi v atmosfere nad Moskvoi letom 2010 g [Gas impurities in the atmosphere over Moscow in summer 2010]. *Izvestiia RAN. Fizika atmosfery i okeana – Izv. Physics of atmosphere and ocean*, vol. 47, no. 6, pp. 729-738. (In Russian).

Zaripov R.B., Konovalov I.B., Kuznetsova I.N. i dr. 2011. Ispol'zovanie modelei WRF ARW i CHIMERE dlia chislennogo prognoza kontsentratsii prizemnogo ozona [The use of models WRF ARW and CHIMERE for the numerical prediction of the surface ozone concentration]. *Meteorologiia i gidrologiia – Meteorology and hydrology*, No. 4, pp. 48-60. (In Russian).

Zviagintsev A.M., Kuznetsova I.N. 2002. Izmenchivost' prizemnogo ozona v okrestnostiakh Moskvy: rezul'taty desiatiletnikh reguliarnykh nabliudenii [Surface ozone variations in the vicinity of Moscow: the results of ten years of regular observations]. *Izvestiia RAN. Fizika atmosfery i okeana* – Izv. Physics of atmosphere and ocean, vol. 38, No 4, pp. 486-495. (In Russian).

Zviagintsev A.M. 2004. Osnovnye periodichnosti vremennogo khoda prizemnogo ozona v Evrope [The basic periodicity of the interim progress of ground-level ozone in Europe]. *Meteorologiia i gidrologiia – Meteorology and hydrology*, No. 10, pp. 46-55. (In Russian).

Zviagintsev A.M., Belikov I.B., Egorov V.I. i dr. 2004. Polozhitel'nye anomalii prizemnogo ozona v iiule-avguste 2002 g. v Moskve i ee okrestnostiakh [Positive anomalies of surface ozone in July-August 2002 in Moscow and its surroundings]. *Izvestiia RAN. Fizika atmosfery i okeana* – *Izv. Physics of atmosphere and ocean*, vol. 40, No.1, pp. 75-86. (In Russian).

Zviagintsev A.M., Kakadzhanova G., Kruchenitskii G.M. i dr. 2008. Periodicheskaia izmenchivost' prizemnoi kontsentratsii ozona v zapadnoi i tsentral'noi Evrope po dannym nabliudenii [Periodic variability of the surface ozone concentration in Western and Central Europe, according to observations]. *Meteorologiia i gidrologiia – Meteorology and hydrology*, no. 3, pp. 38-47. (In Russian).

Zviagintsev A.M., Belikov I.B., Elanskii N.F. i dr. 2010a. Statisticheskoe modelirovanie maksimal'nykh sutochnykh kontsentratsii prizemnogo ozona [Statistical modeling of daily maximum concentrations of ground-level ozone]. *Optika atmosfery i okeana – Optics of atmosphere and ocean*, vol. 23, no 2, pp. 127-135. (In Russian).

Zviagintsev A.M., Belikov I.B., Elanskii N.F. i dr. 2010b. Izmenchivost' kontsentratsii prizemnogo ozona v Moskve i Kieve [The variability of background ozone concentrations in Moscow and Kiev]. *Meteorologiia i gidrologiia – Meteorology and hydrology*, no. 12, pp. 26-35. (In Russian).

Zviagintsev A.M., Blium O.B., Glazkova A.A. i dr. 2011. Zagriaznenie vozdukha na Evropeiskoi chasti Rossii i v Ukraine v usloviiakh zharkogo leta 2010 goda [Air pollution in the European part of Russia and Ukraine in the hot summer of 2010]. *Izvestiia RAN. Fizika atmosfery i okeana – Izv. Physics of atmosphere and ocean*, vol. 47, No. 6, pp. 757-766. (In Russian).

Zviagintsev A.M., Kuznetsova I.N., Shalygina I.Iu. i dr. 2016. Prichiny i faktory polozhitel'nykh anomalii prizemnoi kontsentratsii ozona v Moskovskom regione i na iugo-vostochnom poberezh'e Kryma [Causes and factors of positive anomalies of surface ozone concentration in the Moscow region and in the South-East coast of Crimea]. *Optika atmosfery i okeana – Optics of atmosphere and ocean*, vol. 29, No. 6, pp. 493–502. (In Russian).

Lapchenko V.A., Zviagintsev A.M. 2014. Prizemnyi ozon v Krymu [Ground-level ozone in the Crimea]. *Prostranstvo i Vremia* – *Space and Time*, no 2(16), pp. 254-257. (In Russian).

Semenov S.M., Kunina I.M., Kukhta B.A. 1999. *Troposfernyi ozon i rost rastenii v Evrope* [Tropospheric ozone and plant growth in Europe]. Moscow, ITs "MiG" Publ., 208 p. (In Russian).

Shalygina I.Iu., Kuznetsova I.N., Zviagintsev A.M. i dr. 2017. Prizemnyi ozon na poberezh'iakh Balkanskogo poluostrova i Kryma [Ground-level ozone on the coasts of the Balkan Peninsula and the Crimea]. *Optika atmosfery i okeana – Optics of atmosphere and ocean*, vol. 30, No. 6. DOI: 10.15372/AOO20170600. (In Russian).

