

DOI: 10.7868/S0869587315030056

Неумолимый рост количества автомобилей неизбежно приводит к увеличению выбросов загрязняющих веществ в атмосферу. Одним из вариантов решения этой проблемы является перевод автотранспорта на газомоторное топливо, что позволит не только снизить затраты на заправку транспортных средств, но и значительно сократить выбросы продуктов сгорания топлива. Авторы статьи рассуждают о том, какой из видов газового топлива целесообразно использовать и как сократить нагрузку на окружающую среду и человека.

ПЕРЕВОД АВТОТРАНСПОРТА НА ГАЗ: ВОЗМОЖНЫЕ ПРОБЛЕМЫ

Б.Д. Белан

Многokратный рост количества автомобилей в постсоветский период в России привёл к тому, что из-за выбросов продуктов сгорания топлива во многих городах стали складываться смоговые ситуации. Для улучшения экологической обстановки Правительство РФ 13 мая 2013 г. выпустило распоряжение № 767-р “О регулировании отношений в сфере использования газового моторного топлива, в том числе природного газа в качестве моторного топлива”. В нём федеральным и местным органам предписывается осуществить комплекс мер, направленных на создание условий с целью доведения к 2020 г. в субъектах Российской Федерации уровня использования природного газа в качестве моторного топлива на общественном автомобильном транспорте и транспорте дорожно-коммунальных служб в городах с численностью населения более 1 млн. до 50% общего количества единиц техники, в городах с населением более 300 тыс. человек – до 30% и в городах и населённых пунктах с более чем 100 тыс. жителей – до 10%.



БЕЛАН Борис Денисович – доктор физико-математических наук, заместитель директора по научной работе Института оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН.
bbd@iao.ru

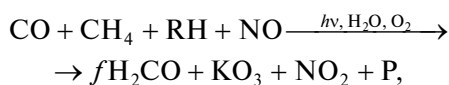
Можно было бы приветствовать это распоряжение, так как оно направлено на значительное сокращение загрязнения воздуха в городах. Однако если обратить внимание на вторую часть его названия – “в том числе природного газа в качестве моторного топлива”, то очевидно, что допускается применение и другого газового моторного топлива, помимо природного сжиженного газа. А это вызывает обоснованные опасения относительно возможных отрицательных последствий.

В настоящее время в качестве автомобильного горючего используются два вида газового топлива – сжиженный нефтяной (или углеводородный) газ и сжатый, компримированный газ. Сжиженный газ в основном состоит из пропана (C_3H_8) – 50–70%, газовой смеси бутана (C_4H_{10}) – 30–40%, получаемых при добыче природного газа и нефти, а также на различных стадиях её переработки, и непредельных углеводородов – около 1% [1]. Их химические и физические свойства обеспечивают достаточную мощность и эффективность работы двигателя. Природный газ, добываемый в России, имеет следующий состав: метан (CH_4) – 98.52%, этан (C_2H_6) – 0.34%, пропан (C_3H_8) – 0.13%, бутан (C_4H_{10}) – 0.03% [2].

Исследование качества воздуха в мегаполисе Мехико позволило сделать вывод, что при использовании на автотранспорте и в жилищно-коммунальном хозяйстве пропан-бутановых смесей в атмосфере города образуются не просто смоги, а фотохимические смоги [3]. Какие печальные последствия влекут за собой фотохимические смоги, было впервые выявлено в 1944 г. в Лос-Анджелесе, когда несколько сотен человек умерли, а тысячи попали в больницы [4]. Более детальный анализ, проведённый позже [5], показал, что основным источником отравления и гибели людей оказался озон, образовавшийся из

выбросов автотранспорта в ходе фотохимических процессов.

Важно подчеркнуть, что в результате фотохимических реакций в атмосфере из менее токсичных соединений образуются более токсичные. Это легко показать на примере брутто-уравнения [6]:



где f – стехиометрический коэффициент преобразования углеводородов; K – коэффициент выхода озона, зависящий от концентрации оксидов азота, которые переключают цепи его генерации; P – продукты фотохимических реакций, представляющие собой аэрозольные частицы, возникающие при взаимодействии газовых компонентов.

