

УДК 551.510.42

Причины и факторы положительных аномалий приземной концентрации озона в Московском регионе и на юго-восточном побережье Крыма

А.М. Звягинцев¹, И.Н. Кузнецова², И.Ю. Шалыгина², В.А. Лапченко³,
Н.Е. Брусова², А.А. Архангельская², Н.В. Терёб⁴, Е.А. Лезина^{5*}

¹Центральная аэрологическая обсерватория
141700, г. Долгопрудный, ул. Первомайская, 3

²Гидрометцентр России
123242, г. Москва, Б. Предтеченский пер., 11–13

³Карадагская научная станция им. Т.И. Вяземского – природный заповедник РАН
298188, г. Феодосия, пгт. Курортное, ул. Науки, 24

⁴НПО «Тайфун»
249038, Калужская область, г. Обнинск, ул. Победы, 4

⁵Мосэкомониторинг
123242, г. Москва, Новый Арбат, д. 11, стр. 1

Поступила в редакцию 20.01.2016 г.

Обсуждаются источники озона и факторы, влияющие на образование аномальных концентраций приземного озона. На примере зарубежных наблюдений, данных измерений приземного озона в Москве, в ближних ее пригородах и на удаленной от мегаполиса территории, а также на побережье Черного моря иллюстрируются связи повышенных концентраций приземного озона с температурой воздуха, скоростью переноса в атмосферном пограничном слое, показана зависимость от адвекции озона и его предшественников. Изучение факторов образования озоновых эпизодов и причин пониженных концентраций озона при благоприятных для фотохимической наработки метеорологических условиях является основой для интерпретации и коррекции модельных прогнозов озона.

Ключевые слова: озон, озоновый эпизод, метеорологические факторы, адвекция загрязнений, мегаполис, пригород, прогноз озона; ozone, ozone episode, meteorological factors, advection of pollutions, megapolis, suburb, forecast ozone.

Введение

Всемирная организация здравоохранения (ВОЗ) выделила для Европы пять компонентов состава воздуха, которые необходимо контролировать для определения его качества: взвешенные частицы (прежде всего, PM_{10} и $PM_{2,5}$), оксиды азота ($NO_x = NO + NO_2$), монооксид углерода (CO), диоксид серы (SO_2) и озон (O_3) [1]. Предельно допустимые концентрации этих веществ рекомендованы ВОЗ [1] и устанавливаются в различных странах нормативными документами [2, 3].

Согласно наблюдениям неудовлетворительное качество воздуха наиболее часто связано с превы-

шением гигиенических нормативов концентраций взвешенных частиц и озона [4], причем в будущем для озона ожидается только ухудшение ситуации в связи с прогнозируемыми климатическими изменениями [5–7]. Превышения критических уровней для взвешенных частиц и озона пагубно сказываются на здоровье, приводя к заболеваниям органов дыхания и приступам астмы, являются причиной преждевременной смертности населения [1]. Настоящая статья посвящена выявлению причин и факторов, способствующих образованию повышенных приземных концентраций озона (ПКО) в Московском регионе и в Карадагском природном заповеднике, расположенном рядом с курортными зонами на юго-восточном побережье Крыма.

Из вышеперечисленных загрязнителей лишь озон является естественной составляющей атмосферы, остальные загрязнители имеют главным образом антропогенное происхождение. Основная масса озона образуется в верхней стратосфере на высотах 30–50 км и распространяется оттуда по всей атмосфере. Максимальное отношение смеси озона (около 10 млн^{-1}) наблюдается на высоте ~35 км [8]. Поток

* Анатолий Михайлович Звягинцев (zvyagintsev45@yandex.ru); Ирина Николаевна Кузнецова (muza@mecom.ru); Ирина Юрьевна Шалыгина (shalygina@mecom.ru); Владимир Александрович Лапченко; Наталья Евгеньевна Брусова (nbrusova@list.ru); Анастасия Александровна Архангельская; Николай Васильевич Терёб (tereb@graturhoop.ru); Елена Александровна Лезина (LezinaEA@eco.mos.ru).

озона направлен в сторону уменьшения его отношения смеси, из стратосферы в тропосферу. В тропосфере кроме химического и фотохимического разрушения озона дополнительно происходит его фотохимическое образование, при этом согласно модельным расчетам поток озона из стратосферы в тропосферу в несколько раз превышает алгебраическую сумму его образования и разрушения в тропосфере [9]. На уровне тропопаузы отношение смеси озона составляет около 100 млрд^{-1} и по мере приближения к земной поверхности продолжает уменьшаться, составляя на высоте около 1,5 км над ур. м. в умеренных и высоких широтах обычно $40\text{--}60 \text{ млрд}^{-1}$ [10–12]. Отношение смеси озона вблизи верхней границы атмосферного пограничного слоя (АПС) практически постоянно в течение суток и слабо меняется в течение года.

В холодный сезон в умеренных и высоких широтах АПС почти всегда термически устойчив, вертикальное перемешивание затруднено, и в приземном слое отношение смеси озона в течение суток обычно в несколько раз меньше, чем на верхней границе АПС. В теплый сезон АПС претерпевает значительные внутрисуточные изменения: ночью, как правило, здесь преобладает термическая устойчивость, днем, благодаря интенсивному прогреву подстилающей поверхности, возникает термическая неустойчивость. В часы максимального прогрева верхняя граница АПС и, соответственно, высота слоя перемешивания достигает 1,5–2,5 км [13, 14]. Поэтому отношение смеси приземного озона вследствие интенсивного вертикального обмена внутри АПС может возрастать до величин, характерных для нижней части свободной тропосферы, что соответствует приземной концентрации $80\text{--}120 \text{ мкг} \cdot \text{м}^{-3}$. Следовательно, концентрации приземного озона меньше $120 \text{ мкг} \cdot \text{м}^{-3}$ можно рассматривать как «естественные», т.е. природного происхождения.

Вместе с тем на большинстве станций озонового мониторинга фиксируются и более высокие концентрации приземного озона, возникающие вследствие образования озона в тропосфере в фотохимических реакциях с участием антропогенных загрязнителей атмосферы [15]. Далее ситуации, в которых концентрация озона в приземном слое приближается к максимальной разовой предельно допустимой концентрации (ПДК_{м.р.}) $160 \text{ мкг} \cdot \text{м}^{-3}$ [2] или превышает ее, будем называть «озоновый эпизод» (в соответствии с англоязычной зарубежной литературой).

Фотохимическая генерация озона в тропосфере происходит под действием ультрафиолетового облучения (с длиной волны $\lambda < 400 \text{ нм}$) в присутствии так называемых предшественников озона: оксидов азота и летучих органических соединений (ЛОС), представляющих обычно неметановые углеводороды, а также метана и монооксида углерода [15–19]. Оксиды азота NO_x в фотохимических реакциях образования озона выступают как катализаторы, т.е. практически не расходуются; их концентрации в населенных местностях, благодаря выбросам автотранспорта, ТЭЦ и др., практически всегда

достаточны для того, чтобы обеспечить генерацию озона. Скорость генерации озона имеет сложную, нелинейную и даже немонотонную зависимость от концентраций предшественников [17, 18, 20]. В случае постоянства малых концентраций ЛОС при увеличении концентрации NO_x скорость генерации озона может даже уменьшаться, однако при постоянной концентрации NO_x и увеличении концентрации ЛОС она практически всегда увеличивается.

