

ОПТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И БАЗЫ ДАННЫХ ОПТИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ ОБ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЕ

УДК 551.510.42

Роль влажности воздуха в изменении приземной концентрации озона

Б.Д. Белан, Д.Е. Савкин*

*Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1*

Поступила в редакцию 22.03.2019 г.

По данным измерений TOR-станции Института оптики атмосферы СО РАН с 1994 по 2017 г. выполнено исследование зависимости изменения концентрации озона в приземном слое воздуха от величины абсолютной влажности. Выявлена нейтральная зависимость при положительных температурах и неожиданно большая и знакопеременная изменчивость при отрицательных. Абсолютная влажность оказывает отрицательное влияние на образование озона в приземном слое воздуха, приводя к уменьшению его концентрации, при температурах 0...–30 °С. При очень низких температурах (ниже –30 °С) эффект изменяется на положительный с увеличением абсолютной влажности концентрация озона растет.

Ключевые слова: атмосфера, газ, влажность, воздух, озон; atmosphere, gas, humidity, air, ozone.

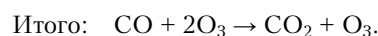
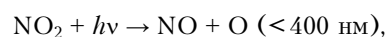
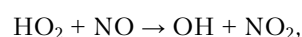
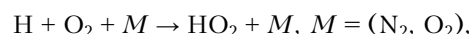
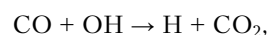
Введение

Особые физико-химические свойства озона (высокая токсичность для биологических объектов и растительности, способность к окислению почти всех материалов, вклад в радиационный баланс планеты [1, 2]) приводят к необходимости исследования закономерностей его образования в тропосфере и особенно в приземном слое воздуха. Согласно [3] большое влияние на генерацию озона вблизи поверхности земли оказывают метеорологические параметры. В настоящее время установлена связь образования озона с температурой воздуха [4–6], УФ–Б-радиацией и радоном [7], давлением воздуха, скоростью ветра и солнечной радиацией [8]. Относительно взаимосвязи с влажностью воздуха имеются противоречивые сведения.

Так, авторы [9] пришли к выводу, что рост концентрации озона фиксировался при низкой относительной влажности, высоких температурах и значениях солнечной радиации, отсутствии осадков. Анализ ситуации с интенсивными пожарами в Подмоскowie [10] выявил отрицательный коэффициент корреляции с относительной влажностью (–0,66). Переход к абсолютной влажности с исключением ее зависимости от температуры показал отсутствие корреляции в 2010 г. и значимую отрицательную корреляцию (–0,48) в 2011 г. Отрицательная связь с концентрацией установлена также в [11].

Если мы обратимся к механизму образования озона в тропосфере, то роль водяного пара станет более очевидной. В фоновых районах генерация

начинается с фотолиза самого озона, имеющегося в тропосфере [12]: $O_3 + h\nu \rightarrow O(^1D) + O_2 (< 310 \text{ нм})$. Затем возбужденный атом $O(^1D)$ взаимодействует с водяным паром H_2O , что приводит к образованию гидроксила $O(^1D) + H_2O \rightarrow 2OH$, который, по данным [13], атакует почти все газы, находящиеся в атмосфере. Например, окисление оксида углерода с образованием озона может происходить по схеме [12]:



Следовательно, можно ожидать, что водяной пар будет участвовать в образовании гидроксила и тем самым определять темп окисления озонобразующих веществ в атмосфере и количество образовавшегося озона. В этом случае определяющей характеристикой для процесса должна быть абсолютная, а не относительная влажность. Авторы работы [11] пытались установить связь изменения озона с удельной влажностью и получили отрицательную зависимость. Однако они проверили исследование для разных районов США и объяснили такой результат географическими различиями.

Таким образом, имеется предпосылка для поиска вида зависимости изменения концентрации озона от абсолютной влажности. Этому и посвящена настоящая работа.

* Борис Денисович Белан (bbd@iao.ru); Денис Евгеньевич Савкин (densavkin88@rambler.ru).

Исходные данные и применяемые методы

Для исследования использовались данные мониторинга состава воздуха в районе Академгородка г. Томска с 1994 по 2017 г. Наблюдения выполнялись с помощью TOR-станции ИОА СО РАН, расположение и современное состояние измерительного комплекса которой описано в [14].

