

УДК 551.510:41

ИССЛЕДОВАНИЯ И МОНИТОРИНГ ПРИЗЕМНОГО ОЗОНА В РОССИИ

*А.М. Звягинцев*¹, *И.Н. Кузнецова*², *И.Ю. Шальгина*², *Е.А. Лезина*³,
*В.А. Лапченко*⁴, *М.П. Никифорова*⁵, *В.И. Демин*⁶

¹Центральная аэрологическая обсерватория, г. Долгопрудный;

²Гидрометеорологический научно-исследовательский центр
Российской Федерации, г. Москва;

³ГПБУ "Мосэкомониторинг", г. Москва;

⁴Карадагская научная станция им. Т.И. Вяземского – природный заповедник РАН;

⁵Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского (филиал), г. Симферополь;

⁶Полярный геофизический институт, г. Анатиты
zvyagintsev45@yandex.ru

Приведен краткий обзор наблюдений приземного озона, описаны механизмы его образования. Отражена история наблюдений приземного озона в России, основные результаты отечественных исследований, включая разработанные методы прогнозирования. Значительное внимание уделено эпизодам высоких концентраций озона, обусловленных пирогенными загрязнениями, дальним переносом из районов добычи углеводородов и неблагоприятными для рассеивания примеси метеорологическими условиями в периоды аномально жаркой и сухой погоды. Озоновые эпизоды с превышением отечественных гигиенических нормативов в последние годы наблюдались на черноморском побережье, в Москве и Томске, на юге Дальнего Востока, что подчеркивает актуальность и необходимость развития отечественной сети регулярных наблюдений приземного озона. Одним из направлений развития мониторинга является применение расчетных методов, включая расчеты озона химическими транспортными моделями.

Ключевые слова: приземный озон, мониторинг, озоновый эпизод, химическая транспортная модель.

Введение

После открытия озона в 1839 году его повсеместные измерения в приземном слое начались в 1870-х гг., но через 10–20 лет были прекращены из-за больших погрешностей измерений. Новый этап измерений приземной концентрации озона (ПКО) начался в середине XX столетия в связи с многочисленными случаями фотохимического смога в Лос-Анжелесе, когда выяснилось, что основным компонентом смога является озон, образующийся в результате фотохимических реакций с участием летучих загрязнителей воздуха [40]. В тот период 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 (1970–1980-х гг.), по-видимому, следует считать началом мониторинга приземного озона в глобальном масштабе; он обозначен появлением высокоточных газоанализаторов, основанных на оптическом методе измерений, состыкованных с персональными компьютерами, способных накапливать данные измерений, необходимых для изучения природы образования и изменчивости озона в атмосфере.

В отличие от подавляющего большинства других малых газовых составляющих, озон является естественным компонентом состава атмосферы, поскольку образуется из кислорода под действием солнечной радиации. Отношения смеси озона в тропосфере и стратосфере лежат в диапазоне $1\text{--}10^4$ млрд⁻¹ (1 млрд⁻¹ на уровне моря соответствует концентрации около 2 мкг·м⁻³).

Озон является токсичным газом, раздражает слизистую оболочку дыхательных путей и глаз. При повышенных концентрациях вызывает кашель, отечность и першение в горле, чувство сдавливания в груди, повышается восприимчивость к другим аллергенам [56]. Группами населения, особенно чувствительными к повышенным концентрациям озона, являются люди, страдающие астмой и другими хроническими заболеваниями органов дыхания, эмфиземой; дети и пожилые люди, люди всех возрастов, занимающиеся профессиональной деятельностью или спортом на открытом воздухе.

В повышенных концентрациях озон неблагоприятно влияет на продуктивность деревьев и растений, в частности на урожайность, повреждая внутриклеточные мембраны листьев, понижает интенсивность фотосинтеза, препятствуя дыханию растений [24, 28, 29, 41, 46].

Наблюдения приземного озона являются составной частью мониторинга загрязняющих веществ в большинстве зарубежных стран. Регулярные измерения ПКО служат основой для своевременного обнаружения эпизодов с опасными для здоровья концентрациями, информирования населения о возможных угрозах для здоровья с предложениями оптимального поведения. Многолетние наблюдения позволяют контролировать тенденции содержания озона, а также проводить верификацию методов прогнозирования ПКО, в т. ч. на основе химических транспортных моделей.

Целью настоящей работы является описание современного состояния мониторинга приземного озона в России.

Результаты и их обсуждение

Всемирная организация здравоохранения (ВОЗ) включила озон в список пяти основных загрязняющих веществ, содержание которых необходимо контролировать при определении качества воздуха [56]. В России озон относится к веществам первого класса опасности; опасной

для здоровья концентрацией озона в России считается гигиеническая норма (ГН) – средняя за 20–30 мин концентрация $160 \text{ мкг}\cdot\text{м}^{-3}$ [7]; в странах Европейского Союза – средняя за 8 ч концентрация $120 \text{ мкг}\cdot\text{м}^{-3}$ [35]; в США – среднее за 8 ч отношение смеси 70 млрд^{-1} [36]; по рекомендациям ВОЗ – средняя за 8 ч концентрация $100 \text{ мкг}\cdot\text{м}^{-3}$ [56]. Кроме того, в России существует ГН для среднесуточной концентрации озона – $30 \text{ мкг}\cdot\text{м}^{-3}$ [7]. Ни в одной стране мира, кроме стран СНГ, такая характеристика не нормируется, а, например, в Беларуси в 1990-х гг. норма для среднесуточной концентрации озона увеличена до $90 \text{ мкг}\cdot\text{м}^{-3}$. Заметим, что практически на всей территории Западной Европы среднегодовая концентрация озона превышает $30 \text{ мкг}\cdot\text{м}^{-3}$, в Московском регионе, к примеру, в фоновых районах Мурманской области (Ловозеро) среднесуточные ПКО превышают предельно допустимую среднесуточную концентрацию 95 % дней в году [9]. Учитывая, что вредное влияние озона проявляется лишь в светлое время, нормирование среднесуточной концентрации озона является, по-видимому, неоправданным.