Летучие органические соединения могут быть как антропогенного, так и естественного происхождения. К последним относятся в первую очередь изопрен и терпены – продукты выделения листовыми и хвойными деревьями соответственно [15]. Предшественники озона могут быть как местными [21, 22], так и доставленными за счет переноса на расстояния сотен и тысячи километров [23–26]. На тысячи километров могут переноситься и высокие концентрации озона [27]. Другими необходимыми факторами эффективного фотохимического образования озона являются достаточный уровень солнечной радиации (в умеренных широтах в теплый сезон такой уровень достигается) и «благоприятный» химический состав загрязненной атмосферы (значительная часть антропогенных выбросов приводит к разрушению озона), в частности, генерация озона окажется наиболее эффективной, если эмиссия ЛОС в несколько раз превышает эмиссию оксидов азота [24]. Константы скоростей химических и фотохимических реакций в диапазоне температур $20\text{--}35 \text{ }^\circ\text{C}$ изменяются мало [18], так что на эффективность генерации озона это влияние практически не оказывает.

Озоновые эпизоды в приземном слое могут быть и естественного происхождения, в частности, они могут возникать как результат глубоких стратосферных вторжений [28]. Авторы [29] показали, что над западными штатами США в период с апреля по июнь могут наблюдаться более десятка таких вторжений, которые хорошо идентифицируемы по поведению динамической тропопаузы и при которых отношение смеси приземного озона увеличивается на $20\text{--}40 \text{ млрд}^{-1}$. Озоновые эпизоды наблюдаются и при глубоких стратосферных вторжениях, сопровождающих тайфуны [30, 31].

Особым случаем интенсивной фотохимической генерации озона до очень высоких уровней (100 млрд^{-1} и выше) в зимне-весенний период при температурах около $0 \text{ }^\circ\text{C}$ и ниже являются обнаруженные в последние годы эпизоды в районе р. Уинта вблизи нефтегазовых месторождений в высокогорной местности в американских штатах Юта и Вайоминг [32–35]; больше нигде в мире эпизоды при столь низких температурах не наблюдаются.

На побережье морей и океанов в районах, где практически отсутствуют местные выбросы предшественников, высокие концентрации озона могут образовываться за счет бриза, который переносит такие предшественники и образованный во время переноса озон из континентальных районов к побережью [36–38].

Связи озона с метеорологическими характеристиками и синоптическими условиями

Известно, что одним из главных факторов, влияющих на уровни приземного озона, является приземная температура [39–41]. Высокая температура воздуха приводит к резкому увеличению в воздухе концентраций ЛОС, достаточных для интенсивной фотохимической генерации озона [42–44]. Так, например, авторами [45] показано, что концентрации изопрена и терпенов на юге ФРГ при увеличении температуры с 20 до 25 °С возрастают почти на порядок.

На рис. 1 показаны связи максимальной суточной усредненной за 1 ч концентрации озона $C_{3\max}$ и максимальной за сутки температуры T_{\max} (Москва и Лондон – мегаполисы, Вальдхоф – сельская станция в ФРГ, Карадаг – Крымское побережье Черного моря) по данным наблюдений в различных регионах. Несмотря на связь в виде «облака рассеяния», очевидная схожесть зависимости $C_{3\max}(T_{\max})$ в столь различных пунктах наблюдений указывает на наличие объективных причин появления высоких концентраций озона, т.е. возникновения озоновых эпизодов. Из рис. 1 видно, что эпизоды во всех этих пунктах возникают при температуре выше некоторой пороговой величины, что зависимость $C_{3\max}(T_{\max})$ нелинейна, и, следова-

тельно, $C_{3\max}$ определяется T_{\max} в сочетании с другими решающими факторами.

Установлено, что образование озоновых эпизодов в Московском регионе неразрывно связано с аномальными погодными условиями – длительным периодом жаркой и сухой погоды (при температуре воздуха выше 26 °С и влажности меньше 50%) в малоподвижных барических образованиях [46, 47]. Такие атмосферные процессы наблюдаются с мая по август при выносе в умеренные широты субтропического воздуха либо в континентальной воздушной массе при установлении блокирующего антициклона. Именно с последним были связаны наиболее продолжительные и сильные озоновые эпизоды в Московском регионе летом 2002 и 2010 гг., усугубленные воздействием продуктов горения биомассы лесных и торфяных пожаров [46–50]; такие же последствия пожаров наблюдаются и за рубежом [26, 27, 51]. По-видимому, в результате массовых природных пожаров в воздух выделяются значительные количества ЛОС и СО, что способствует образованию более благоприятного соотношения предшественников для интенсивного фотохимического образования озона.

Так, самые высокие уровни приземного озона в Московском регионе наблюдались в период воздействия широкомасштабных пожаров: в 2002 г. концентрации озона превысили ПДК_{м.р} более чем в 1,5 раза, в 2010 г. – в 3 раза [46, 48, 49]. Самые высокие уровни озона в Западной Европе летом

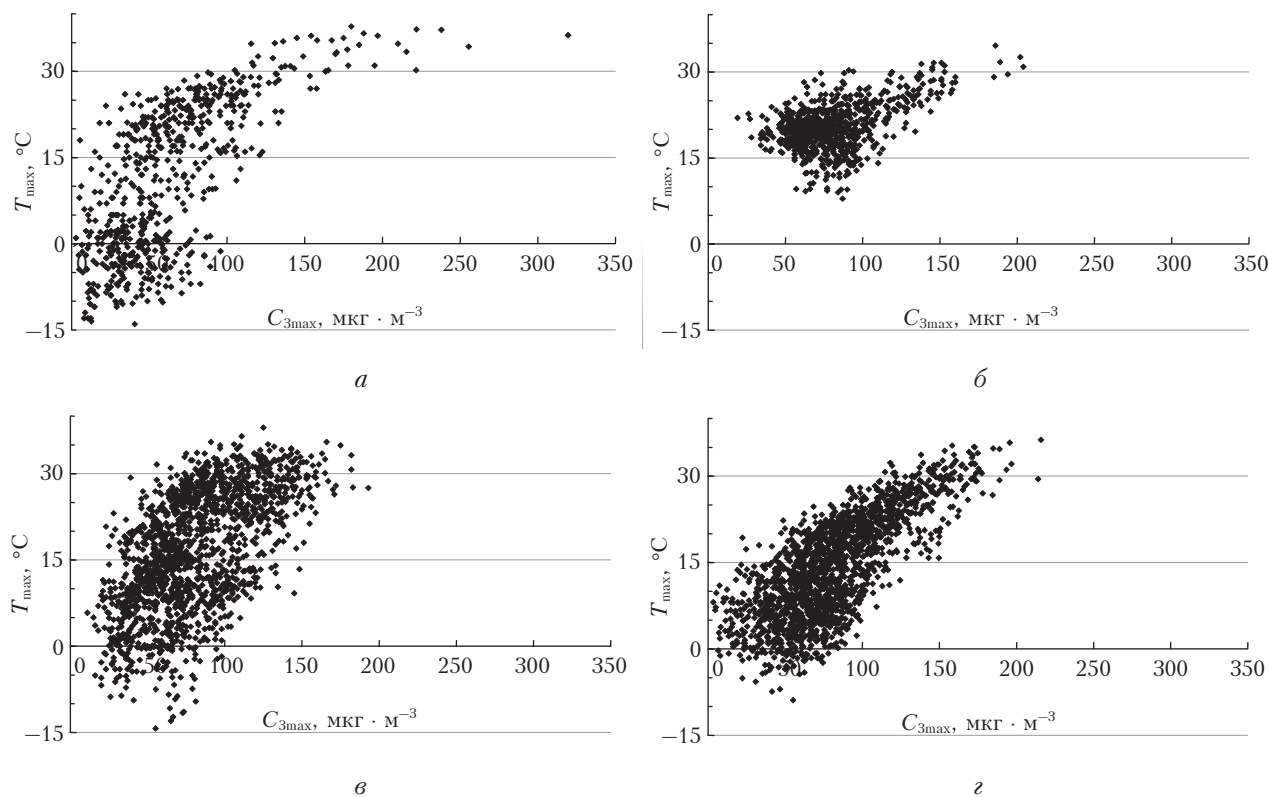


Рис. 1. Связь максимальной концентрации озона и суточного максимума температуры воздуха на городских станциях МГУ, Москва (а) и Северный Кенсингтон-Челси, Лондон (б, только теплый сезон), а также в Карадагском природном заповеднике, Республика Крым (в) и на станции сельского типа Вальдхоф, Германия (г)

2003 г. также сопровождалась крупномасштабными пожарами [52–55]. Согласно установленным оценкам воздействия озона на здоровье [1] эти эпизоды должны были привести к преждевременной смертности многих сотен человек [48, 56–58].

