

ОПТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И БАЗЫ ДАННЫХ ОПТИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ ОБ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЕ

УДК 551.510.42

Исследование связи снежного покрова и концентрации озона в приземном слое воздуха в районе г. Томска

Б.Д. Белан, Д.Е. Савкин, Г.Н. Толмачев*

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

Поступила в редакцию 20.12.2017 г.

По данным измерений озона в районе г. Томска в 1990–2017 гг. исследуется связь снежного покрова и приземной концентрации озона. Выделено четыре типа сезонного хода озона. К первому относится рост концентрации, который заканчивается весенним максимумом. Он наблюдается в 53,9% случаев. Второй характеризуется медленным ростом и всплеском концентрации после схода снега (19,2%). Третий отличается нейтральным ходом при снеге и резким всплеском концентрации после его схода (15,4%). К четвертому типу отнесен нейтральный ход без весеннего максимума (11,5%). Таким образом, в конце снежного периода весенний максимум концентрации наблюдается в 88,5% случаев. Различия в сезонных ходах в разные годы объясняется температурной зависимостью фотохимической генерации озона в атмосфере.

Ключевые слова: атмосфера, весенний максимум, воздух, газы-прекурсоры, изменение концентрации, озон, снежный покров, температура; *atmosphere, spring maximum, air, gases-precursors, concentration change, ozone, snow cover, temperature.*

Введение

Физико-химические свойства озона определяют его особенную роль в ходе атмосферных процессов [1, 2]. Сильнейшая окислительная способность приводит к разрушению многих материалов и угнетению растительности. Линии поглощения в ИК-спектре вносят заметный вклад в парниковый эффект. В больших концентрациях озон является ядовитым веществом, опасным для человека и животных. Возможные негативные последствия для окружающей среды из-за высокой его концентрации обуславливают необходимость детального исследования механизмов образования озона в атмосфере.

Наблюдающееся в последние десятилетия глобальное потепление климата повышает актуальность исследования озона, так как, по имеющимся оценкам [3–5], с ростом температуры воздуха его концентрация повышается. Например, по данным [6], рост глобальной температуры воздуха на 3 °С приводит к увеличению приземной концентрации озона на 135% в промышленных центрах и на 87% в фоновых районах. В связи с этим большое внимание уделяется изучению роли метеорологических процессов в изменении концентрации приземного озона [7–9]. Таких исследований достаточно много. Обзор влияния температуры на скорость образования О₃ сделана нами в [10]. Имеются данные о связи концентрации озона с абсолютной влажностью [11], аэрозолем [12–14], солнечной радиацией [15–17].

Цикл работ [18–20] посвящен исследованию изменения озона при наличии снежного покрова на поверхности земли. Интерес к снежному покрову обусловлен следующими причинами. Во-первых, для одной и той же поверхности существенно изменяется скорость стока озона [21]. В пользу такого заключения свидетельствуют результаты работы [22], в которой авторы связали весенний максимум концентрации озона с периодом схода снежного покрова. Согласно собранным в [23] данным различия в скорости стока озона на поверхность могут достигать двух порядков. Результаты более поздних работ дают различия уже в три порядка [24, 25], согласно которым скорость стока на снеге может снизиться до 0,01 см/с. Во-вторых, поскольку источник озонаобразующих веществ находится на поверхности земли [26], наличие снега приведет к его экранированию. Соответственно должно резко уменьшиться количество газов-предшественников в воздухе, из которых образуется озон. В-третьих, следует принять во внимание, что параллельно с экранированием источника появление и сход снежного покрова коррелируют с периодом вегетационной активности растительности, которая поставляет органические газы – прекурсоры озона [27, 28]. Органические газы могут составлять более половины исходного объема для образования озона [29, 30]. Помимо этих основных причин, в ряде работ [20, 24, 25] рассматривается дополнительное поглощение озона поверхностью снега за счет накопления в нем галогенов или других антагонистов. Однако это относится, как правило, к морским регионам и для большинства географических районов нехарактерно.

* Борис Денисович Белан (bbd@ia.ru); Денис Евгеньевич Савкин (densavkin88@rambler.ru); Геннадий Николаевич Толмачев (tgn@ia.ru).