Наибольшее число случаев признания качества воздуха в США неудовлетворительным связано с повышенными уровнями озона. В Западной Европе наиболее опасным загрязнителем воздуха считаются мелкие взвешенные вещества (PM2.5), приземный озон – на втором месте. Повышенные уровни приземного озона практически всегда связаны с повышенными температурами и иногда – с крупномасштабными пожарами, как это произошло, например, в Западной Европе летом 2003 года (рис. 1). По некоторым оценкам [37, 38, 52], здесь зарегистрированы многочисленные случаи преждевременной смертности, связанные, главным образом, с наблюдавшимися высокими уровнями озона.

Концентрация приземного озона зависит от пространственного расположения в атмосфере источников и стоков озона и определяется динамическими и фотохимическими процессами. Большую часть года ПКО в значительной степени определяется его потоком из стратосферы [2, 31, 39]. Схематически вертикальное распределение парциального давления озона p_3 (оно пропорционально его счетной концентрации) и отношения смеси озона r_3 показаны на рис. 2. Отношение смеси озона r_3 (синяя линия) составляет на верхней границе пограничного слоя около $0,05 \text{ млн}^{-1}$ (50 млрд^{-1}), на высоте тропопаузы – около $0,1 \text{ млн}^{-1}$ (100 млрд^{-1}), в максимуме (на высоте 30–40 км) – около 8 млн^{-1} . (Для справки: $1 \text{ млн}^{-1} = 1000 \text{ млрд}^{-1}$, или ppb.) В свободной тропосфере нет источников и стоков, которые могли бы существенно исказить вертикальный профиль отношения смеси озона.

Земная поверхность представляет сток для озона, и обычно внутри атмосферного пограничного слоя (АПС) отношение смеси озона падает

с уменьшением высоты [2, 48]. И лишь в тех редких случаях, когда в АПС создаются благоприятные условия для интенсивной фотохимической генерации озона, отношение смеси озона над земной поверхностью может превышать такое отношение на верхней границе АПС.

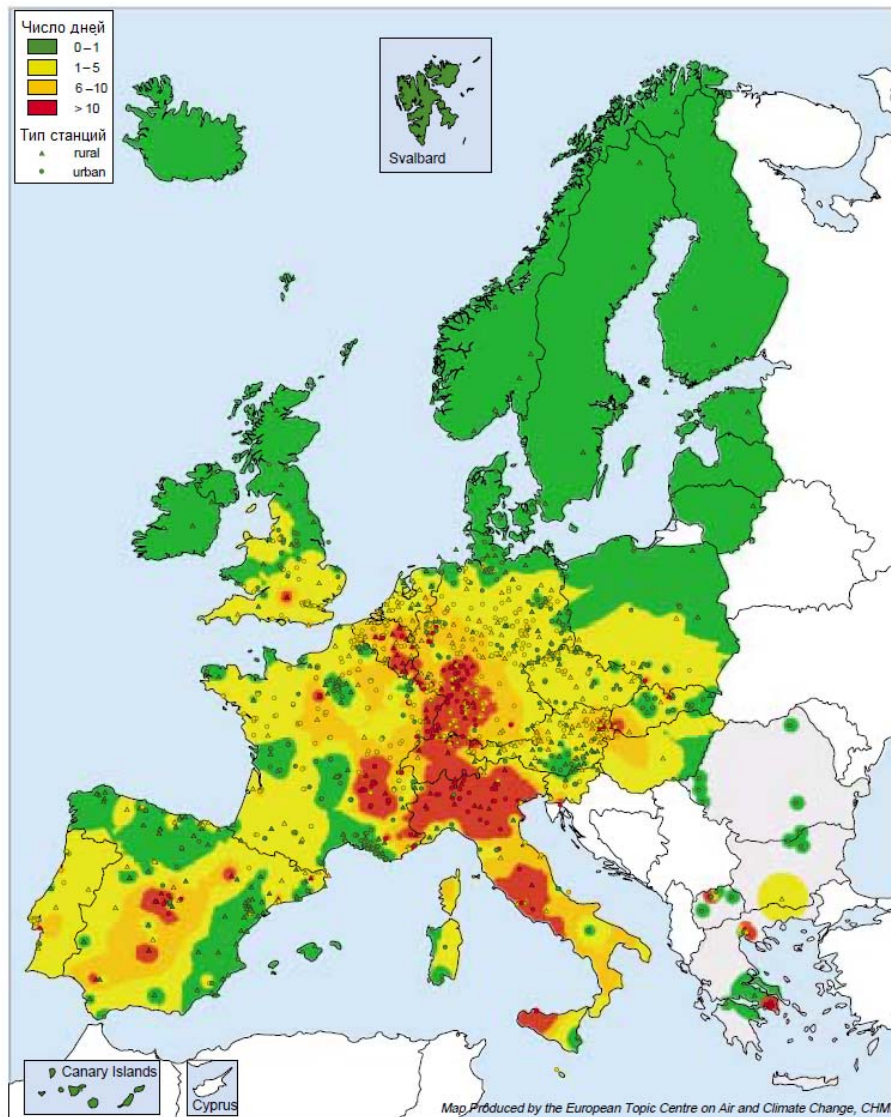


Рис. 1. Число дней с превышением пороговой величины концентрации озона ($>180 \text{ мкг}\cdot\text{м}^{-3}$, среднего за 1 ч) в Европе в период с апреля по август 2003 г. [37].