Фактор мобильности воздушной массы, маркером которой может служить скорость переноса в АПС, наравне с температурой воздуха создает предпосылки для повышения концентрации озона в приземном воздухе. Большие скорости (особенно при образовании значительных сдвигов ветра в АПС), с одной стороны, обеспечивают приток воздуха из свободной тропосферы и повышение концентрации приземного озона до $100\text{--}120 \text{ мкг} \cdot \text{м}^{-3}$, а с другой, приводят к рассеянию предшественников озона из АПС в свободную тропосферу и к уменьшению фотохимической генерации озона в АПС. Поэтому озоновые эпизоды наблюдаются только при слабых ветрах при скорости переноса в АПС меньше $5\text{--}6 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$.

Таким образом, главными метеорологическими факторами образования озоновых эпизодов являются высокая температура и затишье; эти связи иллюстрируются на рис. 2, где представлены четыре эпизода по данным наблюдений в ГПУ «Мосэкомониторинг» в 2014 г. (во время этих эпизодов хотя бы на одной из станций концентрации озона превышали ПДК_{м.р.}). Видно, что при температуре $28\text{--}33 \text{ }^\circ\text{C}$ средняя городская ПКО находится в интервале от 100 до $160 \text{ мкг} \cdot \text{м}^{-3}$, при этом максимальные уровни озона наблюдаются при скорости переноса в АПС менее $5 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$.

Существенную роль в формировании эпизода играет направление переноса в АПС, косвенно отражающее происхождение воздушной массы и ее особенности с позиций возможности переноса предшественников озона или наработанных в шлейфе загрязнений озона. Как показано в работе [59], в Московском регионе наибольшие концентрации приземного озона наблюдаются при ветрах из юго-

восточного сектора. На территории с отсутствием локальных значительных антропогенных эмиссий все аномально высокие концентрации приземного озона, т.е. существенно превышающие средние величины, связаны с адвекцией озона и его предшественников. В Московском регионе удаленные от мегаполиса пункты (Обнинск, Звенигород и Зеленоград) служат индикаторами распространения московского шлейфа загрязнений. Показательны и данные мониторинга приземного озона на Черноморском побережье – в Карадагском природном заповеднике. Как показали синоптический и траекторный анализы, наибольшие концентрации приземного озона ($133\text{--}145 \text{ мкг} \cdot \text{м}^{-3}$) по измерениям в 2014–2015 гг. наблюдались при поступлении воздушных масс с материка по периферии антициклона при северо-восточном переносе воздушных масс. На рис. 3 представлен усредненный за месяц суточный ход ПКО и временные изменения в день с «годовым» максимумом ПКО.

На адвективное происхождение высокой для этого региона ПКО указывает не только почти 70%-е превышение сезонной величины суточного максимума (при средней 86 наблюдалось 145), но и форма суточного хода: дневной максимум смещен на 19 ч, а период повышенного ПКО (больше $100 \text{ мкг} \cdot \text{м}^{-3}$) растянут с 13 до 22 ч, т.е. и после захода солнца в воздухе было много озона. Причиной аномального озона мог быть шлейф загрязненного воздуха из района Донбасса; на этот наиболее вероятный пространственный источник эмиссий предшественников указывают результаты анализа и других эпизодов с повышением ПКО в Карадагском природном заповеднике выше $130 \text{ мкг} \cdot \text{м}^{-3}$. Из угледобывающего региона воздух может придти до полуострова Крым за 8–12 ч при средней скорости в АПС $10\text{--}12 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$. Максимальные разовые ПКО в Карадагском природном заповеднике, наблюдаемые в период 2008–2012 гг., выше $200 \text{ мкг} \cdot \text{м}^{-3}$ не поднимались [60].

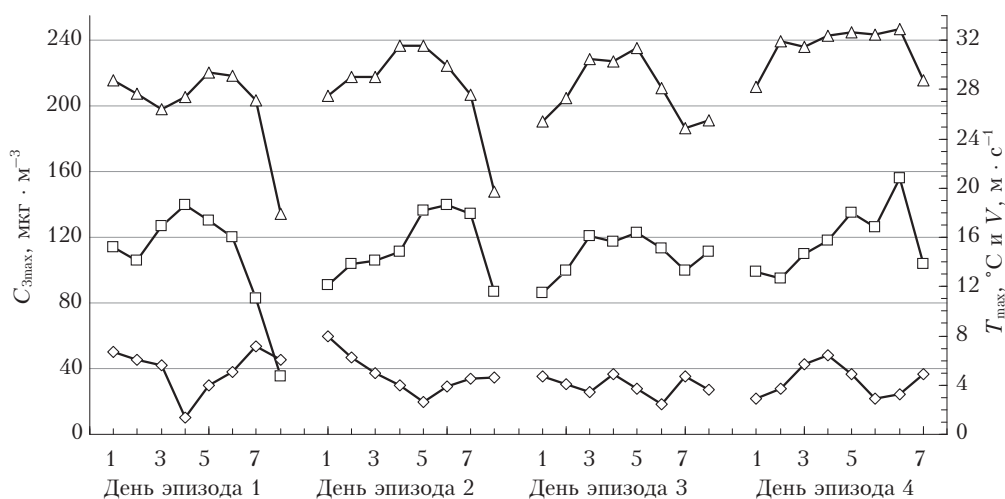


Рис. 2. Максимальная приземная температура (треугольники); максимальная ПКО, усредненная по трем пунктам наблюдений (квадраты); средняя скорость ветра на высоте 503 м (ромбы) в период 10:00–16:00 в Москве в четырех эпизодах 2014 г. (21.05–28.05, 02.06–09.06, 12.07–19.07 и 27.07–03.08)