Физический смысл брутто-уравнения прозрачен. Первичные примеси (CO – оксид углерода, CH_4 – метан, RH – неметановые углеводороды, NO – оксид азота), относящиеся к III и IV классу опасности, попадая в атмосферу, в которой имеются водяной пар (H_2O) и кислород (O_2), под действием ультрафиолетового излучения ($h\nu$) преобразуются в более токсичные соединения: H_2CO – формальдегид (II класс опасности), O_3 – озон (I класс опасности), NO_2 – диоксид азота и P – продукты реакций, как правило, в виде аэрозолей, зачастую содержащих такие токсичные соединения, как пероксиацетилнитраты и др.

Многие города России рискуют повторить опыт Мехико при реализации упомянутого выше распоряжения, поскольку в стране работает только один завод по сжижению природного газа, который сразу же экспортируется [7], все остальные выпускают пропан-бутановую смесь. Ситуацию может усугубить и сложность обращения с этими видами газовых смесей.

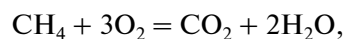
Углеводороды, входящие в состав попутного нефтяного газа, при нормальных условиях находятся в газообразном состоянии, но при увеличении внешнего давления меняют агрегатное состояние и превращаются в жидкость. Это свойство позволяет добиться высокой энергетической плотности и хранить сжиженный углеводородный газ в сравнительно простых по конструкции резервуарах [1, 2].

В отличие от попутного нефтяного газа, углеводороды, входящие в состав природного газа, при нормальных условиях находятся в газообразном состоянии и не меняют агрегатного состояния даже при значительном изменении давления, поэтому хранение сжатого (компримированного) природного газа сопряжено с большими сложностями. Так, резервуар должен выдерживать давление до 200 атм. Преимущества высокой энергетической плотности сжиженного природного газа

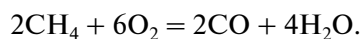
во многом теряются из-за сложности криогенного оборудования, значительно более дорогого и требующего постоянного контроля высококвалифицированного персонала. Поэтому с высшей степенью вероятности можно предполагать, что из-за сложности эксплуатации такого оборудования, а соответственно, и дороговизны владельцы автотранспорта вряд ли откажутся от пропан-бутановых смесей.

ПОЛОЖИТЕЛЬНЫЕ И ОТРИЦАТЕЛЬНЫЕ ЭФФЕКТЫ

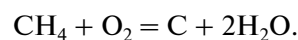
Если в автотранспорте, в сфере ЖКХ, энергетике и на промышленных объектах будет использоваться природный газ (неважно, газообразный или сжиженный), то в продуктах сгорания не будет веществ, запускающих фотохимическую реакцию. Все углеводороды при полном окислении (избыток кислорода) выделяют углекислый газ и воду [8]:



при неполном (недостаток кислорода) – угарный газ и воду:



Если количество кислорода ещё меньше, выделяется мелкодисперсный углерод (сажа):



При этом выбросы в атмосферу по ряду соединений уменьшаются в разы, а по некоторым веществам – в десятки раз [2]. Поскольку автомобили на традиционном топливе также выбрасывают CO и сажу (элементарный углерод), то замена его на газ, очевидно, является более экологичным решением, так как при этом объёмы выбросов значительно сокращаются. Угарный газ быстро доокислится в атмосфере до углекислого. Сажу в выбросах легко определить даже визуально и принять необходимые меры для регулировки процесса сжигания.

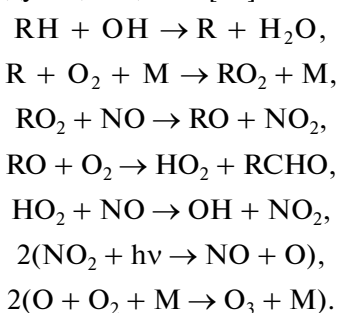
Обычно смоговые ситуации контролируются по концентрации озона [9]. Озон не выбрасывается в воздух ни одним предприятием, он образуется в тропосфере в ходе фотохимических процессов (~80%) или поступает из стратосферы (~20%) [6], поэтому является хорошим индикатором смога.