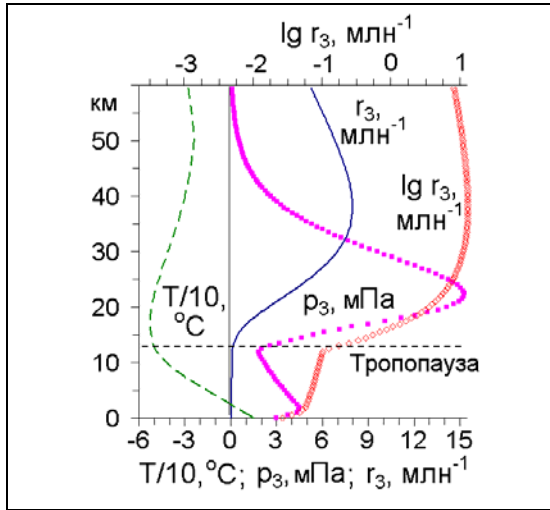


Рис. 2. Типовое вертикальное распределение парциального давления озона (p_3 , мПа), отношения смеси озона (r_3 , млн⁻¹), его десятичного логарифма ($\lg r_3$), а также температуры (T , °C): внизу шкала для $T/10$, p_3 и r_3 , вверху шкала для $\lg r_3$.

В свободной тропосфере изменчивость отношения смеси озона сравнительно незначительна, выше 1,5 км сезонный и суточный ходы отношения смеси озона невелики, что подтверждается многолетними наблюдениями на высокогорных станциях. На рис. 3 отображены сезонные изменения отношения смеси озона на трех станциях Германии: Гармишпартенкирхен (высота 740 м н.у.м.), Ванк (1776 м н.у.м.) и Цугшпитце (2962 м н.у.м.); здесь же приведен суточный ход в различные сезоны отношения смеси озона на ст. Карадаг (180 м н.у.м.) на юго-восточном побережье Крымского полуострова.

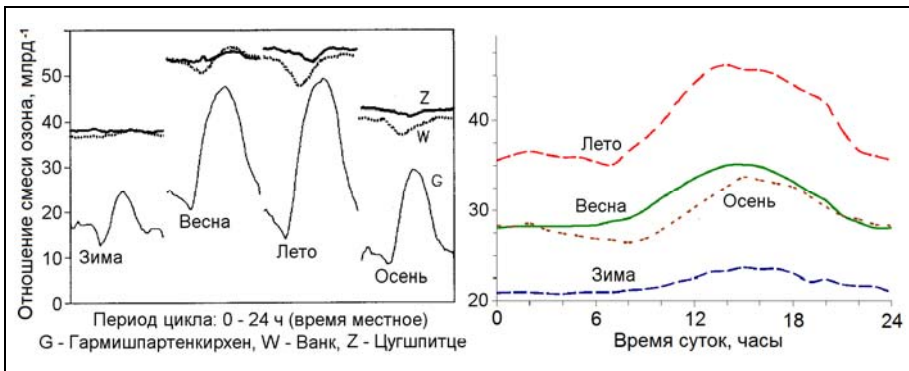


Рис. 3. Средний суточный ход отношения смеси приземного озона (мldr⁻¹) на трех станциях: Гармишпартенкирхен, Ванк и Цугшпитце (слева) [48], на ст. Карадаг (справа) [23].

Суточный и сезонный ход приземного озона во многом определяются термической стратификацией и вертикальным распределением скорости ветра в АПС [53], внутрисуточная эволюция которого в значительной степени объясняет колебания ПКО (рис. 4). Так, в ночное время, особенно при инверсии температуры, поток озона к земной поверхности существенно ослаблен, и в приземном слое его отношение смеси падает из-за разрушения озона на поверхности. В послеполуденные часы из-за интенсивного вертикального перемешивания отношение смеси озона в АПС выравнивается [47, 55], и только за счет притока «естественного» озона отношение смеси у Земли может увеличиваться до 50–70 млрд⁻¹.

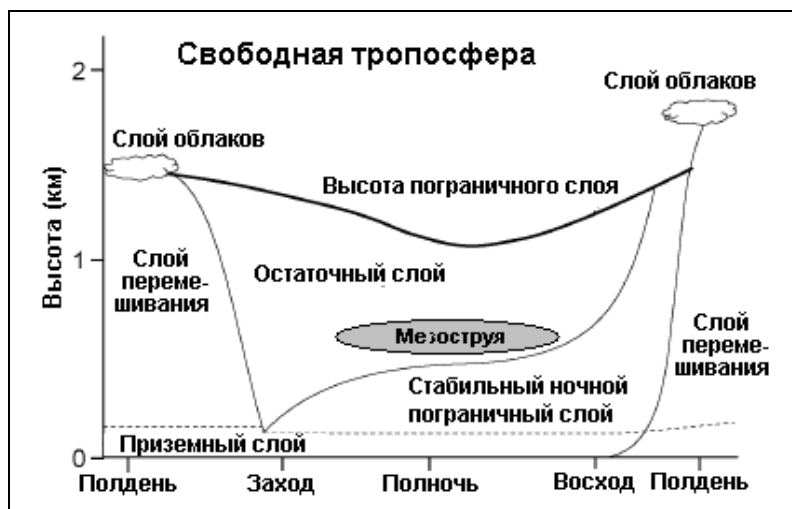


Рис. 4. Суточные изменения пограничного слоя атмосферы [53].

Описанный механизм поступления озона в приземный слой из более высоких слоев за счет суточного хода динамики пограничного слоя атмосферы не может повысить приземное отношение смеси озона выше 70 млрд⁻¹, в то время как при фотохимическом смоге нередко наблюдаются отношения смеси выше 100 млрд⁻¹. Результаты наблюдений показывают, что в смоговых эпизодах повышенные отношения смеси озона имеют место во всем пограничном слое атмосферы [13, 47, 55].