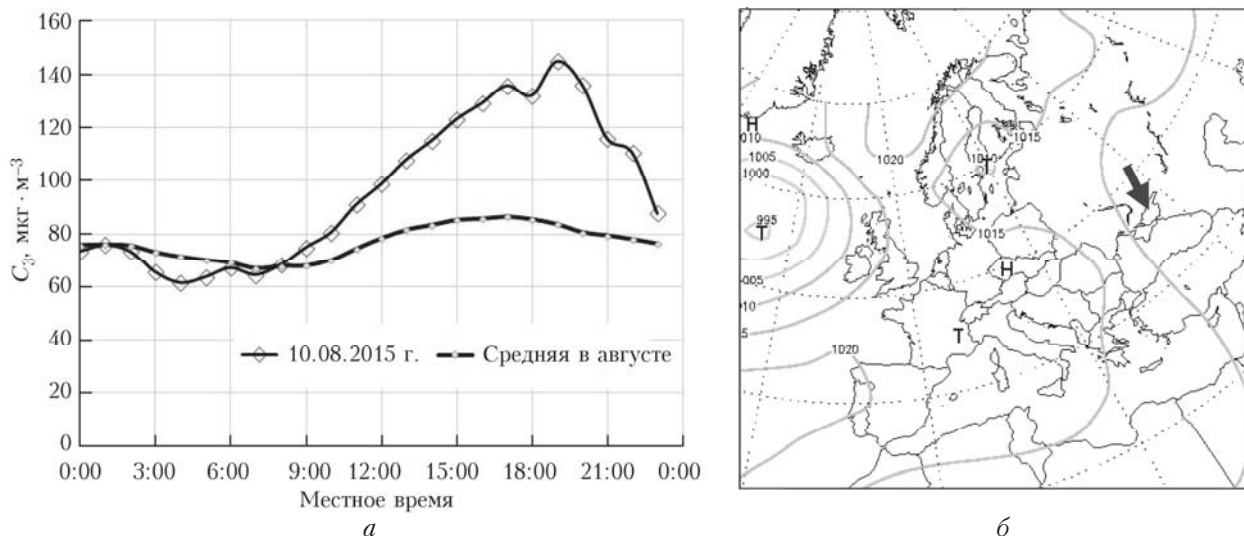


Рис. 3. Суточный ход приземной концентрации озона, усредненный за месяц и 10 августа (а); поле давления на уровне моря (гПа) 10 августа, стрелкой показано направление перемещения воздушной массы (б). Данные за 2015 г.

Озон и аэрозоль

Для предсказания эпизодов с повышением концентраций озона до опасных уровней, обусловленным генерацией озона в городском загрязненном воздухе, важно учитывать все факторы формирования таких эпизодов. Одним из наименее изученных вопросов формирования концентраций озона остается выявление влияния на него аэрозоля.

Аэрозоль ослабляет ультрафиолетовую радиацию, необходимую для фотохимического образования озона, изменяет скорости фотолиза, на его поверхности происходят гетерогенные реакции с участием озона [61, 62], и, наконец, озон сам расходуется в реакциях с ЛОС — продуктами выделения деревьями и растениями, образуя вторичные органические аэрозоли [63, 64]. Очевидно, что влияние на озон сильно зависит от состава аэрозоля, в частности,

минеральный он или органический. Обычно считают, что аэрозоль понижает концентрацию озона до нескольких десятков процентов [61, 65], но в отдельных случаях он может и незначительно повышать ее [62].

По нашим оценкам, в воздушной массе с повышенным содержанием частиц PM_{10} , прошедшей над низовьями Волги и западными областями Казахстана, при высокой температуре воздуха (выше $+28\text{ }^{\circ}\text{C}$) дневная концентрация приземного озона в Москве в начале периода адвекции не достигает критических уровней. Проиллюстрируем это на примере первых дней июня 2014 г., когда в Московском регионе установилась жаркая сухая погода (на рис. 2 этому случаю соответствует эпизод 2). Тридцатиградусная жара в течение 5 дней сопровождалась ослабленным переносом в нижнем слое атмосферы $3\text{--}6\text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ (рис. 4).

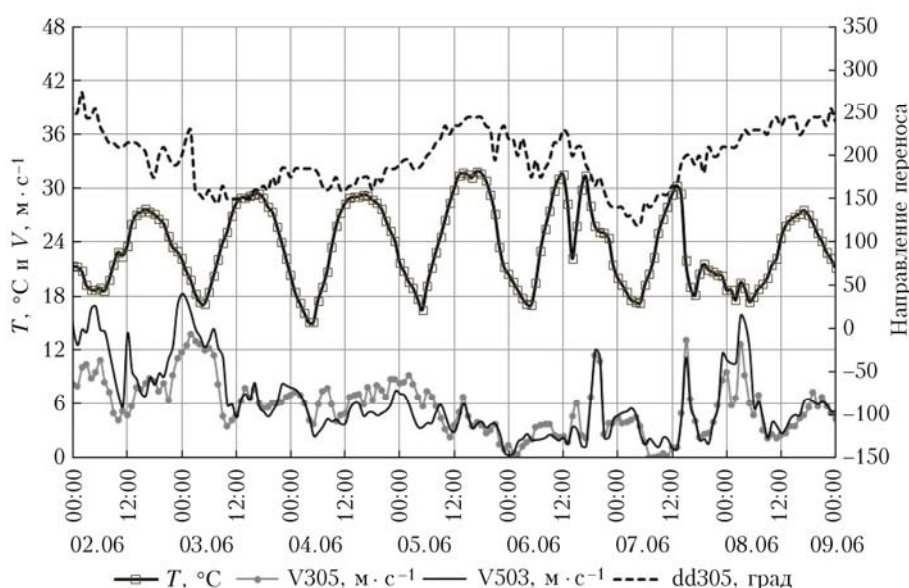


Рис. 4. Приземная температура, скорость и направление переноса в нижнем 500-м слое по данным измерений на телебашне Останкино. 2–8 июня 2014 г.

Однако, несмотря на высокий температурный фон, максимальные суточные величины ПКО оказались ниже характерных для сложившихся метеорологических условий; на большинстве городских станций 3–5 июня при скорости переноса в слое 300–500 м $5\text{--}7\text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ ПКО не превышала $0,1\text{--}0,11\text{ мг}\cdot\text{м}^{-3}$. Только при ослаблении скорости переноса до $1\text{--}3\text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ (в утренние часы) 6 и 7 июня концентрации приземного озона в послеполуденные часы повысились в городе до $0,13\text{--}0,135\text{ мг}\cdot\text{м}^{-3}$ (рис. 5).

Заметим, что на северо-западных пригородных станциях – в зоне распространения городского шлейфа (Звенигород и Зеленоград) – максимальные ПКО были на $0,01\text{--}0,03\text{ мг}\cdot\text{м}^{-3}$ больше, чем на городских станциях. При этом вне области распространения городского шлейфа загрязнений – в Обнинске (около 90 км на юго-западе от Москвы) – во всем эпизоде максимальная ПКО не превышала $0,09\text{ мг}\cdot\text{м}^{-3}$, т.е. уровень приземного озона был ниже, чем на московских станциях (см. рис. 5). В той же воздушной массе с повышенным содержанием PM_{10} ($0,06\text{--}0,08\text{ мг}$) 4 и 5 июня днем при температуре около $+30\text{ }^\circ\text{C}$ ПКО в Обнинске была равна $0,09\text{--}0,1\text{ мг}\cdot\text{м}^{-3}$, в Москве не превысила $0,12\text{ мг}\cdot\text{м}^{-3}$, а в Звенигороде составила $0,135\text{ мг}\cdot\text{м}^{-3}$.

По-видимому, ключевую роль в формировании эпизода сыграло повышенное содержание в воздухе взвешенных частиц. Установление тридцатиградусной жары совпало с резким повышением концентрации PM_{10} в послеполуденные часы днем 2 июня при максимально развитом слое перемешивания, что указывает на адвективное происхождение взвешенных частиц (PM_{10}). Адвекцию (поступление) взвешенных частиц (PM_{10}) из удаленных районов обеспечивал интенсивный перенос воздушных масс

внутри мезоструйного течения нижних уровней, вблизи его оси (на высоте 500–600 м) скорость ветра достигала $12\text{--}18\text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ (см. рис. 4).

Зафиксированные низкие для тридцатиградусной жары ПКО оказались хорошим индикатором прихода воздушной массы с пониженным содержанием природного озона (судя по Обнинску в АПС было не более $0,09\text{ мг}\cdot\text{м}^{-3}$). Аналогичные события с резким уменьшением ПКО наблюдались, к примеру, на Кисловодской высокогорной научной станции, на Средиземноморском побережье при поступлении туда воздушной массы из Северной Африки [65].