Выделение вклада абсолютной влажности в генерацию озона проводилось по следующей методике. После синоптической селекции, в ходе которой были исключены периоды прохождения фронтальных разделов и наличие шлейфов от лесных пожаров, весь массив данных был разбит на подмассивы с одинаковыми значениями температуры воздуха. Это необходимо для исключения зависимости скорости генерации озона от температуры, установленной ранее [15]. Таких подмассивов оказалось восемь: -40 ± 1 ; -30 ± 1 ; -20 ± 1 ; -10 ± 1 ; 0 ± 1 ; 10 ± 1 ; 20 ± 1 ; 30 ± 1 °C. Внутри каждого подмассива было проведено

сопоставление концентрации озона и значений абсолютной влажности для одного и того же момента времени.

Результаты анализа и их обсуждение

На рис. 1 видно, что в диапазоне температур воздуха от $+30$ до -10 °C наблюдается устойчивая тенденция уменьшения концентрации озона с ростом содержания водяного пара. При температуре -30 °C линия тренда становится нейтральной. И, что неожиданно, при температуре -40 °C с ростом концентрации водяного пара генерация озона увеличивается.

Важно, что для каждого подмассива данных (температуры воздуха) весьма сильно различаются диапазоны изменения абсолютной влажности. Так, при температуре $+30$ °C (рис. 1, а) значение абсолютной влажности изменяется от 5,1 до 25,4 г/м³, а при -40 °C — от 0,12 до 0,18 г/м³.

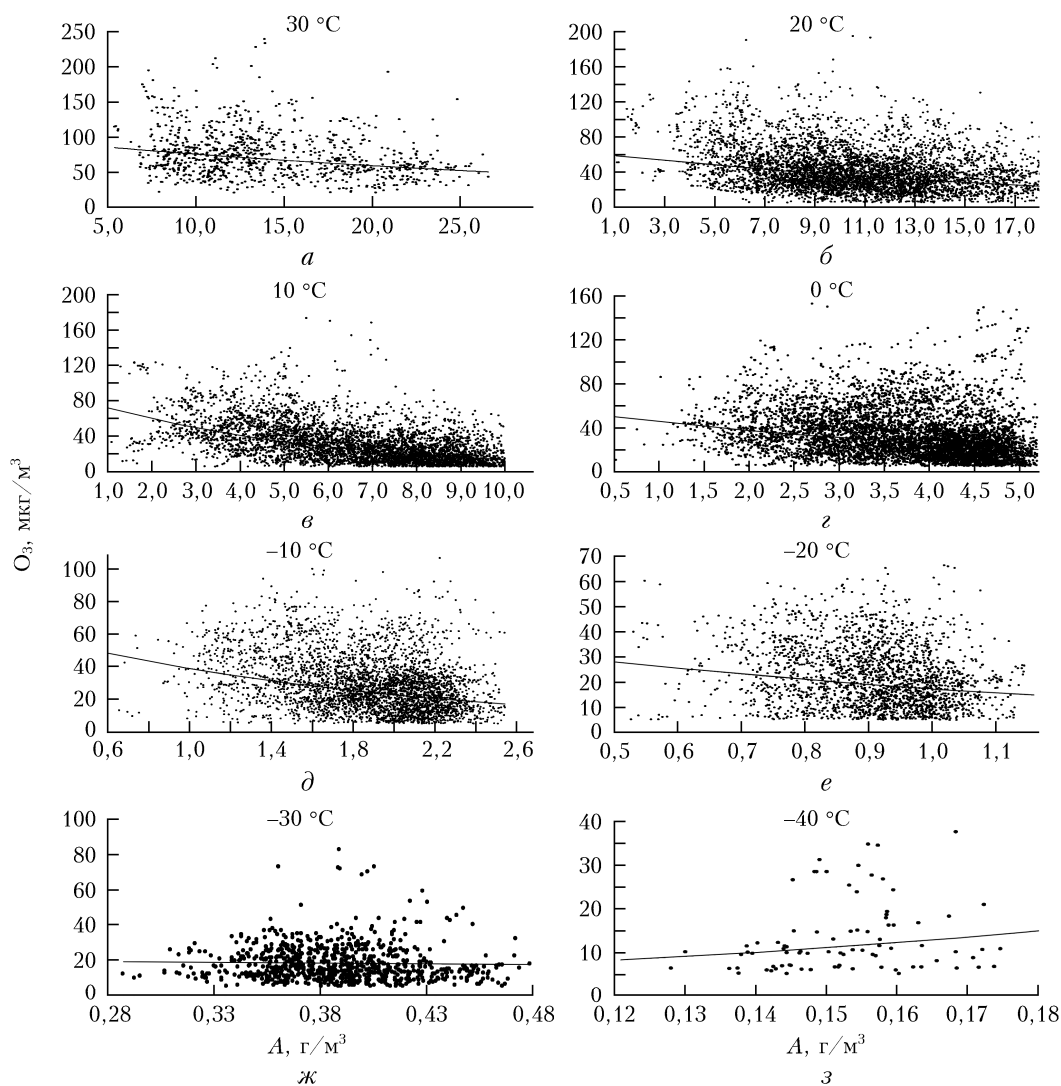


Рис. 1. Изменение концентрации озона в зависимости от абсолютной влажности воздуха при разных температурах воздуха в районе г. Томска