Понимание того, какие процессы могут привести к концентрациям приземного озона более 100 млрд⁻¹, было предугадано Хаагеном – Смитом [40] и обосновано в работах [31, 34]. В них установлено, что при неблагоприятных метеорологических ситуациях и достаточном уровне солнечной радиации озон может быть образован в фотохимических реакциях его предшественников. К последним относятся летучие органические соединения (углеводороды) и оксиды азота (сумма NO

и NO_2) [2, 42, 49]. Углеводороды могут иметь как антропогенное происхождение, так и естественное (в частности, при эмиссиях от деревьев: изопрена от лиственных и терпенов от хвойных [2]); оксиды азота в смоговых ситуациях всегда имеют антропогенное происхождение.

Концентрация озона антропогенного происхождения нелинейно зависит от скорости эмиссий углеводородов и оксидов азота [42, 49, 51]; при дефиците (нехватке) углеводородов, что часто наблюдается в урбанизированной местности, увеличение концентрации оксидов азота приводит к уменьшению уровней озона (рис. 5).

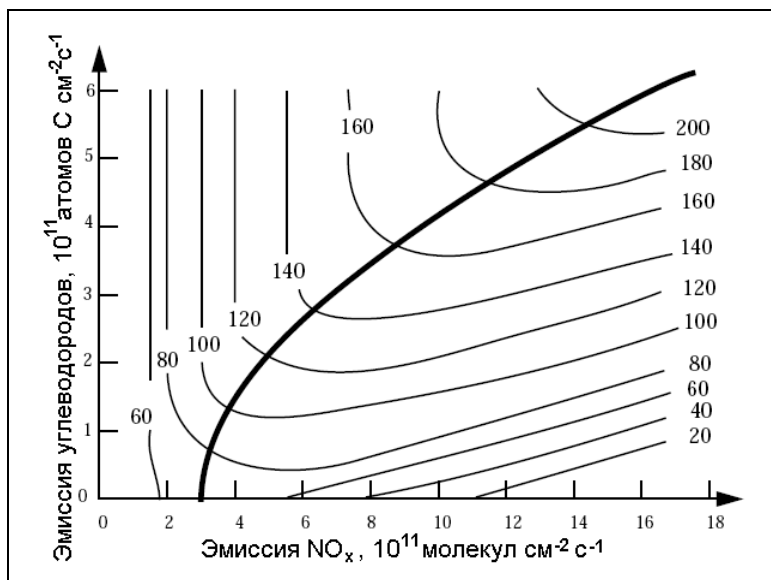


Рис. 5. Модельные значения отношения смеси фотохимически образованного озона (млрд^{-1}) в зависимости от скоростей эмиссии оксидов азота и углеводородов [51].

Мониторинг приземного озона в настоящее время осуществляется в Европе на нескольких тысячах станций, вовлеченных в международные, национальные и местные программы наблюдений. Первые описанные в литературе измерения приземного озона в СССР были проведены в 1930-х гг., однако его систематические исследования начались лишь в 1950-е гг. в Московском регионе [4]. Эти исследования позволили оценить уровни приземного озона в регионе, установить особенности суточного хода озона в зависимости от высоты (до 500 м на Останкинской телебашне), показать связи уровней озона с метеорологическими условиями [5]. Регулярные измерения концентрации приземного озона были начаты почти одновременно в конце 1980-х — начале 1990-х гг. в предгорьях Северного Кавказа [12], в Томске [1], на

Кольском полуострове [3, 9], в Москве и ее окрестностях [10, 21]. С 2002 г. в Московском регионе начала создаваться сеть автоматизированных наблюдений ГПУ «Мосэкомониторинг», сегодня озон контролируют более чем на 10 станциях [8]. Регулярные наблюдения озона проводятся в нашей стране в некоторых биосферных заповедниках России (в т. ч. в Крыму [23, 25]), а также в городах Санкт-Петербург, Сочи, Обнинск и др.).

Благодаря систематическим наблюдениям в Московском регионе а) были установлены основные закономерности сезонных и внутрисуточных вариаций озона в приземном воздухе [8, 10, 14, 21, 26]; б) исследована пространственная изменчивость озона регионального и синоптического масштаба [19, 20]; в) проведены сравнения режима озона в Московском мегаполисе и в зарубежных европейских городах [16, 18].

Первые эпизоды с повышенными концентрациями озона ($>160 \text{ мкг}\cdot\text{м}^{-3}$) были зарегистрированы в конце 1990-х гг. [21]. Особое внимание привлекли экстремальные эпизоды озонового загрязнения в периоды массовых лесных и торфяных пожаров летом 2002 и 2010 гг., когда в Москве концентрации озона достигли $360 \text{ мкг}\cdot\text{м}^{-3}$, а в ее окрестностях (г. Зеленоград) – почти $500 \text{ мкг}\cdot\text{м}^{-3}$ [11, 15, 18]. Озоновые эпизоды 2002 и 2010 гг., согласно принятым ВОЗ статистическим показателям, могли вызвать многочисленные случаи (до нескольких сотен) преждевременной смертности [16, 50].

Озоновые эпизоды с высокими ПКО – явление редкое; в жилых районах Московского мегаполиса их повторяемость не превышает 1–2 %, но с мая по август они фиксируются практически каждый год, в частности, в 2014 г. наблюдалось четыре случая превышения ГН, в 2015 г. – два, в 2016 г. – четыре. Заметим при этом, что только в 2016 г. в Московском регионе количество календарный дней с превышением критерия ВОЗ (наибольшая за сутки усредненная за 8 часов ПКО более $100 \text{ мкг}\cdot\text{м}^{-3}$) было 30.