Всю ночь 6 июня концентрация PM_{10} при наличии инверсии температуры (величиной до $7\text{--}10\text{ }^\circ\text{C}$) и штиле в АПС удерживалась на уровне $0,08\text{--}0,1\text{ мг}\cdot\text{м}^{-3}$. К полудню этого дня лишь на западе Москвы и в Звенигороде ПКО повысились до $0,135\text{--}0,14\text{ мг}\cdot\text{м}^{-3}$. Западные ветры принесли после полудня кратковременные дожди, которые вызвали резкий спад температуры (на 10° за 1 ч) и уровня PM_{10} . Но уже к 15 ч температура опять поднялась до $+30\text{ }^\circ\text{C}$, концентрация озона возросла до $0,14\text{--}1,58\text{ мг}\cdot\text{м}^{-3}$, благодаря подтоку воздуха из восточного Подмосковья, где дождей не было. В конце эпизода при повышении температуры вновь до $+30\text{ }^\circ\text{C}$ из-за приближения атмосферного фронта ПКО оказались ниже, чем накануне. Атмосферный фронт сопровождался дождями, усилением ветра до $10\text{--}12\text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ и резкими колебаниями ПКО: вечером 7 и ночью 8 июня отмечались скачки концентрации O_3 до $90\text{--}100\text{ мкг}\cdot\text{м}^{-3}$ (Марьино, МГУ, Звенигород, Зеленоград). На рис. 5 видно, что в новой воздушной массе с пониженным содержанием PM_{10} 8 июня при температуре $+26\text{ }^\circ\text{C}$ ПКО превысила уровень озона в дни с тридцатиградусной жарой.

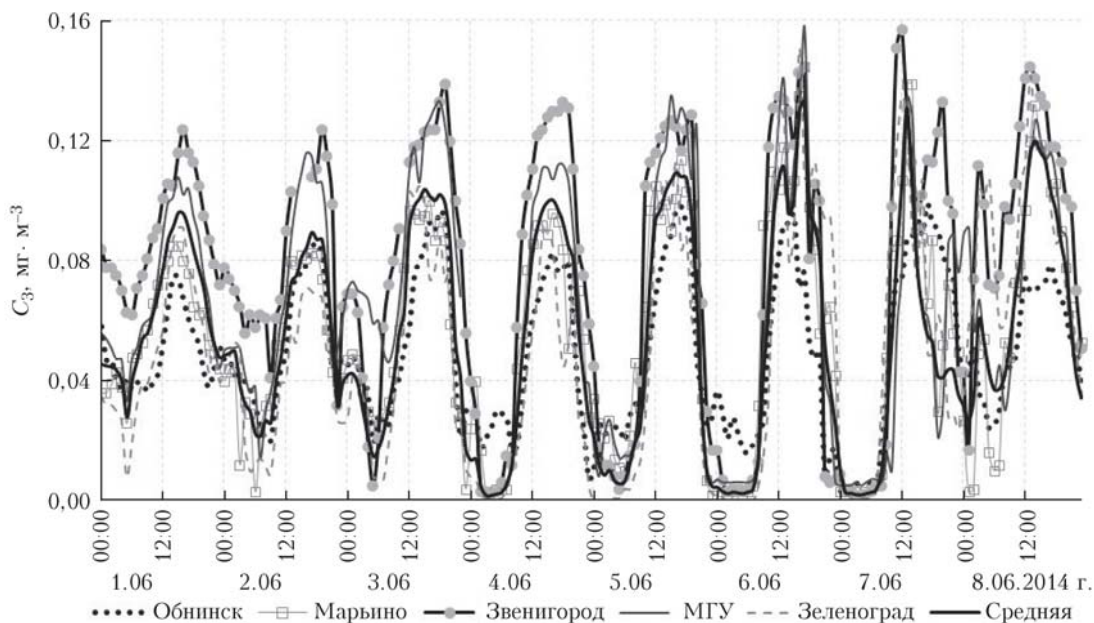


Рис. 5. Приземная концентрация озона в Москве, ближних пригородах и в Обнинске 1–8 июня 2014 г.

Заметим, что во время эпизодов уменьшение отношения смеси озона до уровней, характерных для свободной тропосферы, происходит только над верхней границей АПС [66–69], а максимум отношения смеси озона наблюдается над приземным слоем из-за того, что на подстилающей поверхности происходит сток озона.

О прогнозировании эпизодов высоких концентраций озона

Изучение механизмов и причин образования озоновых эпизодов является важной составляющей мониторинга качества воздуха, в первую очередь для заблаговременного предупреждения о наступлении таких событий. В Гидрометцентре России прогнозирование концентраций загрязнителей атмосферного воздуха, в том числе озона, для центральных областей России сегодня производится в оперативном режиме с использованием химических транспортных моделей (ХТМ) CHIMERE и COSMO-Ru7-ART [70–72]. С использованием данных автоматизированных измерений концентраций загрязнений регулярно проводится верификация модельных расчетов, что позволяет контролировать качество модельных прогнозов и служит основой для разработки инструментов повышения точности численного прогнозирования. Так, по результатам сравнений модельных расчетов с измерениями концентраций озона на станциях Москвы ХТМ CHIMERE/COSMO-RU7 и COSMO-RU7-ART в 2015 г. установлено характерное занижение максимальных и средних за сутки концентраций приземного озона (в среднем на $10 \text{ мкг} \cdot \text{м}^{-3}$) при средней абсолютной ошибке $20\text{--}30 \text{ мкг} \cdot \text{м}^{-3}$.

Результаты расчетов концентрации озона с использованием статистических моделей, позволяющих получать прогнозные значения на основе прогнозов метеопараметров и данных о наблюдаемых уровнях [39, 73], и численных химических транспортных моделей [50, 74–76] пока еще нуждаются в постобработке. Изучение условий образования эпизодов опасных концентраций приземного озона, установление характерных модельных погрешностей как следствия неточности задания эмиссий предшественников, ошибок прогноза метеорологических характеристик и прочего служат основой для интерпретации результатов модельных расчетов.

Заключение

По наблюдениям в Московском регионе (1991–2015 гг.) и на юго-восточном побережье Крыма (2008–2015 гг.) в теплый сезон концентрации приземного озона могут увеличиваться до опасных величин, приближаясь к ПДК и иногда превышая их. Самые высокие уровни загрязнения воздуха озоном в Московском регионе наблюдались в период лесных и торфяных пожаров в регионе в 2002 г. и 2010 г. — более чем в 1,5 и 3 раза выше ПДК_{м.р} соответственно; зафиксированная максимальная концентрация озона на Черноморском побережье Крыма не превысила $200 \text{ мкг} \cdot \text{м}^{-3}$.

Возникновению эпизода озонового загрязнения за счет генерации озона в загрязненном городском воздухе способствуют аномальные для умеренных широт погодные условия: жаркая сухая погода с дневным прогревом воздуха больше 26°C при слабом переносе (до $5 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$) в нижних слоях тропосферы.

В озоновых эпизодах наблюдается высокая неоднородность поля приземного озона в мегаполисе: разность ПКО может достигать $20\text{--}40 \text{ мкг} \cdot \text{м}^{-3}$. Наибольшие концентрации озона фиксируются в подветренных пригородах, куда распространяется шлейф городских загрязнений и формируется оптимальное для интенсивной генерации озона соотношение предшественников.

В регионах с отсутствием значительных локальных источников загрязнения аномально высокие концентрации приземного озона, существенно превышающие средние величины, связаны с адвекцией озона и его предшественников из областей антропогенных эмиссий.

Практическое использование данных модельных расчетов концентраций приземного озона при сегодняшнем качестве численных прогнозов целесообразно с применением методов постобработки, основанных на результатах исследований условий формирования сильного загрязнения воздуха, в том числе озоновых эпизодов.