Анализ смога в Мехико привёл авторов [3] к выводу, что причиной его образования является состав сжиженного газа. При использовании пропан-бутановых смесей в атмосфере города из выбросов автотранспорта и предприятий появляются соединения C_3 – C_4 (алканы и пропан), запускающие фотохимические процессы. Причём это выяснилось после того, как местные власти перевели транспорт на газовое топливо и в значитель-

ной степени газифицировали жилищно-коммунальный сектор с целью уменьшения, как предполагалось, смоговой нагрузки.

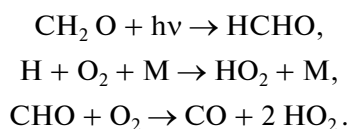
Чтобы проверить выводы об источнике фотохимических процессов, Д.Р. Блейк и Ф.С. Роулэнд с коллегами предприняли исследование концентрации легколетучих соединений (предшественников озона) в 28 городах США, где наблюдались смоговые ситуации [10]. Была выявлена высокая корреляция между выбросами оксида углерода и неметановыми углеводородами, а также пропорциональность концентрации C₃–C₄ алканов и пропана в отдельных городах количеству использованного сжиженного не природного газа.

Появление в атмосфере “затравочных” углеводородов при взаимодействии с гидроксильными радикалами приводит к последовательным реакциям, которые в общем виде можно записать в следующем цикле [11]:

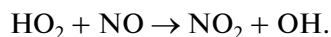


В итоге получаем: $\text{RH} + 4\text{O}_2 + 2h\nu \rightarrow \text{RCHO} + 2\text{H}_2\text{O} + 2\text{O}_3$.

Так как концентрация гидроксила в атмосфере мала, то для продолжения цепи необходимо постоянно возвращать активный центр OH в начало приведённого цикла. Это может происходить путём фотолиза образовавшихся альдегидов (наиболее часто – формальдегида) по схеме [12]:



После этого образовавшийся HO₂ быстро реагирует с оксидом азота:



Рассматривая процесс образования фотохимического смога, В.А. Исидоров указывает несколько путей его возможного развития [13]. Если в воздухе отмечается относительно высокое содержание ароматических углеводородов, это должно приводить к некоторому снижению концентрации и скорости накопления озона вследствие малого выхода пероксидных радикалов и удаления части оксидов азота в виде нитрофенолов. К аналогичному эффекту ведёт образование алкилнитратов и нитритов, пероксиацетилнитратов и не-

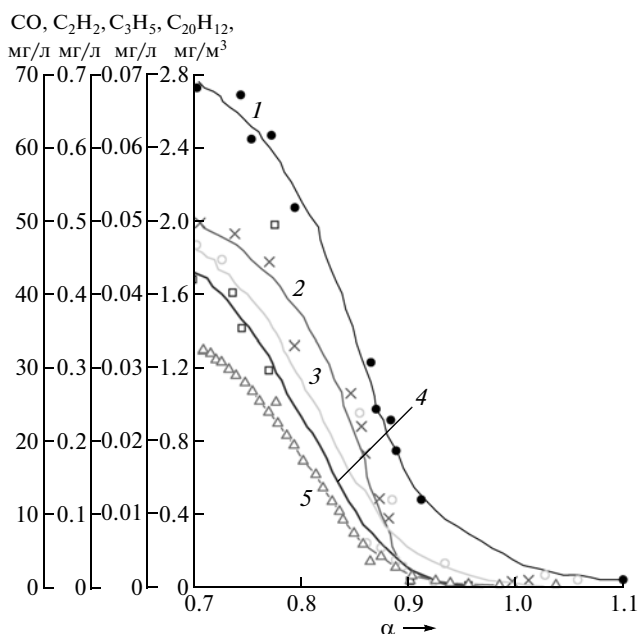


Рис. 1. Изменение состава продуктов сгорания в зависимости от α:

1 – CO; 2 – C₂H₂; 3, 4 – C₃H₅; 5 – C₂₀H₁₂

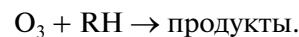
органических соединений азота, таких как водорастворимые N₂O₅ и HNO₃. Следовательно, накопление озона зависит от соотношения начальных концентраций органических соединений – предшественников пироксидных радикалов и оксидов азота:

$$D[\text{O}_3]/dt = k[\text{NO}_x + \text{RO}_2]/\{\text{NO}\}[\text{RO}_2]\}.$$