Редкие озоновые эпизоды зарегистрированы и на черноморском побережье Крыма [23, 25]. Одним из самых ярких последних событий повышения озона в приземном воздухе до $160\text{--}193 \text{ мкг}\cdot\text{м}^{-3}$ на ст. Карадаг (примерно в 1 км от берега) был продолжительный озоновый эпизод 29 августа – 3 сентября 2011 года. Аномально высокий уровень озона в приземном воздухе фиксировался при поступлении воздуха из районов прикаспийских газовых и нефтяных разработок в период продолжительной аномально жаркой погоды на юге России. Дальний перенос озона и его предшественников в шлейфах углеводородов является, по-видимому, главным фактором резкого увеличения озона в районах с незначительным количеством источников антропогенного загрязнения. Заметим, что на Кисловодской высокогорной научной

станции (около 2 км н.у.м.) неоднократно фиксировалось резкое повышение озона при поступлении воздушных масс, прошедших над бассейном Каспийского моря [25].

По нашим исследованиям озоновых эпизодов в Московском регионе, наиболее высокие ПКО фиксируются не в центре мегаполиса, а в пригородах – на территориях распространения шлейфов загрязненного в столице воздуха. Так, самые высокие концентрации озона были зафиксированы в 50 км от Москвы в Зеленограде (в августе 2010 г.), в 100 км от Москвы в Обнинске наиболее высокие уровни ПКО наблюдались при поступлении воздуха, содержавшего эмиссии загрязняющих веществ из Москвы [22].

Изучение наблюдавшихся озоновых эпизодов в Московском регионе дало толчок для разработки способов прогнозирования озона в приземном воздухе. По наблюдениям на российских и зарубежных станциях в периоды отсутствия масштабных природных пожаров установлено, что необходимым, но не достаточным условием возникновения озоновых эпизодов является застой воздушной массы, жаркая и сухая погода, температура приземного воздуха более 27 °С, что проиллюстрировано на рис. 6. В Центральной аэрологической обсерватории совместно с Гидрометцентром России и Главной геофизической обсерваторией им. А.И. Воейкова был разработан статистический метод краткосрочного прогноза максимальной концентраций приземного озона [17, 27], в 2007 году метод прогноза одобрен ЦМКП Росгидромета.

Современный уровень прогнозирования загрязнения воздуха, в т. ч. озоном, определяют химические транспортные модели (ХТМ); этот численный инструмент после должной верификации позволяет получить объективные расчеты, в т. ч. для территорий, где наблюдения за озоном не проводятся, что особо важно, учитывая размеры территорий, могущих оказаться в шлейфах активной генерации озона. Близкие к экологической катастрофе события лета 2010 г. на ЕТР – масштабное пирогенное загрязнение атмосферы на территориях с высокой плотностью населения – стимулировали активные разработки по адаптации химических транспортных моделей к условиям России с усвоением данных спутниковых наблюдений за очагами горения [44]. В настоящее время в Гидрометцентре России созданы технологии расчетов воздушных загрязнений, в т. ч. приземного озона, основанные на ХТМ CHIMERE [26] и COSMO-Ru7-ART [6]. На сайте Гидрометцентра России (<http://www.meteoinfo.ru/>) в экспериментальном статусе ежедневно представляются расчеты ПКО для центральных областей европейской части России, одновременно разрабатываются методы постобработки модельных расчетов концентраций озона на фоновых и городских территориях. Численные расчеты восстановленных и прогностических полей концентрации приземного озона могут и должны использоваться

для своевременного реагирования на возможность появления озона в высоких и опасных для здоровья концентрациях, на основе которых составляется предупреждение о наступлении экологически неблагоприятных условий.

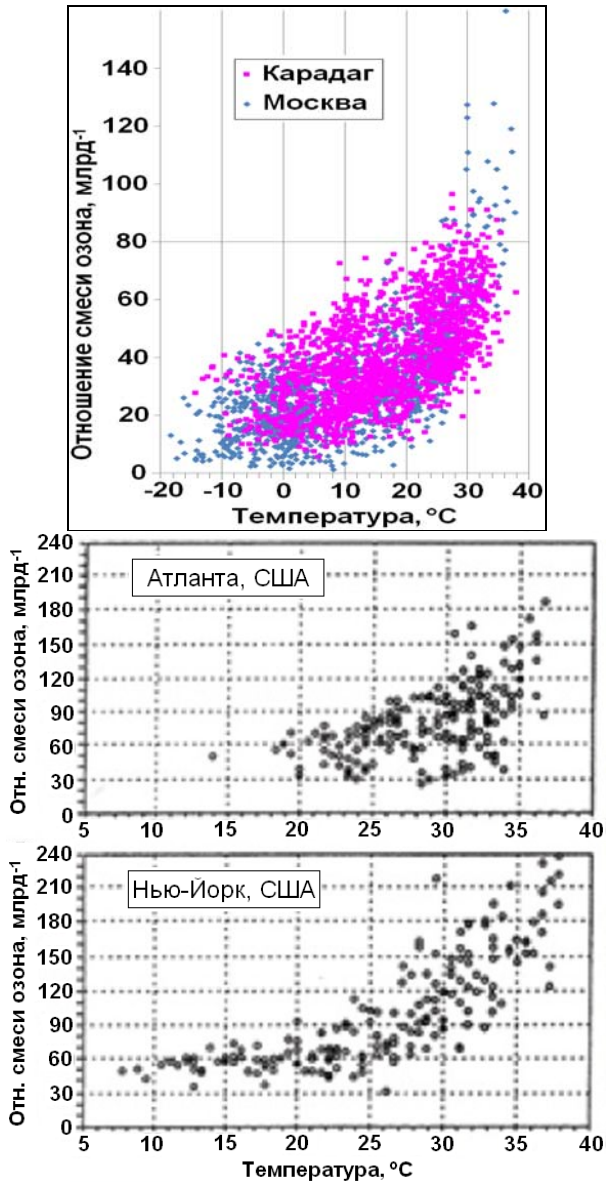


Рис. 6. Поле рассеяния максимального суточного отношения смеси озона в зависимости от максимальной суточной температуры в Москве и в Крыму (сверху), в двух мегаполисах США (снизу).