1. *Air Quality Guidelines: Global Update 2005. Particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide.* WHO: Geneva, 2006. 484 p.
2. *Гигиенические нормативы ГН 2.1.6.1338-03* Предельно допустимые концентрации (ПДК) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе населенных мест.
3. *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* // Off. J. Eur. Union. 152/1. 11.06.08. P. 1–44.
4. *Health and Environment in Europe: Progress Assessment.* WHO Regional Office for Europe: Copenhagen, 2010. 168 p.
5. *Zeng G., Pyle J.A., Young P.J.* Impact of climate change on tropospheric ozone and its global budgets // *Atmos. Chem. Phys.* 2008. V. 8. P. 369–387.
6. *Rachler P.N., Adams P.J.* The response of surface ozone to climate change over the Eastern United States // *Atmos. Chem. Phys.* 2008. V. 8. P. 871–885.
7. *Doherty R.M., Wild O., Shindell D.T., Zeng G., MacKenzie I.A., Collins W.J., Fiore A.M., Stevenson D.S., Dentener F.J., Schultz M.G., Hess P., Derwent R.G., Keating T.J.* Impacts of climate change on surface ozone and intercontinental ozone pollution: A multi-model study // *J. Geophys. Res. D.* 2013. V. 118, N 9. P. 3744–3763.
8. *Перов С.П., Хргиан А.Х.* Современные проблемы атмосферного озона. Л.: Гидрометеиздат, 1980. 288 с.
9. *Wild O.* Modelling the global tropospheric ozone budget: Exploring the variability in current models // *Atmos. Chem. Phys.* 2007. V. 7. P. 2643–2660.
10. *Logan J.A.* An analysis of ozonesonde data for the troposphere: Recommendations for testing 3-D models and development of a gridded climatology for tropospheric ozone // *J. Geophys. Res. D.* 1999. V. 104. P. 16115–16149.

11. Pan L.L., Randel W.J., Gary B.L., Mahoney M.J., Hints E.J. Definitions and sharpness of the extratropical tropopause: A trace gas perspective // *J. Geophys. Res.* 2004. V. 109. P. D23103. DOI: 10.1029/2004JD004982.
12. Fischer H., Lawrence M., Gurk Ch., Hoor P., Lelieveld J., Hegglin M.I., Brunner D., Schiller C. Model simulations and aircraft measurements of vertical, seasonal and latitudinal O₃ and CO distributions over Europe // *Atmos. Chem. Phys.* 2006. V. 6. P. 339–348.
13. Оке Т.Р. Климаты пограничного слоя. Л.: Гидрометеиздат, 1982. 360 с. (Oke T.R. Boundary layer climates. 2nd ed. New York: Routledge, 1987. 460 p.).
14. Stull R.B. An introduction to boundary layer meteorology. 2nd ed. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1999. 666 p.
15. Белан Б.Д. Озон в тропосфере. Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2010. 525 с.
16. Исидоров В.А. Органическая химия атмосферы. СПб.: Химиздат, 2001. 352 с.
17. Jacob D.J. Introduction to Atmospheric Chemistry. Princeton, NJ: University Press, 1999. 266 p.
18. Seinfeld J.H., Pandis S.N. Atmospheric chemistry and physics: From air pollution to climate change. 2nd ed. New York: John Wiley & Sons, Inc., 2006. 1225 p.
19. Stockwell W.R., Lawson C.V., Saunders E., Goliff W.S. A review of tropospheric atmospheric chemistry and gas-phase chemical mechanisms for air quality modeling // *Atmosphere*. 2012. V. 3. P. 1–32. DOI: 10.3390/atmos3010001.
20. Sillman S. The relation between ozone, NO_x and hydrocarbons in urban and polluted rural environments // *Atmos. Environ.* 1999. V. 33, N 12. P. 1821–1845.
21. Haagen-Smit A.J. Chemistry and physiology of Los Angeles smog // *Ind. Eng. Chem. Res.* 1952. V. 44. P. 1342–1346.
22. Zhang R., Lei W., Tie X., Hess P. Industrial emissions cause extreme urban ozone diurnal variability // *Proc. Nat. Acad. Sci.* 2004. V. 101, N 17. P. 6346–6359.
23. Chan C.Y., Chan L.Y. Effect of meteorology and air pollutant transport on ozone episodes at a subtropical coastal Asian city, Hong Kong // *J. Geophys. Res.* D. 2000. V. 105, N 16. P. 20707–20724.
24. Sillman S. Ozone production efficiency and loss of NO_x in power plant plumes: Photochemical model and interpretation of measurements in Tennessee // *J. Geophys. Res.* D. 2000. V. 105, N 7. P. 9189–9202.
25. Shan W., Yin Y., Lu H., Liang S. A meteorological analysis of ozone episodes using HYSPLIT model and surface data // *Atmos. Res.* 2009. V. 93, N 4. P. 767–776.
26. Adame J.A., Hernández-Ceballos M.A., Bolívar J.P., De la Morena B. Assessment of an air pollution event in the southwestern Iberian Peninsula // *Atmos. Environ.* 2012. V. 55. P. 245–256.
27. Stohl A., Berg T., Burkhart J.F., Fjaeraa A.M., Forster C., Herber A., Hov O., Lunder C., McMillan W.W., Oltmans S., Shiobara M., Simpson D., Solberg S., Stebel K., Stroem J., Torseth K., Treffeisen R., Virkkunen K., Yttri K.E. Arctic smoke – record high air pollution levels in the European Arctic due to agricultural fires in Eastern Europe in spring 2006 // *Atmos. Chem. Phys.* 2007. V. 7. P. 511–534.
28. Bonasoni P., Evangelisti F., Bonafe U., Ravagnani F., Calzolari F., Stohl A., Tositti L., Tubertini O., Colombo T. Stratospheric ozone intrusion episodes recorded at Mt. Cimone during the VOTALP project: Case studies // *Atmos. Environ.* 2000. V. 34. P. 1355–1365.
29. Lin M., Fiore A.M., Cooper O.R., Horowitz L.W., Langford A.O., Levy II H., Johnson B.J., Naik V., Oltmans S.J., Senff C.J. Springtime high surface ozone events over the western United States: Quantifying the role of stratospheric intrusions // *J. Geophys. Res.* 2012. V. 117. D00V22. DOI: 10.1029/2012JD018151.
30. Huang J.-P., Fung J.C.H., Lau A.K.H., Qin Y. Numerical simulation and process analysis of typhoon-related ozone episodes in Hong Kong // *J. Geophys. Res.* 2005. V. 110. D05301. DOI: 10.1029/2004JD004914.
31. Jiang Y.C., Zhao T.L., Liu J., Xu X.D., Tan C.H., Cheng X.H., Bi X.Y., Gan J.B., You J.F., Zhao S.Z. Why does surface ozone peak before a typhoon landing in southeast China? // *Atmos. Chem. Phys.* 2015. V. 15. P. 13331–13338.
32. Edwards P.M., Brown S.S., Roberts J.M., Ahmadov R., Banta R.M., deGouw J.A., Dubé W.P., Field R.A., Flynn J.H., Gilman J.B., Graus M., Helmig D., Koss A., Langford A.O., Lefer B.L., Lerner B.M., Li R., Li S.-M., McKeen S.A., Murphy S.M., Parrish D.D., Senff C.J., Soltis J., Stutz J., Sweeney C., Thompson C.R., Trainer M.K., Tsai C., Veres P.R., Washenfelder R.A., Warneke C., Wild R.J., Young C.J., Yuan B., Zamora R. High winter ozone pollution from carbonyl photolysis in an oil and gas basin // *Nature*. 2014. V. 514. P. 351–354.
33. Oltmans S., Schnell R., Johnson B., Pétron G., Melford T., Neely III R. Anatomy of wintertime ozone associated with oil and natural gas extraction activity in Wyoming and Utah // *Elementa: Sci. Anthropocene*. 2014. V. 2. 000024. DOI: 10.12952/journal.elementa.000024.
34. Warneke C., Geiger F., Edwards P.M., Dube W., Pétron G., Kofler J., Zahn A., Brown S.S., Graus M., Gilman J.B., Lerner B.M., Peischl J., Ryerson T.B., de Gouw J.A., Roberts J.M. Volatile organic compound emissions from the oil and natural gas industry in the Uintah Basin, Utah: Oil and gas well pad emissions compared to ambient air composition // *Atmos. Chem. Phys.* 2014. V. 14. P. 10977–10988.
35. Neemann E.M., Crosman E.T., Horel J.D., Avey L. Simulations of a cold-air pool associated with elevated wintertime ozone in the Uintah Basin, Utah // *Atmos. Chem. Phys.* 2015. V. 15. P. 135–151.
36. Carnero J.A.A., Bolívar J.P., de la Morena B.A. Surface ozone measurements in the southwest of the Iberian Peninsula (Huelva, Spain) // *Environ. Sci. Pollut. Res.* 2010. V. 17, N 2. P. 355–368.
37. Stauffer R.M., Thompson A.M. Bay breeze climatology at two sites along the Chesapeake bay from 1986–2010: Implications for surface ozone // *J. Atmos. Chem.* 2013. DOI: 10.1007/s10874-013-9260-y.
38. Loughner C.P., Tzortziou M., Follette-Cook M., Pickering K.E., Goldberg D., Satam C., Weinheimer A., Crawford J.H., Mannino A., Knapp D.J., Montzka D.D., Diskin G.S., Marufu L.T., Dickerson R.R. Impact of bay-breeze circulations on surface air quality and boundary layer export // *J. Appl. Meteorol. Clim.* 2014. V. 53, N 7. P. 1697–1713.
39. Звягинцев А.М., Беликов И.Б., Еланский Н.Ф., Какаджанова Г., Кузнецова И.Н., Тарасова О.А., Шалыгина И.Ю. Статистическое моделирование максимальных суточных концентраций приземного озона // *Оптика атмосф. и океана*. 2010. Т. 23, № 2. С. 127–135; Zvyagintsev A.M., Belikov I.B., Elanskii N.F., Kakadzhanova G., Kuznetsova I.N., Tarasova O.A., Shalygina I.Yu. Statistical modeling of daily maximum surface ozone concentrations // *Atmos. Ocean. Opt.* 2010. V. 23, N 4. P. 284–292.
40. Rasmussen D.J., Fiore A.M., Naik V., Horowitz L.W., McGinnis S.J., Schultz M.G. Surface ozone-temperature relationships in the eastern US: A monthly climatology for evaluating chemistry-climate models // *Atmos. Environ.* 2012. V. 47, N 1. P. 142–153.