К проблеме взаимодействия озона со снежным покровом можно отнести и явление весеннего максимума его концентрации, зафиксированного в ряде мест [31–33]. Его особенность в том, что он не совпадает с солнечным максимумом прихода солнечной радиации, что, учитывая фотохимическую природу образования озона, является пока необъяснимым [34]. Вместе с тем в уже упоминавшейся работе [22] показано, что наличие весеннего максимума связано с ранним или поздним сходом снежного покрова. Имеется и другая точка зрения, которая не связана со снежным покровом. В [35] наступление весеннего максимума концентрации O_3 в приземном слое воздуха объясняется адвекцией и нисходящими движениями.

В настоящей работе рассматривается динамика концентрации озона в период устойчивого снежного покрова в районе г. Томска и оцениваются факторы, ее определяющие.

Для исследования использовались результаты измерений приземной концентрации O_3 и температуры воздуха на TOR-станции. Сведения о расположении станции, приборах и методике измерений приведены в [10]. Для сопоставления применялись данные о высоте снежного покрова, полученные на метеостанции «Томск» (№ 29430) с помощью стандартной методики. Период анализа охватывает

1990–2017 гг., что составляет 26 циклов с устойчивым снежным покровом.

Для удобства данные о годовом ходе представлены не в обычном порядке (зима–осень), а начинаются с осеннего периода. В этом случае период со снежным покровом оказывается в центре рисунка. С целью исключения кратковременных вариаций приземной концентрации O_3 и температуры воздуха данные измерений были предварительно осреднены по пятидневным отрезкам [36]. Таким образом также нивелируются скачки, связанные с прохождением атмосферных фронтов [37].

Результаты исследования

В результате обработки данных не выявлено однозначной связи между наличием снежного покрова и изменением приземной концентрации озона. Все типы сезонного хода мы условно разделили на четыре.

К *первому типу* относятся те сезоны, когда при наличии снежного покрова концентрация O_3 повышается и достигает максимума после его полного схода. В качестве примера на рис. 1, *а* показаны динамика O_3 и высоты снежного покрова в 2013–2014 гг. Таких случаев оказалось больше всего – 14 из 26, или 53,9% (табл. 1).