Чтобы сопоставить изменение концентрации озона с величиной абсолютной влажности при разных температурах воздуха, проноормируем ΔO_3 (разница между начальным и конечным значением концентрации озона по линиям тренда на рис. 1) на ΔA — диапазон изменения концентрации водяного пара при данной температуре. Зависимость этого отношения от температуры воздуха приведена на рис. 2.

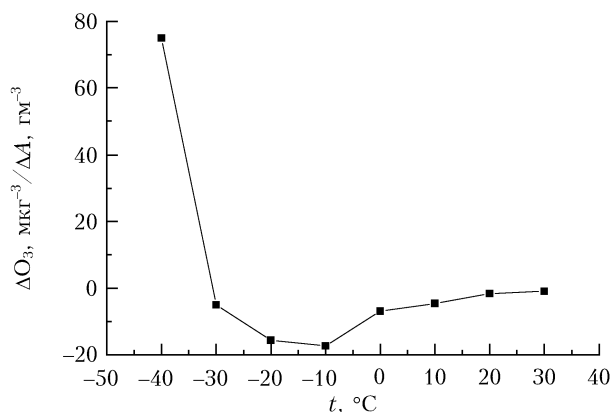


Рис. 2. Относительные изменения концентрации озона в зависимости от абсолютной влажности воздуха при разных температурах воздуха в районе г. Томска с 1994 по 2017 г.

Видно, что при положительных температурах воздуха (0...+30 °C) изменение озона в зависимости от абсолютной влажности незначительно и близко к нулю. Наибольшее падение концентрации озона при увеличении влажности, достигающее $-17,3 \text{ мкг} \cdot \text{м}^{-3} / (\text{г} \cdot \text{м}^{-3})$, наблюдается в диапазоне температур $-20 \dots -10$ °C. При -40 °C происходит конвергенция и рост абсолютной влажности приводит к увеличению концентрации озона с относительной скоростью $77,3 \text{ мкг} \cdot \text{м}^{-3} / (\text{г} \cdot \text{м}^{-3})$.

Заключение

Таким образом, проведенный анализ зависимости изменения концентрации озона от абсолютной влажности воздуха выявил ее нейтральный ход при положительных температурах воздуха и неожиданно большую и знакопеременную изменчивость при отрицательных.

Абсолютная влажность оказывает отрицательное влияние на образование озона в приземном слое воздуха, вызывая уменьшение его концентрации, при 0...-30 °C.

При очень низких температурах (ниже -30 °C) эффект изменяется на положительный со значительным увеличением вклада абсолютной влажности.

Полученные результаты оказались достаточно неожиданными и пока во многом не понятными. Поэтому в дальнейшем требуется более детальный анализ с проверкой по данным другого региона.

Мониторинг состава воздуха осуществлялся в рамках Государственного задания ИОА СО РАН, исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ (грант № 17-05-00374).