41. Lee Y.C., Shindell D.T., Faluvegi G., Wenig M., Lam Y.F., Ning Z., Hao S., Lai C.S. Increase of ozone concentrations, its temperature sensitivity and the precursor factor in South China // *Tellus B*. 2014. V. 66. 23455. 16 p. URL: <http://dx.doi.org/10.3402/tellusb.v66.23455>.
42. Curci G., Beekmann M., Vautard R., Smittek G., Steinbrecher R., Theloke J., Friedrich R. Modelling study of the impact of isoprene and terpene biogenic emissions on European ozone levels // *Atmos. Environ.* 2009. V. 43, N 7. P. 1444–1455.
43. Hodnebrog Ø., Solberg S., Stordal F., Svendby T.M., Simpson D., Gauss M., Hilboll A., Pfister G.G., Turquetly S., Richter A., Burrows J.P., Denier van der Gon H.A.C. Impact of forest fires, biogenic emissions and high temperatures on the elevated Eastern Mediterranean ozone levels during the hot summer of 2007 // *Atmos. Chem. Phys.* 2012. V. 12, N 18. P. 8727–8750.
44. Li L., Wang X. Seasonal and diurnal variations of atmospheric non-methane hydrocarbons in Guangzhou, China // *Int. J. Environ. Res. Public Health*. 2012. V. 9. P. 1859–1873. DOI: 10.3390/ijerph9051859.
45. Plass-Duelmer C., Berresheim H. Trends von atmosphärischen Kohlenwasserstoffen (VOC) und ihre Klimarelevanz. WMO-GAW Briefe. Meteorol. Observatorium Hohenpeißenberg. 2005. N 27. 2 S.
46. Звягинцев А.М., Беликов И.Б., Егоров В.И., Еланский Н.Ф., Крученицкий Г.М., Кузнецова И.Н., Николаев А.Н., Обухова З.В., Скороход А.И. Положительные аномалии приземного озона в июле–августе 2002 г. в Москве и ее окрестностях // *Известия РАН. Физ. атмосф. и океана*. 2004. Т. 40, № 1. С. 75–86.
47. Кузнецова И.Н. Влияние метеорологических условий на загрязнение воздуха Москвы в летних эпизодах 2010 г. // *Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана*. 2012. Т. 48. № 5. С. 566–577.
48. Еланский Н.Ф., Мохов И.И., Беликов И.Б., Березина Е.В., Елохов А.С., Иванов В.А., Панкратова Н.В., Постыляков О.В., Сафронов А.Н., Скороход А.И., Шумский Р.А. Газовые примеси в атмосфере над Москвой летом 2010 г. // *Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана*. 2011. Т. 47, № 6. С. 729–738.
49. Звягинцев А.М., Блюм О.Б., Глазкова А.А., Котельников С.Н., Кузнецова И.Н., Лапченко В.А., Лезина Е.А., Миллер Е.А., Миляев В.А., Попиков А.П., Семутникова Е.Г., Тарасова О.А., Шалыгина И.Ю. Загрязнение воздуха на Европейской части России и в Украине в условиях жаркого лета 2010 г. // *Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана*. 2011. Т. 47, № 6. С. 757–766.
50. Konovalov I.B., Beekmann M., Kuznetsova I.N., Yurova A., Zvyagintsev A.M. 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. V. 11, N 19. P. 10031–10056.
51. Jaffe D.A., Wigder N., Downey N., Pfister G., Boynard A., Reid S.B. Impact of wildfires on ozone exceptional events in the Western U.S. // *Environ. Sci. Technol.* 2013. V. 47. P. 11065–11072.
52. Fiala J., Cernikovskiy L., de Leeuw F., Kurfuhrer P. 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, 2003. 33 p.
53. Solberg S., Coddeville P., Forster C., Hov O., Orsolini Y., Uhse K. European surface ozone in the extreme summer 2003 // *Atmos. Chem. Phys. Discuss.* 2005. V. 5. P. 9003–9038.
54. Solberg S., Hov O., Soevde A., Isaksen I.S.A., Coddeville P., De Backer H., Forster C., Orsolini Y.J., Uhse K. European surface ozone in the extreme summer 2003 // *J. Geophys. Res.* 2008. V. 113. D07307. DOI: 10.1029/2007JD009098.
55. Vieno M., Dore A.J., Stevenson D.S., Doherty R., Heal M.R., Reis S., Hallsworth S., Tarrason L., Wind P., Fowler D., Simpson D., Sutton M.A. Modelling surface ozone during the 2003 heat wave in the UK // *Atmos. Chem. Phys.* 2010. V. 10. P. 7963–7978.
56. Stedman J.R. The predicted number of air pollution related deaths in the UK during the August 2003 heatwave // *Atmos. Environ.* 2004. V. 38, N 8. P. 1087–1090.
57. Dear K., Ranmuthugala G., Kjellström T., Skimmer C., Hanigan I. Effects of temperature and ozone on daily mortality during the August 2003 heat wave in France // *Archives of Environmental and Occupational Health*. 2005. V. 60. P. 205–212.
58. Filleul L., Cassadou S., Médina S., Fabres P., Lefranc A., Eilstein D., Le Tertre A., Pascal L., Chardon B., Blanchard M., Declercq C., Jusot J.-F., Prouvost H., Ledrans M. The relation between temperature, ozone and mortality in nine French cities during the heat wave of 2003 // *Environ. Health Perspect.* 2006. V. 114, N 9. P. 1344–1347.
59. Звягинцев А.М., Какаджанова Г., Тарасова О.А. Влияние направлений переноса на сезонный ход концентраций малых газовых составляющих атмосферы в Европе // *Метеорол. и гидрол.* 2010. № 7. С. 18–28.
60. Лапченко В.А., Звягинцев А.М. Приземный озон в Крыму // *Пространство и Время*. 2014. № 2(16). С. 254–257.
61. Tie X., Madronich S., Walters S., Edwards D.P., Ginoux P., Mahowald N., Zhang R., Lou C., Brasseur G. Assessment of the global impact of aerosols on tropospheric oxidants // *J. Geophys. Res.* 2005. V. 110. D03204. DOI: 10.1029/2004JD005359.
62. Lou S., Liao H., Zhu B. Impacts of aerosols on surface layer ozone concentrations in China through heterogeneous reactions and changes in photolysis rates // *Atmos. Environ.* 2014. V. 85. P. 123–138.
63. Hallquist M., Wenger J.C., Baltensperger U., Rudich Y., Simpson D., Claeys M., Dommen J., Donahue N.M., George C., Goldstein A.H., Hamilton J.F., Herrmann H., Hoffmann T., Iinuma Y., Jang M., Jenkin M.E., Jimenez J.L., Kiendler-Scharr A., Maenhaut W., McFiggans G., Mentel Th.F., Monod A., Prévôt A.S.H., Seinfeld J.H., Surratt J.D., Szmigielski R., Wildt J. The formation, properties and impact of secondary organic aerosol: current and emerging issues // *Atmos. Chem. Phys.* 2009. V. 9, N 14. P. 5155–5236. DOI: 10.5194/acp-9-5155-2009.
64. Waring M.S., Wells J.R., Siegel J.A. Secondary organic aerosol formation from ozone reactions with single terpenoids and terpenoid mixtures // *Atmos. Environ.* 2011. V. 45, N 25. P. 4235–4242.
65. Cristofanelli P., Bonasoni P. Background ozone in the southern Europe and Mediterranean area: Influence of the transport processes // *Environ. Poll.* 2009. V. 157. P. 1399–1406.
66. Звягинцев А.М. Аномалии приземного озона в Европе // *Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана*. 2004. Т. 40, № 3. С. 387–396.
67. Taubman B.F., Marufu L.T., Piety C.A., Doddridge B.G., Stehr J.W., Dickerson R.R. Airborne characterization of the chemical, optical, and meteorological properties, and origins of a combined ozone-haze episode