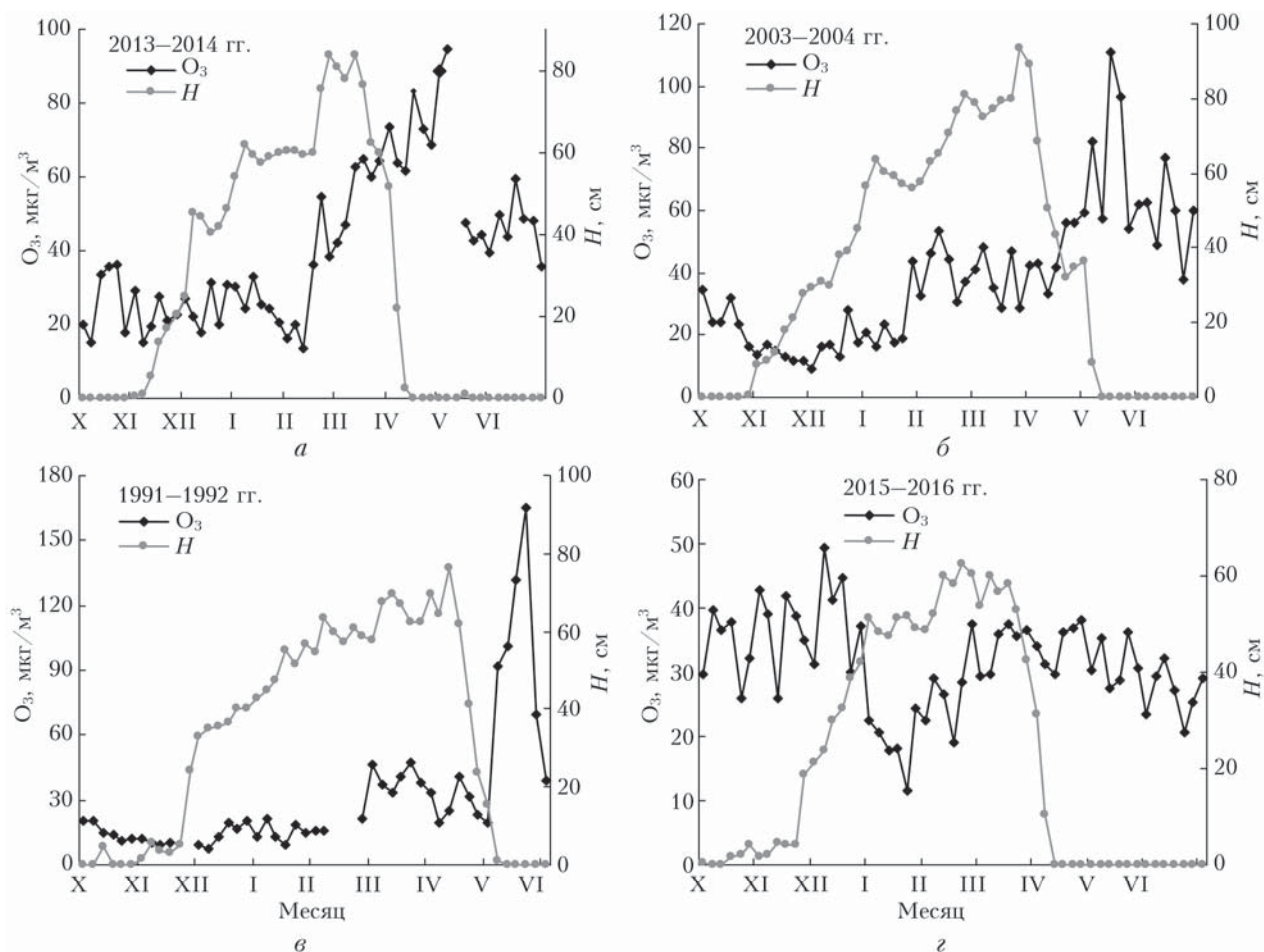


Рис. 1. Изменение приземной концентрации озона и высоты снежного покрова H в районе г. Томска

Таблица 1

Повторяемость разных годовых ходов концентрации озона разных типов в г. Томске в 1990–2017 гг.

| Тип | Число случаев | % |
|-------------------|---------------|------|
| Рост без всплеска | 14 | 53,9 |
| Рост + всплеск | 5 | 19,2 |
| Всплеск | 4 | 15,4 |
| Нейтральный | 3 | 11,5 |

Из рис. 1, *a* видно, что приземная концентрация O_3 непрерывно возрастала от минимума в феврале до максимума в конце мая. При этом снежный покров полностью сошел во второй декаде апреля. Видно также, что после исчезновения снега концентрация O_3 получила дополнительный стимул к росту. Следовательно, в этот период стока если и увеличился, то фотохимическая генерация стала значительно сильнее. По-видимому, с открытой поверхности резко увеличилось поступление газов-предшественников.

Второй тип не сильно отличается от первого. Для него характерен более медленный рост концентрации O_3 при наличии снежного покрова и резкий ее всплеск после его схода (рис. 1, *b*). Таких случаев оказалось 5, или 19,2% (табл. 1).

К *третьему типу* сезонного хода отнесены случаи, когда временная динамика O_3 в период снежного покрова была близка к нейтральной и концентрация резко возрастала после схода снега (рис. 1, *в*). За рассматриваемый период подобный ход концентрации озона фиксировался 4 раза, что составило 15,4% (табл. 1).

Четвертый тип существенно отличается от предыдущих. Он показан на рис. 1, *г* и характеризуется относительно нейтральным ходом приземной концентрации озона. Видно, что по мере увеличения высоты снежного покрова усиливается его экранирующее действие и концентрация O_3 падает. Затем наблюдается небольшой ее рост. Сход снежного покрова заметно не сказывается на содержании озона. Нет увеличения стока на подстилающую поверхность, так как содержание O_3 не падает. Нет также и всплеска концентрации, что отражает отсутствие резкого увеличения поступления озonoобразующих соединений. Скорее всего, процессы стока и генерации в эти годы были сбалансированы. Таких сезонных ходов было зафиксировано меньше всего – 3, или 11,5% (табл. 1).