Можно предполагать, опираясь на результаты измерений приземного озона на Кольском п-ове [9], что в северных (арктических) регионах из-за климатических особенностей (низкие температуры, малые потоки ультрафиолета) проблема повышенных концентраций озона не возникает. Вместе с тем проведенные нами сравнения режима озона на черноморском побережье и прибрежных станциях Балканского п-ва [25] дают основание утверждать, что озоновые эпизоды с опасными для здоровья и растительности уровнями могут формироваться не только в приморских зонах массового отдыха, но и, по-видимому, в густонаселенных южных регионах нашей страны. Начатые НПО «Тайфун» в Сочи автоматизированные измерения озона имеют большую практическую ценность, но с учетом высокой неоднородности поля приземного озона в предгорьях, формируемой под воздействием микроклиматических, орографических и др. факторов, редкие локальные измерения ПКО имеют ограниченную информативность. В отсутствии регулярных наблюдений можно предполагать, что в зоне риска возникновения опасных озоновых эпизодов находятся, очевидно, Поволжье и Южный Урал, промышленный Юг Сибири и Дальнего Востока, где единичные случаи высоких уровней озона фиксировались в маршрутных измерениях TROICA (ИФА РАН). Все это указывает на необходимость организации регулярных наблюдений за приземным озоном.

В заключение важно отметить, что будущие изменения уровня приземного озона являются предметом современной дискуссии среди исследователей озона [30, 32, 33, 43, 45, 57], связанной с вероятным увеличением концентраций озона и его влиянием на урожайность из-за изменений климата и объема эмиссий предшественников озона [28, 32]. Определение долговременных тенденций изменений приземного озона осложняется его высокой изменчивостью на разных временных масштабах и сравнительно высокими погрешностями его измерений (в США – до 1970-х гг., в Европе – до 1990-х гг.). На большинстве станций мира, в т. ч. в Западной Европе [57], концентрация приземного озона увеличивается, а, например, в США наблюдается пестрое распределение знака трендов [33]: при положительных трендах на западе США, в восточных штатах страны преобладают отрицательные тренды, что, предположительно, является следствием мероприятий, направленных на ограничение вредных выбросов [42].

Заключение

Большая часть изменчивости озона в приземном воздухе определяется притоком озона из верхних слоев тропосферы, имеет естественное происхождение и находится в диапазоне безопасных уровней. Аномальное повышение содержания озона и образование озоновых эпизодов, представляющих угрозу здоровью населения, связано

с антропогенными факторами. Озоновые эпизоды с превышением отечественных гигиенических нормативов в последние годы наблюдались на черноморском побережье, в Москве и Томске, на юге Дальнего Востока в периоды аномально жаркой и сухой погоды при распространении пирогенных загрязнений, шлейфов углеводородов из районов нефтяной и газовой добычи, а также в устойчивые периоды неблагоприятных для рассеивания загрязняющих веществ условий. Гораздо чаще, чем озоновые эпизоды, наблюдаются ситуации с нарушением нормативов ВОЗ – превышением $100 \text{ мкг} \cdot \text{м}^{-3}$ – максимальной за сутки средней за 8 ч концентрации приземного озона. Все это, как и важность исследований влияния озона на продуктивность лесов и урожайность сельскохозяйственных культур, а также контроля долговременных изменений в густонаселенных районах, подтверждает актуальность и необходимость регулярного мониторинга приземного озона в нашей стране.

Важным элементом мониторинга озона в приземном воздухе являются расчетные методы. Верифицированные прогностические данные химической транспортной модели в совокупности с данными наблюдений могут стать основой для своевременного информирования населения об образовании и временной динамике высоких уровней озона для защиты от его негативного воздействия.

Поступила в редакцию 15.06.2017 г.

Список использованных источников

1. Белан Б.Д. Проблема тропосферного озона и некоторые результаты его измерений // Оптика атмосферы и океана. 1996. Т. 9, № 9. С. 1184-1213.
2. Белан Б.Д. Озон в тропосфере. Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2010. 525 с.
3. Белоглазов М.И., Васильев А.Н., Ларин В.Ф. и др. Антропогенное влияние на приземный озон в районе Кольского полуострова // Известия РАН. ФАО. 1996. Т. 32, № 1. С. 88-95.
4. Бритаев А.С. Озон в тропосфере // Труды ЦАО. 1965. Вып. 66. С. 19-50.
5. Бритаев А.С., Фарапонова Г.П. Особенности распределения концентрации озона в г. Москве // Атмосферный озон. Л.: Гидрометеиздат, 1987. С. 130-134.
6. Вильфанд Р.М., Кирсанов А.А., Ревокатова А.П. Ривин Г.С., Суркова Г.В. Прогноз перемещения и трансформации загрязняющих веществ в атмосфере с помощью модели COSMO-ART // Метеорология и гидрология. 2017. № 5. С. 31-40.
7. ГН 2.1.6.1338-03. Гигиенические нормативы. Предельно допустимые концентрации (ПДК) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе населенных мест. М.: СТК Аякс, 2003.
8. Горчаков Г.И., Семутникова Е.Г., Зоткин Е.В. Вариации газовых компонент загрязнения в воздушном бассейне г. Москвы // Известия РАН. ФАО. 2006. Т. 42, № 2. С. 176-190.
9. Демин В.И., Звягинцев А.М., Кузнецова И.Н. О действующих в Российской Федерации нормативах по содержанию озона в атмосферном воздухе // Экология человека. 2009. № 01. С. 4-8.
10. Еланский Н.Ф., Локощенко М.А., Беликов И.Б. и др. Закономерности изменчивости концентраций малых газовых составляющих в приземном воздухе г. Москвы // Известия РАН. ФАО. 2007. Т. 43, № 2. С. 219-231.