- over the eastern United States // *J. Atmos. Sci.* 2004. V. 61. P. 1781–1793.
68. *Taubman B.F., Hains J.C., Thompson A.M., Marufu L.T., Doddridge B.G., Stehr J.W., Piety C.A., Dickerson R.R.* Aircraft vertical profiles of trace gas and aerosol pollution over the mid-Atlantic U.S.: Statistics and meteorological cluster analysis // *J. Geophys. Res.* 2006. V. 111. D10S07. DOI: 10.1029/2005JD006196.
 69. *Morris G.A., Ford B., Rappenglueck B., Thompson A.M., Mefferd A., Ngan F., Lefer B.* An evaluation of the interaction of morning residual layer and afternoon mixed layer ozone in Houston using ozonesonde data // *Atmos. Environ.* 2010. V. 44. P. 4024–4034.
 70. *Вильфанд Р.М., Кузнецова И.Н., Шалыгина И.Ю., Звягинцев А.М., Нахаев М.И., Захарова П.В., Ланченко В.А.* Мониторинг и прогнозирование качества воздуха в московском регионе // *Биосфера.* 2014. Т. 6, № 4. С. 339–351.
 71. *Суркова Г.В., Блинов Д.В., Кирсанов А.А., Ревокатова А.И., Ривин Г.С.* Моделирование распространения шлейфов воздушных загрязнений от очагов лесных пожаров с использованием химико-транспортной модели COSMO-Ru7 ART // *Оптика атмосф. и океана.* 2014. Т. 27, № 1. С. 75–81; *Surkova G.V., Blinov D.V., Kirsanov A.A., Revokatova A.P., Rivin G.S.* Simulation of spread of air pollution plumes from forest fires with the use of COSMO-Ru7-ART Chemical-transport model // *Atmos. Ocean. Opt.* 2014. V. 27, N 3. P. 268–274.
 72. *Нахаев М.И., Березин Е.В., Шалыгина И.Ю., Кузнецова И.Н., Коновалов И.Б., Блинов Д.В., Лезина Е.А.* Экспериментальные расчеты концентраций PM10 и CO комплексом моделей CHIMERE и COSMO-RU7 // *Оптика атмосф. и океана.* 2015. Т. 28, № 6. С. 569–578.
 73. *Goyal P., Mishra D., Upadhyay A.* Forecasting of ozone episodes through statistical and artificial intelligence based models over Delhi metropolitan area. Recent researches in applied mathematics, simulation and modelling. Konya: Selcuk University, 2015. P. 111–120.
 74. *Kukkonen J., Olsson T., Schultz D.M., Baklanov A., Klein T., Miranda A.I., Monteiro A., Hirtl M., Tarvainen V., Boy M., Peuch V.H., Poupkou A., Kioutsioukis I., Finardi S., Sofiev M., Sokhi R., Lehtinen K.E.J., Karatzas K., San Jose R., Astitha M., Kallos G., Schaap M., Reimer E., Jakobs H., Eben K.* A review of operational, regional-scale, chemical weather forecasting models in Europe // *Atmos. Chem. Phys.* 2012. V. 12. P. 1–87.
 75. *Schnell J.L., Holmes C.D., Jangam A., Prather M.J.* Skill in forecasting extreme ozone pollution episodes with a global atmospheric chemistry model // *Atmos. Chem. Phys.* 2014. V. 14. P. 7721–7739.
 76. *Sun W., Palazoglu A., Singh A., Zhang H., Wang Q., Zhao Z., Cao D.* Prediction of surface ozone episodes using clusters based generalized linear mixed effects models in Houston–Galveston–Brazoria area, Texas // *Atmos. Poll. Res.* 2015. V. 6. P. 245–253.

A.M. Zvyagintsev, I.N. Kuznetsova, I.Ju. Shalygina, V.A. Lapchenko, N.E. Brusova, A.A. Arkhangel'skaia, N.V. Tereb, E.A. Lezina. **Causes and factors of positive anomalies of surface ozone in the Moscow region and the south-eastern coast of the Crimea.**

Surface ozone sources and factors forming anomalous ozone concentration are discussed. The relations between elevated surface ozone concentrations, air temperature, and wind speed in planetary boundary layer are studied using data from Moscow, its environments and more far territories, Black Sea coast, foreign air quality stations. Impacts of advection of ozone and its precursors on ozone levels are shown. Studies of factors causing ozone episodes and reasons of below-average ozone concentrations under meteorological conditions, favorable for photochemical ozone production, are the base for interpretation and correction of ozone forecasting from chemistry-transport models.