Chameides W.L., Walker J.C.G. 1973. A photochemical theory for tropospheric ozone. – J. Geophys. Res., vol. 78, No. 36, pp. 8751-8760.

Crutzen P.J. 1973. A discussion of the chemistry of some minor constituents in the stratosphere and troposphere. – Pure and Applied Geophysics, vol. 106, pp. 1385-1399.

EC 2008. Directive 2008/50/EC of the European Parliament and of the Council of 21 May 2008 on ambient air quality and cleaner air for Europe. – Available at:

http://eur-lex.europa.eu/legal-content/en/TXT/?uri=CELEX%3A32008L0050 (accessed 17 April 2017).

EPA 2015. National Ambient Air Quality Standards (NAAQS) for Ozone. – Available at: https://www.epa.gov/ozone-pollution/2015-national-ambient-air-quality-standards-naaqs-ozone (accessed 17 April 2017).

Fiala J., Cernikovsky L., de Leeuw F. et al. 2003. Air pollution by ozone in Europe in summer 2003. Overview of exceedances of EC ozone threshold values during the summer season April–August 2003 and comparisons with previous years. – Topic report 3/2003, Copenhagen, European Environment Agency, 33 p.

Filleul L., Cassadou S., Médina S. et al. 2006. The relation between temperature, ozone and mortality in nine French cities during the heat wave of 2003. – Environmental Health Perspectives, vol. 114, No. 9, pp. 1344-1347.

Galbally I.E., Schultz M.G. et al. 2013. Guidelines for continuous measurements of ozone in the troposphere. – WMO-GAW Report, No. 209, Geneve: WMO. 76 p.

Haagen-Smit A.J. 1952. Chemistry and physiology of Los Angeles smog. – Ind. and Eng. Chem. Res., vol. 44, pp. 1342–1346.

Harmens H., Mills G., Hayes F. et al. 2016. Air Pollution and Vegetation. – ICP Vegetation Annual Report 2015/2016. Gwynedd, UK: CEH, 35 p.

Hjellbrekke A.-G., Solberg S. 2016. Ozone measurements 2014. – EMEP/CCC-Report 3/2016. Norway: NILU, 110 p.

Jacob D.J. 1999. Introduction to Atmospheric Chemistry. – Princeton, NJ, University Press. 266 p.

Konovalov I.B., Beekmann M., Kuznetsova I.N. et al. 2011. Atmospheric impacts of the 2010 Russian wildfires: integrating modelling and measurements of an extreme air pollution episode in the Moscow region. – Atmos. Chem. Phys., vol. 11, No. 19, pp. 10031–10056.

Lobell D.B., Gourdji S.M. 2012. The influence of climate change on global crop productivity. – Plant Physiology, vol. 160, pp. 1686–1697.

Morris G.A., Ford B., Rappenglueck B. et al. 2010. An evaluation of the interaction of morning residual layer and afternoon mixed layer ozone in Houston using ozonesonde data. – Atmos. Environ., vol. 44, p. 4024–4034.

Rubin M.B. 2001. The history of ozone. The Schoenbe in period, 1839-1868. – Bull. Hist. Chem., vol. 26, No. 1, pp. 40-56.

Scheel H.E., Sladkovic R., Brunke E.G. et al. 1994. Measurements of lower tropospheric ozone at mid-latitudes of the Northern and Southern Hemisphere. – In: Ozone in the Troposphere and Stratosphere. Part 1. Proc. Quadr. Ozone Symp. 1992, NASA Conf. Publ. 3266, pp.11-14.

Schurath U. 1984. Entstehung und Verbreitung von anthropogenem Ozon in der Bundesrepublik Deutschland. – Wissenschaft und Umwelt, No. 2.

Seinfeld J.H., Pandis S.N. 2006. Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change. – New York: John Wiley & Sons, Inc., 1225 p.

Sillman S., Logan J.A., Wofsy S.C. 1990. The sensitivity of ozone to nitrogen oxides and hydrocarbons in regional ozone episodes. – J. Geophys. Res., vol. 95, No. D2, pp. 1837-1851.

Stedman J.R., Kent A.J. 2008. An analysis of the spatial patterns of human health related surface ozone metrics across the UK in 1995, 2003 and 2005. – Atmos. Environ., vol. 42, No. 8, pp. 1702-1716.

Stull R.B. 1988. An introduction to boundary layer meteorology. – Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 670 p.

Tarasova O.A., Brenninkmeijer C.A.M., Joeckel P. et al. 2007. A climatology of surface ozone in the extra tropics: cluster analysis of observations and model results. – Atmos. Chem. Phys., vol. 7, pp. 6099-6117.

Taubman B.F., Hains J.C., Thompson A.M. et al. 2006. Aircraft vertical profiles of trace gas and aerosol pollution over the mid-Atlantic U.S.: statistics and meteorological cluster analysis. – J. Geophys. Res., vol. 111, D10S07.

WHO 2006. Air Quality Guidelines: Global Update 2005. Particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide. – Geneve, WHO, 484 p.

Статья поступила в редакцию: 24.04.2017 г. После переработки: 27.05.2017 г.