11. Еланский Н.Ф., Мохов И.И., Беликов И.Б. и др. Газовые примеси в атмосфере над Москвой летом 2010 г. // Известия РАН. ФАО. 2011. Т. 47, № 6. С. 729-738.
12. Еланский Н.Ф., Сенюк И.А. Изменение приземной концентрации озона на Высокогорной научной станции Кисловодск: сезонные и суточные вариации // Изв. АН. ФАО. 1995. Т. 31, № 2. С. 251-259.
13. Звягинцев А.М. Аномалии приземного озона в Европе // Известия РАН. ФАО. 2004. Т. 40, № 3. С. 387-396.
14. Звягинцев А.М. Основные периодичности временного хода приземного озона в Европе // Метеорология и гидрология. 2004. № 10. С. 46-55.
15. Звягинцев А.М., Беликов И.Б., Егоров В.И. и др. Положительные аномалии приземного озона в июле-августе 2002 г. в Москве и ее окрестностях // Известия РАН. ФАО. 2004. Т. 40, № 1. С. 75-86.
16. Звягинцев А.М., Беликов И.Б., Еланский Н.Ф. и др. Изменчивость концентраций приземного озона в Москве и Киеве // Метеорология и гидрология. 2010. № 12. С. 26-35.
17. Звягинцев А.М., Беликов И.Б., Еланский Н.Ф. и др. Статистическое моделирование максимальных суточных концентраций приземного озона // Оптика атмосферы и океана. 2010. Т. 23, № 2. С. 127-135.
18. Звягинцев А.М., Блюм О.Б., Глазкова А.А. и др. Загрязнение воздуха на Европейской части России и в Украине в условиях жаркого лета 2010 года // Известия РАН. ФАО. 2011. Т. 47, № 6. С. 757-766.
19. Звягинцев А.М., Какаджанова Г.М., Крученицкий Г.М. и др. Периодическая изменчивость приземной концентрации озона в западной и центральной Европе по данным наблюдений // Метеорология и гидрология. 2008. № 3. С. 38-47.
20. Звягинцев А.М., Крученицкий Г.М. О пространственно-временных связях приземной концентрации озона в Европе // Известия РАН. ФАО. 1997. Т. 33, № 1. С. 104-113.
21. Звягинцев А.М., Кузнецова И.Н. Изменчивость приземного озона в окрестностях Москвы: результаты десятилетних регулярных наблюдений // Известия РАН. ФАО. 2002. Т. 38, № 4. С. 486-495.
22. Звягинцев А.М., Кузнецова И.Н., Шалыгина И.Ю., Лапченко В.А. Причины и факторы положительных аномалий приземной концентрации озона в Московском регионе и на юго-восточном побережье Крыма // Оптика атмосферы и океана. 2016. Т. 29. С. 493-502.
23. Лапченко В.А., Звягинцев А.М. Малые газовые составляющие атмосферы в Карадагском природном заповеднике в Крыму // Оптика атмосферы и океана. 2015. Т. 28, № 2. С. 178-181.
24. Семенов С.М., Кунина И.М., Кухта Б.А. Тропосферный озон и рост растений в Европе. - М.: МиГ, 1999. 208 с.
25. Шалыгина И.Ю., Кузнецова И.Н., Звягинцев А.М., Лапченко В.А. Приземный озон на побережьях Балканского полуострова и Крыма // Оптика атмосферы и океана. 2017. Т. 30, № 6. С. 515-523.
26. Шалыгина И.Ю., Кузнецова И.Н., Нахаев М.И., Лезина Е.А. Суточный ход загрязняющих воздух веществ по измерениям и расчетам химической транспортной модели // Труды Гидрометцентра России. 2016. Вып. 360. С. 149-167.
27. Шалыгина И.Ю., Кузнецова И.Н., Нахаев М.И., Лезина Е.А., Звягинцев А.М. О прогнозировании приземного озона в большом городе (на примере Москвы) // Оптика атмосферы и океана. 2007. Т. 20, № 7. С.651-658.
28. Ainsworth E.A., Yendrek C.R., Sitch S. et al. The effects of tropospheric ozone on net primary productivity and implications for climate change // Annu. Rev. Plant. Biol. 2012. Vol. 63. P. 637-661.
29. Avnery S., Mauzerall D.L., Liu J. et al. Global crop yield reductions due to surface ozone exposure: 1. Year 2000 crop production losses and economic damage // Atmos. Environ. 2011. Vol. 45. P. 2284-2296.
30. Barnes E.A., Fiore A.M., Horowitz L.W. Detection of trends in surface ozone in the presence of climate variability // J. Geophys. Res. Atmos. 2016. Vol. 121. doi:10.1002/2015JD024397.
31. Chameides W.L., Walker J.G. A photochemical theory for tropospheric ozone // J. Geophys. Res. 1973. Vol. 78, No. 36. P. 8751-8760.