При малой величине этого отношения скорость конверсии NO в NO₂ мала, и оксид азота включается в процесс разрушения озона. При очень высоком отношении озон также не будет накапливаться из-за связывания диоксида азота органическими радикалами:



или из-за реакции образовавшегося O₃ с углеводородами:



Сам же выход “затравочных” углеводородов в значительной степени зависит от режима сгорания. Этот процесс подробно исследовался в работе [14]. На рисунке 1 представлен построенный по данным [14] график, отражающий выход продуктов при сжигании сжиженного газа в эксперименте в зависимости от избытка или недостатка кислорода α. Видно, что выход несгоревших продуктов при α = 0.9–1.1 близок к нулю. Снижение поступления кислорода в сжигаемую смесь на 30% приводит почти к десятикратному увеличению выхода побочных продуктов.

Таблица 1. Константы скорости реакции ОН с углеводородами

Вещество	$K, \text{см}^3 \cdot \text{мол}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$	$K_i/K_{\text{пропан}}$
Изопрен	9.7×10^{-11}	3.9
Циклогексан	6.6×10^{-11}	2.6
Пропан	2.5×10^{-11}	1.0
<i>i</i> -ксилолы	2.4×10^{-11}	0.96
Толуол	6.0×10^{-12}	0.24
Бутан	2.5×10^{-12}	0.10
Этан	2.7×10^{-13}	0.011
Оксид углерода	2.4×10^{-13}	0.010
Метан	8.0×10^{-15}	0.00032

Вернёмся теперь к влиянию состава газов на ход фотохимических процессов. Приведённое выше брутто-уравнение не отражает промежуточных соединений — гидроксильных групп НО и переключающую роль оксидов азота, зато наглядно показывает, из чего образуется тропосферный озон и его определяющие факторы. Выход озона будет зависеть от двух составляющих — концентрации исходных соединений, газов-предшественников, а также интенсивности и спектрального состава солнечной радиации.

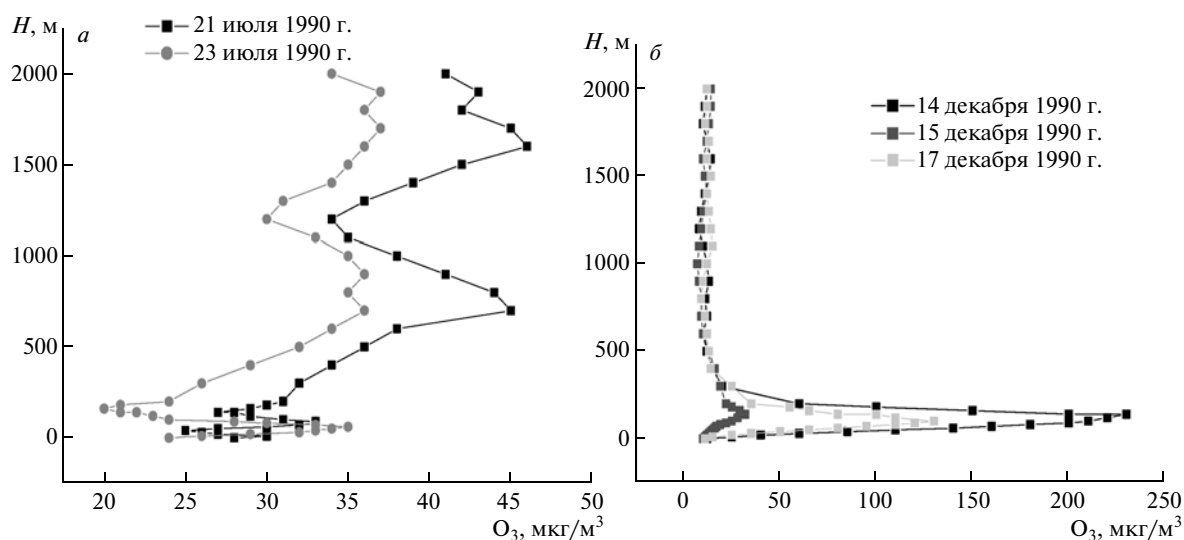
В монографии [6] по данным работ [15, 16] составлена таблица 1, в которой приведены скорости химических реакций при окислении углеводородов в воздухе гидроксидом и проведена их нормировка на пропан. Из таблицы следует, что если в автомобиле или на предприятии будет использоваться природный газ, состоящий в основном из метана, то скорость образования озона из его несгоревших продуктов и, соответственно,

других компонентов, входящих в правую часть брутто-уравнения, будет в 300 или даже в 3000 раз меньше, чем из продуктов пропан-бутановой смеси.