Следовательно, несмотря на разнообразие сезонных ходов концентрации O_3 при наличии снежного покрова, в 88,5% случаев фиксируется наличие четкого весеннего максимума и в 11,5% – его отсутствие (табл. 2).

Таблица 2

Повторяемость весеннего максимума концентрации озона в районе г. Томска

| Сезонный ход | Число случаев | % |
|-------------------|---------------|------|
| Весенний максимум | 23 | 88,5 |
| Нейтральный | 3 | 11,5 |

Таким образом, снежный покров на подстилающей поверхности оказывает экранирующее действие: с покрытой снегом земли в воздух поступает значительно меньше озonoобразующих веществ [26], поэтому концентрация в ходе фотохимических процессов не увеличивается. Сход снежного покрова «выключает» экран, что отражается в образовании весеннего максимума концентрации O_3 .

Обсуждение результатов

Проведенное сопоставление сезонного хода приземной концентрации озона при наличии снежного покрова не выявило преобладание стока O_3 на подстилающую поверхность после его схода, показанное в [22]. Возможно, это связано с физико-географическими особенностями регионов, для которых проводился анализ. Так, в рассматриваемый период в районе Томска не было зафиксировано ни одного случая раннего схода снега.

После весеннего максимума концентрации наблюдается ее значительное снижение в течение длительного периода (см. рис. 1, *a–в*). По-видимому, такая ситуация создается за счет возобновления вегетационной деятельности растительности, а именно появления листьев на деревьях, роста травы. В этом случае, как показано в ряде работ [38–41], существенно увеличивается поверхность для стока озона и на 2–3 порядка возрастает скорость стока.

Из рис. 1 не совсем понятны различия в сезонном ходе концентрации O_3 при снежном покрове. Этот вопрос частично снимается, если вернуться к результатам работы [10]. На рис. 2, помимо данных об озоне и высоте снежного покрова, приведены сведения о температуре воздуха.

Видно, что в период наличия снежного покрова изменения приземной концентрации озона и температуры происходят почти синхронно. Различия наблюдаются в летний и осенний периоды. Это подтверждает вывод [10] о ведущей роли температуры воздуха в генерации озона в приземном слое воздуха.

Для оценки вида такой связи воспользуемся процедурой, предложенной в [10]. Отличие в подходе будет заключаться в том, что разницу в температурах воздуха (ΔT) и разницу в концентрациях озона (ΔO_3) будем находить между минимальной в период снежного покрова и наибольшей, которая соответствует весеннему максимуму O_3 . Понятно, что в разные годы ΔT и ΔO_3 могут различаться; поэтому для сопоставимости данных пронормируем ΔO_3 на ΔT , чтобы найти скорость увеличения концентрации O_3 в зависимости от роста температуры воздуха в весенний период. Полученные оценки представлены на рис. 3.

Из рисунка видно, что имеется линейная зависимость изменения скорости образования озона от изменения температуры воздуха. Так, при температуре $-35^\circ C$ она составляет $1,2 \text{ мкг} \cdot \text{м}^{-3}/1^\circ C$, при температуре $-10^\circ C$ возрастает до $3,3 \text{ мкг} \cdot \text{м}^{-3}/1^\circ C$. Это значительно меньше, чем получено в [10].

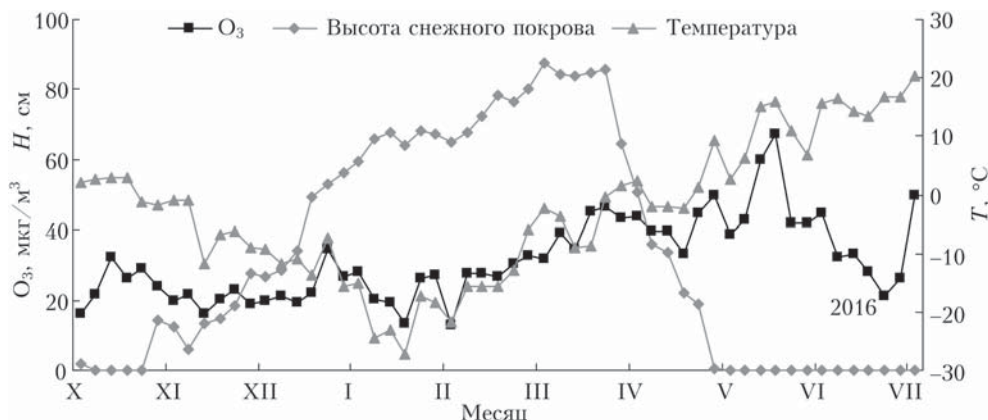


Рис. 2. Изменение приземной концентрации озона, высоты снежного покрова и температуры воздуха в районе г. Томска в 2007–2008 гг.