32. Collins W.J., Dervent R.G., Johnson C.E. et al. The European regional ozone distribution and its links with the global scale for the years 1992 and 2015 // Atmos. Environ. 2000. Vol. 34. P. 255-267.
33. Cooper O.R., Parrish D.D., Ziemke J. et al. Global distribution and trends of tropospheric ozone: An observation-based review // Elementa: Science of the Anthropocene. 2014. Vol. 2. P. 1- 28 p. Doi: 10.12952/journal.elementa.000029.
34. Crutzen P.J. A discussion of the chemistry of some minor constituents in the stratosphere and troposphere // Pure Appl. Geophys. 1973. Vol. 106. P. 1385-1399.
35. 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.
36. EPA, 2015. National Ambient Air Quality Standards (NAAQS) for Ozone.
37. Fiala J., Cernikovskiy L., de Leeuw F. et al. Air pollution by ozone in Europe in summer 2003 // Topic report 3/2003, Copenhagen: European Environment Agency. 2003. 33 p.
38. Filleul L., Cassadou S., Médina S. et al. The relation between temperature, ozone and mortality in nine French cities during the heat wave of 2003 // Environ. Health Perspect. – 2006. Vol. 114, No. 9. P. 1344-1347.
39. Galbally I.E., Schultz M.G. et al. Guidelines for continuous measurements of ozone in the troposphere // WMO/GAW Report No. 209. Geneva: WMO, 2013. 76 p.
40. Haagen-Smit A.J. Chemistry and physiology of Los Angeles smog // Ind. Eng. Chem. Res. 1952. Vol. 44. P. 1342-1346.
41. Harmens H., Mills G., Hayes F. et al. Air Pollution and Vegetation // ICP Vegetation Annual Report 2015/2016. – 35 p.
42. Jacob D.J. Introduction to Atmospheric Chemistry. Princeton. NJ: University Press, 1999. 266 p.
43. Katragkou E., Zanis P., Tsikerdekis A. et al. Evaluation of near surface ozone over Europe from the MACC reanalysis // Geosci. Model Dev. 2015. Vol. 8. P. 2299-2314.
44. Kononov I.B., Beekmann M., Kuznetsova I.N. et al. Atmospheric impacts of the 2010 Russian wildfires: integrating modelling and measurements of an extreme air pollution episode in the Moscow region // Atmos. Chem. Phys. 2011. Vol. 11, No. 19. P. 10031-10056.
45. Lin M., Horowitz L.W., Payton R. et al. US surface ozone trends and extremes from 1980 to 2014: quantifying the roles of rising Asian emissions, domestic controls, wildfires, and climate // Atmos. Chem. Phys. 2017. Vol. 17. P. 2943-2970.
46. Malley C.S., Heal M.R., Mills G. et al. Trends and drivers of ozone human health and vegetation impact metrics from UK EMEP supersite measurements (1990–2013) // Atmos. Chem. Phys. 2015. Vol.15. P. 4025-4042.
47. Morris G.A., Ford B., Rappenglueck B. et al. An evaluation of the interaction of morning residual layer and afternoon mixed layer ozone in Houston using ozonesonde data // Atmos. Environ. 2010. Vol. 44. P. 4024-4034.
48. Scheel H.E., Sladkovic R., Brunke E.G. et al. Measurements of lower tropospheric ozone at mid-latitudes of the Northern and Southern Hemisphere. Ozone in the Troposphere and Stratosphere Part 1 // NASA Conf. Publ. 1994. P. 11-14.
49. Seinfeld J.H., Pandis S.N. Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change. New York: John Wiley & Sons, Inc, 2006. 1225 p.
50. Shaposhnikov D., Revich B., Belandier T. et al. Long-term impact of moscow heat wave and wildfires on mortality // Epidemiology. 2015. Vol. 26, No. 2. P. 421-422.
51. Sillman S., Logan J.A., Wofsy S.C. The sensitivity of ozone to nitrogen oxides and hydrocarbons in regional ozone episodes // J. Geophys. Res. 1990. Vol. 95, No. D2. P. 1837-1851.
52. Stedman J.R., Kent A.J. An analysis of the spatial patterns of human health related surface ozone metrics across the UK in 1995, 2003 and 2005 // Atmos. Environ. 2008. Vol. 42, No. 8. P. 1702-1716.
53. Stull R.B. An introduction to boundary layer meteorology. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1988. 670 p.

54. *Tarasova O.A., Brenninkmeijer C.A.M., Joeckel P. et al.* A climatology of surface ozone in the extra tropics: cluster analysis of observations and model results // *Atmos. Chem. Phys.* 2007. Vol. 7, No. 24. P. 6099-6117.

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

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

57. *Wilson R.C., Fleming Z.L., Monks P.S. et al.* Have primary emission reduction measures reduced ozone across Europe? An analysis of European rural background ozone trends 1996–2005 // *Atmos. Chem. Phys.* 2012. Vol. 12. P. 437–454.

SUMMARIES

Investigation and monitoring of surface ozone in Russia / Zvyagintsev A.M., Kuznetsova I.N., Shalygina I.Yu., Lezina E.A., Lapchenko V.A., Nikiforova M.P., Demin V.I. // *Proceedings of the Hydrometcentre of Russia.* 2017. Vol. 365. P. 56-70.

A brief review of observations of surface ozone is presented; the mechanisms of forming surface ozone origination are described. The history of observations of surface ozone in Russia, the main results of domestic studies, including the developed methods of forecasting, are depicted. Significant attention is given to episodes of high ozone concentrations caused by pyrogenic pollution, long-range transport from hydrocarbon production areas and adverse meteorological conditions for dispersal of impurities during periods of abnormally hot and dry weather. Ozone episodes exceeding the national hygiene standards in recent years have been observed on the Black Sea coast, in Moscow and Tomsk, in the south of the Far East, which emphasizes the urgency and need for the development of the domestic network of regular observations of ground-level ozone. One of the directions of monitoring development is the use of computation methods, including the calculation of ozone using chemical transport models.

Keywords: surface ozone, monitoring, ozone episode, chemical transport model.