Проблему начала фотохимических процессов в атмосфере городов удалось обнаружить при самолётном обследовании воздушного бассейна Хабаровска [17]. В городе имеется несколько ТЭЦ. В период летнего обследования в 1990 г. все они работали на угле. В сентябре того же года они были переведены на газ. В результате при зимнем обследовании (в декабре) в слое выбросов, приблизительно на высоте 100 м, были обнаружены высокие концентрации озона. Данная высота совпадает с уровнем среза труб ТЭЦ и была довольно точно определена в процессе лазерного зондирования с борта самолёта [18]. Летние и зимние профили распределения озона показаны на рисунке 2.

В летний период, когда поступление солнечной радиации, необходимой для генерации озона, максимально, его содержание колебалось от 20 до 40 мкг/м³. (Подчеркнём, что в летний период максимально и поступление углеводородов из естественных источников [6].) Было получено 16 соответствующих профилей в разное время суток — утром, днём и вечером. Можно сказать, что это обычная для данного региона концентрация озона в летний период.

В декабре, вблизи уровня 100 м, куда поступают выбросы от ТЭЦ, концентрация составляла 230 мкг/м³ (14.12.1990) и 130 мкг/м³ (17.12.1990). Узость слоя, в котором зафиксировано высокое содержание озона, свидетельствует о том, что он мог образоваться здесь из продуктов в шлейфе выбросов. В пользу этого вывода говорит и про-

**Рис. 2.** Вертикальное распределение озона над Хабаровском в июле (а) и в декабре (б) 1990 г.

филь, снятый 15.12.1990 сразу же после прохождения холодного фронта с обильным снегопадом, который заметно очистил воздух. Как видно из рисунка 2, через сутки процесс генерации озона возобновился, что явно указывает на наличие местного источника газов-предшественников.

Приведённый пример достаточно ярко иллюстрирует результаты работ [3–6, 9–13], в которых показано, что в выбросах сжигающих устройств, работающих на газе, имеются соединения, которые провоцируют фотохимическое образование озона в атмосфере. По-видимому, при реализации распоряжения Правительства РФ надо учитывать данную особенность сжиженных газов.

По результатам исследования Д. Блейка и Ф. Роуланда, властям Мехико была дана рекомендация об уменьшении использования пропан-бутанового сжиженного газа [3, 10]. Очевидно, здесь сыграл свою роль авторитет нобелевского лауреата Роуланда, власти прислушались к совету, и ситуация в значительной степени стабилизировалась. Это показало проведённое их коллегами контрольное исследование [19].

СОСТОЯНИЕ КОНТРОЛЯ И УРОВЕНЬ ОЗОНА В ПРИЗЕМНОМ СЛОЕ ВОЗДУХА НА ТЕРРИТОРИИ РОССИИ

Согласно обзору Н.Ф. Еланского о состоянии исследований озона в России, подготовленному по заказу Всемирной метеорологической организации, полноценный мониторинг озона осуществляется только в Москве силами Мосэкомониторинга [20]. Рядом академических организаций, учитывая исключительную токсичность озона и компонентов воздуха, сопровождающих его образование, в инициативном порядке организован его мониторинг. Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН ведёт измерение показателем на территории обсерватории МГУ, на Кисловодской высокогорной научной станции, на высотной мачте вблизи посёлка Зотино Красноярского края, а также осуществляет периодические эксперименты “Тройка” в вагоне-лаборатории по маршруту Москва–Владивосток–Москва. Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН имеет четыре поста: один в городе и три в фоновых районах Томской области. Он осуществляет измерение вертикального распределения озона с помощью самолёта-лаборатории Ту-134 “Оптик”. Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН создал сеть из трёх постов: на территории Карадагского заповедника в Крыму, в городе Вятские Поляны (Кировская область) и Санкт-Петербурге. Полярный геофизический институт РАН осуществляет мониторинг озона на Кольском полуострове. В Иркутске и на акватории оз. Байкал проводит измерения Лимнологический институт СО РАН. В Улан-Удэ и на