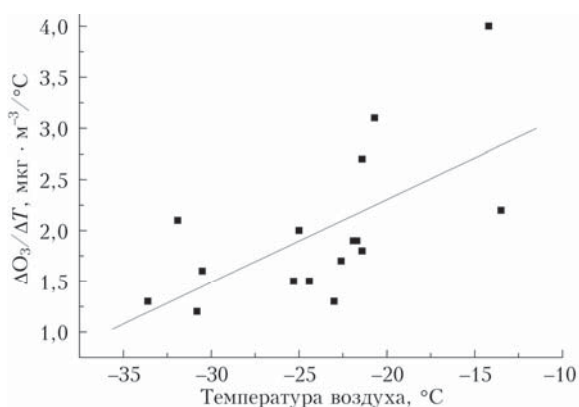


Рис. 3. Изменение скорости образования озона в зависимости от температуры воздуха

Однако надо иметь в виду, что весь процесс идет при отрицательных температурах и оценка выполнена для периода в несколько месяцев.

Заключение

Выполненный анализ связи наличия снежного покрова и изменения приземной концентрации O_3 показал следующее.

В районе г. Томска снежный покров препятствует поступлению в воздух озонобразующих веществ (экранирующее действие), в результате чего содержание озона значительно уменьшается. Сход снежного покрова вызывает увеличение или даже всплеск концентрации O_3 . Наступающее затем снижение концентрации, скорее всего, обусловлено усилением стока на элементах растительности, существенно увеличивающих поверхность взаимодействия.

Наблюдающийся медленный тренд в период наличия снежного покрова объясняется средним ростом температуры воздуха, который определяет скорость фотохимической генерации озона.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 17-05-00374.

1. Луин В.В., Попович М.П., Ткаченко С.Н. Физическая химия озона. М.: МГУ, 1998. 480 с.
2. Разумовский С.В., Зайков Г.Е. Озон и его реакции с органическими соединениями (кинетика и механика). М.: Наука, 1974. 322 с.

3. Zlatev Z. Impact of future climatic changes on high ozone levels in European suburban areas // *Clim. Change*. 2010. V. 101, N 3–4. P. 447–483.
4. Isaksen I.S.A., Berntsen T.K., Dalsøren S.B., Eleftheratos K., Orsolini Y., Rognerud B., Stordal F., Suwde O.A., Zerefos C., Holmes C.D. Atmospheric ozone and methane in a changing climate // *Atmosphere*. 2014. V. 5, N 3. P. 518–535.
5. 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. V. 121, N 10. P. 6112–6129.
6. Melkonyan A., Wagner P. Ozone and its projection in regard to climate change // *Atmos. Environ.* 2013. V. 67. P. 287–295.
7. Coates J., Mar K.A., Ojha N., Butler T.M. The influence of temperature on ozone production under varying NO_x conditions – a modelling study // *Atmos. Chem. Phys.* 2016. V. 16, N 18. P. 11601–11615.
8. Pehmec G., Jakovljevi I., Sisovic A., Beslic I., Vadic V. Influence of ozone and meteorological parameters on levels of polycyclic aromatic hydrocarbons in the air // *Atmos. Environ.* 2016. V. 131. P. 263–268.
9. Kavassalis S.C., Murphy J.G. Understanding ozone-meteorology correlations: A role for dry deposition // *Geophys. Res. Lett.* 2017. V. 44, N 6. P. 2922–2931.
10. Белан Б.Д., Савкин Д.Е., Толмачев Г.Н. Зависимость образования озона в приземном слое от температуры воздуха // *Оптика атмосфер. и океана*. 2017. V. 30, N 11. С. 971–979; Belan B.D., Savkin D.E., Tolmachev G.N. Air-temperature dependence of the ozone generation rate in the surface air layer // *Atmos. Ocean. Opt.* 2018. V. 31, N 2. P. 187–196.
11. Терёб Н.В., Милехин Л.И., Милехин В.Л., Гниломедов В.Д., Нечаев Д.Р., Кулжников Л.К., Широшов В.В. Содержание приземного озона в условиях аномального лета 2010 г. по измерениям в г. Обнинск // *Метеорол. и гидрол.* 2013. № 5. С. 14–25.
12. 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.
13. Jia L., Xu Y. Ozone and secondary organic aerosol formation from Ethylene- NO_x -NaCl irradiations under different relative humidity conditions // *J. Atmos. Chem.* 2016. V. 73, N 1. P. 81–100.
14. Bonasoni P., Cristofanelli P., Calzolari F., Bonafe U., Evangelisti F., Stohl A., Zauli Sajani S., van Dingenen R., Colombo T., Balkanski Y. Aerosol-ozone correlation during dust transport episodes // *Atmos. Chem. Phys.* 2004. V. 4, N 5. P. 1201–1215.