1. Лукин В.В., Попович М.П., Ткаченко С.Н. Физическая химия озона. М.: МГУ, 1998. 480 с.
2. Белан Б.Д. Озон в тропосфере. Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2010. 488 с.
3. Monks P.S., Archibald A.T., Colette A., Cooper O., Coyle M., Derwent R., Fowler D., Granier C., Law K.S., Mills G.E., Stevenson D.S., Tarasova O., Thouret V., von Schneidemesser E., Sommariva R., Wild O., Williams M.L. Tropospheric ozone and its precursors from the urban to the global scale from air quality to short-lived climate forcer // *Atmos. Chem. Phys.* 2015. V. 15, N 15. P. 8889–8973.
4. Yadav R., Sahu L.K., Beig G., Jaaffrey S.N.A. Role of long-range transport and local meteorology in seasonal variation of surface ozone and its precursors at an urban site in India // *Atmos. Res.* 2016. V. 176–177. P. 96–107.
5. Gunthe S.S., Beig G., Sahu L.K. Study of relationship between daily maxima in ozone and temperature in an urban site in India // *Curr. Sci.* 2016. V. 110, N 10. P. 1994–1999.
6. Munir S., Habeebullah T.M., Ropkins K., Seroji A.R. Modelling ozone-temperature slope under atypically high temperature in arid climatic conditions of Makkah, Saudi Arabia // *Aerosol Air Quality Res.* 2015. V. 15, N 4. P. 1281–1290.
7. Jasaitis D., Vasiliauskien V., Chadysien R., Peculienne M. Surface ozone concentration and its relationship with UV radiation, meteorological parameters and Radon on the Eastern Coast of the Baltic Sea // *Atmos.* 2016. V. 7, N 27. DOI: 10.3390/atmos7020027.
8. Pavón-Domínguez P., Jiménez-Hornero F.J., Gutiérrez de Ravé E. Proposal for estimating ground-level ozone concentrations at urban areas based on multivariate statistical methods // *Atmos. Environ.* 2014. V. 90. P. 59–70.
9. Toh Y.Y., Lim S.F., von Glasow R. The influence of meteorological factors and biomass burning on surface ozone concentrations at Tanah Rata, Malaysia // *Atmos. Environ.* 2013. V. 70. P. 435–446.
10. Тереб Н.В., Милехин Л.И., Милехин В.Л., Гниломедов В.Д., Нечаев Д.Р., Кулижников Л.К., Широков В.В. Содержание приземного озона в условиях аномального лета 2010 г. по измерениям в г. Обнинске // *Метеорол. и гидрол.* 2013. № 5. С. 14–25.
11. Tawfik A.B., Steiner A.L. A proposed physical mechanism for ozone-meteorology correlations using land-atmosphere coupling regimes // *Atmos. Environ.* 2013. V. 72. P. 50–59.
12. Crutzen P.J., Zimmermann P.H. The changing photochemistry of the troposphere // *Tellus B.* 1991. V. 43, N 4. P. 136–151.
13. Levy H.II. Normal atmosphere: Large radical and formaldehyde concentrations predicted // *Science.* 1971. V. 173, N 3992. P. 141–143.
14. Давыдов Д.К., Белан Б.Д., Антохин П.Н., Антохина О.Ю., Антонович В.В., Аршинова В.Г., Аршинов М.Ю., Ахлестин А.Ю., Белан С.Б., Дудорова Н.В., Ивлев Г.А., Козлов А.В., Пестунов Д.А., Рассказчикова Т.М., Савкин Д.Е., Симоненков Д.В., Скляднева Т.К., Толмачев Г.Н., Фазлиев А.З., Фофанов А.В. Мониторинг атмосферных параметров: 25 лет ТОН-станции ИОА СО РАН // *Оптика атмосф. и океана.* 2018. Т. 31, № 10. С. 845–853; Davydov D.K., Belan B.D., Antokhin P.N., Antokhina O.Yu., Antonovich V.V., Arshinova V.G., Arshinov M.Yu., Akhlyostin A.Yu., Belan S.B., Dudorova N.V., Ivlev G.A., Kozlov A.V., Pestunov D.A., Rasskazchikova T.M., Savkin D.E., Simonenkov D.V., Sklyadnaya T.K., Tolmachev G.N., Fazliev A.Z., Fofonov A.V. Monitoring of atmospheric parameters: 25 years of the Tropospheric

Ozone Research Station of the Institute of Atmospheric Optics, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences // Atmos. Ocean. Opt. 2019. V. 32, N 2. P. 180–192.

15. Белан Б.Д., Савкин Д.Е., Толмачев Г.Н. Зависимость образования озона в приземном слое от темпе-

ратуры воздуха // Оптика атмосф. и океана. 2017. Т. 30, № 11. С. 971–979; *Belan B.D., Savkin D.E., Tolmachev G.N.* Generation of ozone in the surface air layer versus air temperature // Atmos. Ocean. Opt. 2018. V. 31, N 2. P. 187–196.

B.D. Belan, D.E. Savkin. The role of air humidity in variations in the surface ozone concentration.

The dependence of variations in the surface ozone concentration on the absolute air humidity is studied based on measurements at the TOR station in 1994–2017. The analysis performed revealed a neutral dependence at positive temperatures and unexpectedly strong and alternating sign variability at negative temperatures. The absolute air humidity negatively affects the ozone formation in the surface air layer, decreasing the ozone concentration at temperatures of 0...–30 °C. At very low temperatures (lower –30 °C) the effect becomes positive, i.e., the ozone concentration on increases with the absolute air humidity.