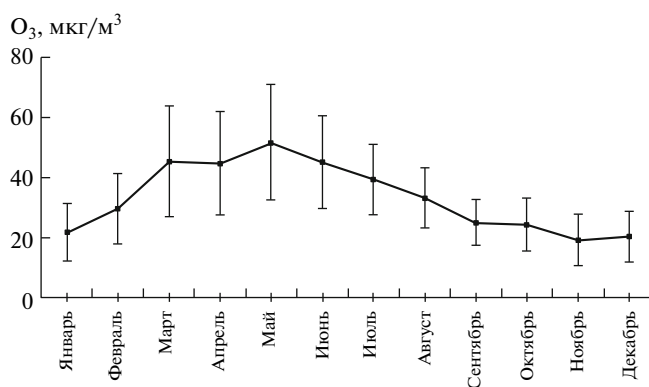


Рис. 3. Средний многолетний годовой ход приземной концентрации озона в районе Томска (1990–2011)

берегу оз. Байкал работают сотрудники Бурятского научного центра СО РАН. В системе Росгидромета измерения приземной концентрации озона ведутся силами Центральной аэрологической обсерватории в г. Долгопрудном Московской области, сотрудниками научно-производственного объединения “Тайфун” в Обнинске Калужской области, Западно-Сибирским управлением начаты измерения в Новосибирске.

Возможно, с момента публикации обзора [20] появились новые пункты измерения приземной концентрации озона, но в литературе информации об этом обнаружить не удалось. Очевидно, что точек мониторинга озона явно недостаточно, учитывая, что распоряжение Правительства РФ распространяется на всю территорию страны.

Ввиду особой токсичности озона (он относится к I классу опасности) в России для него установлены достаточно жёсткие гигиенические нормативы предельно допустимых концентраций (ПДК): ПДК_{р.з.} (воздух рабочей зоны) – 100 мкг/м³; ПДК_{с.с.} (среднесуточная концентрация в атмосферном воздухе населённых пунктов) – 30 мкг/м³; ПДК_{м.р.} (максимальная разовая концентрация в атмосферном воздухе населённых пунктов с вероятностью появления 0.1%) – 160 мкг/м³.

Данные мониторинга большинства перечисленных выше пунктов показывают, что к настоящему времени предельно допустимые концентрации регулярно превышаются [20]. Если же появится дополнительный источник озonoобразующих веществ, то ситуация только усугубится, насколько значительно, рассмотрим на примере г. Томска.

На рисунке 3 представлен средний многолетний годовой ход приземной концентрации озона, построенный по среднемесячным значениям, рассчитанным по всему массиву данных. Видно, что средний многолетний годовой ход простой, с одним ярко выраженным максимумом и одним минимумом. В районе Томска наблюдался рост концентрации озона в приземном слое, который в мае достиг своего максимума со значением