15. Арефьев В.Н., Кашин Ф.В., Милехин Л.И., Милехин В.Л., Терев Н.В., Узнек Л.Б. Концентрация приземного озона в Обнинске в 2004–2010 гг. // Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана. 2013. Т. 49, № 1. С. 74–84.
16. Hoffman S., Sulkowski W., Krzyzanowski K. Sunchine effect on the ozone level in lower layers of the troposphere // Pol. Acad. Ski. 1993. N 42. P. 117–124.
17. Белан Б.Д., Складнева Т.К. Изменение концентрации тропосферного озона в зависимости от интенсивности солнечной радиации // Оптика атмосф. и океана. 1999. Т. 12, № 8. С. 725–729.
18. Helmig D., Ganzeveld L., Butler T., Oltmans S.J. The role of ozone atmosphere-snow gas exchange on polar, boundary-layer tropospheric ozone – a review and sensitivity analysis // Atmos. Chem. Phys. 2007. V. 7, N 1. P. 15–30.
19. Rappenglück B., Ackermann L., Alvarez S., Golovko J., Buhr M., Field R.A., Soltis J., Montague D.C., Hauze V., Adamson S., Risch D., Wilkerson G., Bush D., Stoeckenius T., Keslar C. Strong wintertime ozone events in the Upper Green River basin, Wyoming // Atmos. Chem. Phys. 2014. V. 14, N 10. P. 4909–4934.
20. Van Dam B., Helmig D., Toro C., Doskey P., Kramer L., Murray K., Ganzeveld L., Seok B. Dynamics of ozone and nitrogen oxides at Summit, Greenland: I. Multi-year observations in the snowpack // Atmos. Environ. 2015. V. 123. P. 268–284.
21. Wu Z., Staebler R., Vet R., Zhang L. Dry deposition of O₃ and SO₂ estimated from gradient measurements above a temperate mixed forest // Environ. Pollut. 2016. V. 210. P. 202–210.
22. Людчик А.М., Покаташкин В.И., Гиргждене Р. О связи времени таяния снежного покрова с появлением весеннего максимума озона // Тр. совещания-семинара «Проблема мониторинга приземного (тропосферного) озона и нейтрализация его влияния». М.: ИОФ РАН, 2013. С. 87–91.
23. Белан Б.Д. Озон в тропосфере. Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2010. 488 с.
24. Helmig D., Boylan P., Johnson B., Oltmans S., Fairall C., Staebler R., Weinheimer A., Orlando J., Knapp D.J., Montzka D.D., Flocke F., Frieß U., Sihler H., Shepson P.B. Ozone dynamics and snow-atmosphere exchanges during ozone depletion events at Barrow, Alaska // J. Geophys. Res. 2012. V. 117. P. D20303. DOI: 10.1029/2012JD017531.
25. Seabrook J., Whiteway J. Influence of mountains on Arctic tropospheric ozone // J. Geophys. Res.: Atmos. 2016. V. 121, N 4. P. 1935–1942.
26. Белан Б.Д. Тропосферный озон. 5. Газы – предшественники озона // Оптика атмосф. и океана. 2009. Т. 22, № 3. С. 230–268.
27. Collins W.J., Sitch S., Boucher O. How vegetation impacts affect climate metrics for ozone precursors // J. Geophys. Res. 2010. V. 115. P. D23308. DOI: 10.1029/2010JD014187.
28. Sadiq M., Tai A.P.K., Lombardozzi D., Martin M.V. Effects of ozone–vegetation coupling on surface ozone air quality via biogeochemical and meteorological feedbacks // Atmos. Chem. Phys. 2017. V. 17, N 4. P. 3055–3066.
29. Исидоров В.А. Летучие выделения растений: состав, скорость эмиссии и экологическая роль. СПб.: Алга, 1994. 188 с.
30. Curci G., Beekmann M., Vautard R., Smiatek 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.