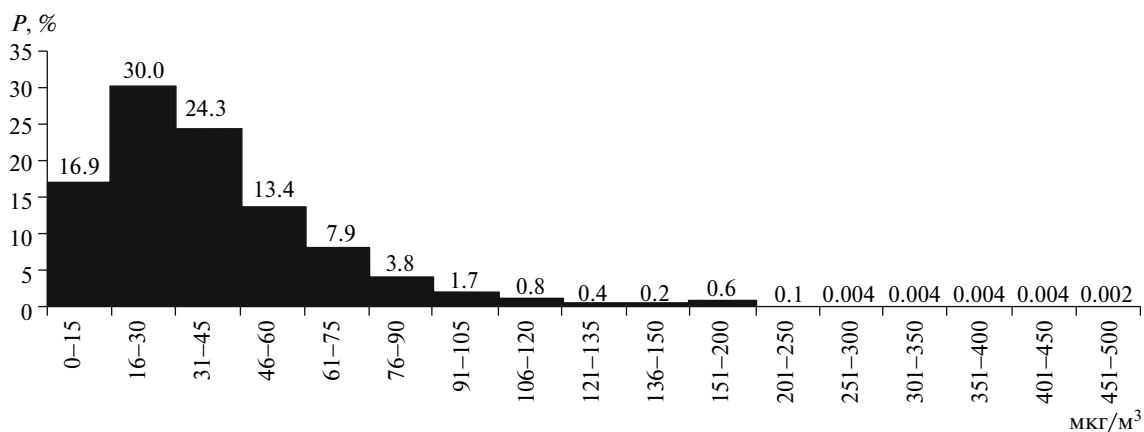


Рис. 4. Повторяемость различных значений концентрации озона

51.6 мкг/м³. Причём с января по март наблюдалось резкое возрастание озона с 21.6 до 45.2 мкг/м³, то есть почти в 2 раза, а с марта по май оно составило всего 6.6 мкг/м³. Резкое возрастание содержания озона ранней весной может быть связано с

географическим положением города, наличием хвойных лесов в его окрестностях. После весеннего максимума наблюдалось плавное понижение концентрации до 19–20 мкг/м³ в ноябре–декабре.

Таблица 2. Повторяемость превышения предельно допустимых концентраций приземной концентрации озона в г. Томске

Год	ПДК _{с.с.}	2ПДК _{с.с.}	3ПДК _{с.с.}	4ПДК _{с.с.}	5ПДК _{с.с.}	ПДК _{м.р.}
1990	17.8	0.7	—	—	—	—
1991	46.6	27.6	9.2	0.6	—	—
1992	51.6	18.7	9	3.5	2.1	1.77
1993	67.8	22.3	4.2	—	—	—
1994	48.6	13.7	1.1	0.3	—	—
1995	28.8	0.6	—	—	—	—
1996	45.1	11.6	2	0.3	—	—
1997	47.2	7.1	0.6	—	—	—
1998	22.3	0.8	—	—	—	—
1999	10.8	—	—	—	—	—
2000	31.1	6.6	2.2	—	—	—
2001	58.2	28.3	9.9	2.7	1.1	0.82
2002	49.3	13.4	2.7	0.5	—	—
2003	59.9	15.9	1.9	0.5	—	—
2004	57.4	12.6	3.3	1.6	—	—
2005	44.4	14.0	—	—	—	—
2006	35.1	1.4	—	—	—	—
2007	55.9	16.2	2.2	—	—	—
2008	53.8	6.0	—	—	—	—
2009	53.9	11.7	0.3	—	—	—
2010	57.4	5.7	0.3	—	—	—
2011	50.4	12.3	0.5	—	—	—
2012	54.5	5.8	—	—	—	—
Среднее	45.6	11.5	3.3	1.3	1.6	1.3

На графике показаны среднемесячные концентрации приземного озона, статистическая оценка — более жёсткая. Видно, что ПДК_{с.с.} превышает в Томске с марта по август, то есть в течение семи месяцев в году. Если же мы обратимся к рисунку 4, на котором приведена гистограмма повторяемости различных значений среднесуточной приземной концентрации озона, то увидим, что меньше половины значений имеют величину ниже ПДК населённых пунктов, в то время как максимальная разовая ПДК неоднократно превышалась. По данным измерений была составлена таблица 2, в которой собрана информация о превышении среднесуточных и максимальных разовых ПДК.

В районе Томска в среднем ПДК_{с.с.} превышает в 62% случаев, ПДК_{м.р.} — в 1.3%. Это значительно больше, чем задаётся санитарными нормативами. Следовательно, природоохранные органы должны проводить мероприятия по минимизации воздействия озона на людей. Если же в Томске перевести автотранспорт по нормам распоряжения № 767-р (потребление топлива составит около 3 млн. т в год), то это может привести к круглогодичному превышению ПДК_{с.с.} и вероятности превышения ПДК_{м.р.}

Использование пропан-бутановых смесей в качестве моторного топлива на фоне уже наблюдающихся высоких концентраций озона может привести к стимулированию смоговых ситуаций. Для исключения подобных ситуаций в городах с высоким уровнем загрязнения воздуха можно использовать *только сжиженный природный газ*, а не пропан-бутановую смесь. Кроме того, следует организовать постоянный и эффективный контроль над используемым газом и мониторинг концентрации озона на территории России. Если же не получится добиться использования только природного газа, то надо изменить пропорции в распоряжении № 767-р на обратные, то есть использовать пропан-бутановую смесь: в городах с численностью населения более 1 млн. человек — до 10% общего количества единиц техники, более 300 тыс. человек — до 30%, более 100 тыс. человек — до 50%.