31. Feister U., Warmbt W. Long-term surface ozone increase at Arcona // Proc. of Quadrennial Ozone Symposium. Greece. 1980. P. 782–787.
32. Volz A., Kley D. Evaluation of the Montsouris series of ozone measurements made in the nineteenth century // Nature. 1988. V. 332, N 6161. P. 240–242.
33. Cartalis C., Varotsos C. Surface ozone in Athens, Greece, at the beginning and at the end of the twentieth century // Atmos. Environ. 1994. V. 28, N 1. P. 3–8.
34. Monks P.S. A review of the observations and origins of the spring ozone maximum // Atmos. Environ. 2000. V. 34, N 21. P. 3545–3561.
35. Kalabokas P., Hjorth J., Foret G., Dufour G., Eretenko M., Siour G., Cuesta J., Beekmann M. An investigation on the origin of regional springtime ozone episodes in the western Mediterranean // Atmos. Chem. Phys. 2017. V. 17, N 6. P. 3905–3928.
36. Воробьев В.И. Синоптическая метеорология. Л.: Гидрометеоиздат, 1991. 616 с.
37. Аршинова В.Г., Белан Б.Д., Рассказчикова Т.М., Рогов А.Н., Толмачев Г.Н. Изменение концентрации озона в приземном слое воздуха при прохождении атмосферных фронтов // Оптика атмосф. и океана. 1995. Т. 8, № 4. С. 625–631.
38. Zapletal M., Cudlín P., Chroust P., Urban O., Pokorný R., Edwards-Jonášová M., Czerný R., Janou D., Taufarová K., Vecera Z., Mikuska P., Paoletti E. Ozone flux over a Norway spruce forest and correlation with net ecosystem production // Environ. Pollut. 2011. V. 159, N 5. P. 1024–1034.
39. Fares S., Savi F., Muller J., Matteucci G., Paoletti E. Simultaneous measurements of above and below canopy ozone fluxes help partitioning ozone deposition between its various sinks in a Mediterranean Oak Forest // Agric. For. Meteorol. 2014. V. 198–199. P. 181–191.
40. Wu Z.Y., Zhang L., Wang X.M., Munger J.W. A modified micrometeorological gradient method for estimating O₃ dry depositions over a forest canopy // Atmos. Chem. Phys. 2015. V. 15, N 13. P. 7487–7496.
41. Franz M., Simpson D., Arneth A., Zaehle S. Development and evaluation of an ozone deposition scheme for coupling to a terrestrial biosphere model // Biogeosciences. 2017. V. 14, N 1. P. 45–71.

B.D. Belan, D.E. Savkin, G.N. Tolmachev. Study of the relationship between snow cover and ozone concentration in the surface air layer.

The relationship between snow cover and surface ozone concentration is studied on the basis of measurements near Tomsk in 1990–2017. Four types of the seasonal ozone variations are revealed: (1) concentration growth which ends with a spring maximum (53.9% of cases); (2) slow growth and a surge in the concentration after the snow cover melting (19.2%); (3) neutral behavior during the snow cover period and a sharp surge in the concentration after the snow cover melting (15.4%); and (4) neutral behavior without spring maximum (11.5%). Thus, at the end of the snow cover period, the spring maximum of ozone concentration is observed in 88.5% of cases. Differences in the seasonal variations in different years are explained by the temperature dependence of photochemical ozone generation in the atmosphere.