Работа выполнена при поддержке программы Президиума РАН № 4, программы ОНЗ РАН № 5; междисциплинарных интеграционных проектов СО РАН № 35, № 70 и № 131; грантов РФФИ № 14-05-00526, № 14-05-00590 и № 14-05-93108; госконтрактов Минобрнауки России № 14.604.21.0100, идентификационный номер RFMTFIBVB210290, № 14.613.21.0013, идентификационный номер RFMEFI61314X0013.

ЛИТЕРАТУРА

1. Майорец М., Симонов К. Сжиженный газ — будущее мировой энергетики. М.: Альпина Паблицер, 2013.
2. Ионин А.А. Газоснабжение. М.: Стройиздат, 1975.

3. Blake D.R., Rowland F.S. Urban leakage of liquefied petroleum gas and its impact on Mexico City air quality // Science. 1995. V. 269. P. 953–956.
4. Haagen-Smit A.J. Chemistry and physiology of Los Angeles Smog // Ind. End. Chem. 1952. V. 44. P. 1342–1346.
5. Haagen-Smit A.J., Fox M.M. Ozone formation in photochemical oxidation of organic substances // Ind. Eng. Chem. 1956. V. 48. P. 1484–1487.
6. Белан Б.Д. Озон в тропосфере. Томск: ИОА СО РАН, 2010.
7. Кирюшин П.А., Книжников А.Ю., Кочи К.В. и др. Попутный нефтяной газ в России: “Сжигать нельзя, перерабатывать!” Аналитический доклад об экономических и экологических издержках сжигания попутного нефтяного газа в России. М.: Всемирный фонд дикой природы (WWF), 2013.
8. Глинка Н.Л. Общая химия. Л.: Химия, 1985.
9. Crutzen P.J., Zimmermann P.H. The changing photochemistry of the troposphere // Tellus AB. 1991. V. 43. P. 136–151.
10. Baker A.K., Beyersdorf A.J., Doezema L.A., Katzenstein A., et al. Measurements of nonmethane hydrocarbons in 28 United States cities // Atmos. Environ. 2008. V. 42. P. 170–182.
11. Chameides W.L., Fehsenfeld F., Rodgers M.O., Cardelino C., et al. Ozone precursor relationship in the ambient atmosphere // J. Geophys. Res. 1992. V. 97. P. 6037–6055.
12. Atkinson R. Kinetics and mechanisms of the gas-phase reaction of hydroxyl radical with organic compound under atmospheric conditions // Chem. Rev. 1986. № 1.
13. Исидоров В.А. Органическая химия атмосферы. СПб.: Химия, 2001.
14. Лавров Н.В., Стаскевич Н.Л., Комина Г.П. О механизме образования бенз(а)пирена // Доклады АН СССР. 1972. № 6.
15. De More W.B., Sander S.P., Golden D.M. Chemical kinetics and photochemical data for use in stratospheric modeling // NASA, JPL Publ. 1990. № 9.
16. Middleton P., Stockwell W.R., Carter W.P.L. Aggregation and regional modeling // Atmos. Environ. 1990. V. 24(A). P. 1107–1134.
17. Белан Б.Д., Микушев М.К., Панченко М.В. и др. Особенности прохождения фотохимических процессов в воздухе промышленных центров // Оптика атмосферы и океана. 1991. № 9.
18. Белан Б.Д., Бурков В.В., Панченко М.В. и др. Некоторые результаты зондирования промышленных выбросов бортовым лидаром “Макрель-2М” // Оптика атмосферы и океана. 1992. № 2.
19. Perring A.E., Bertram T.H., Farmer D.K., et al. The production and persistence of SRONO₂ in the Mexico City plume // Atmos. Chem. Phys. 2010. № 15.
20. Еланский Н.Ф. Российские исследования атмосферного озона в 2007–2010 гг. // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2012. № 3.