

Многолетняя изменчивость озона и аэрозоля в районе Томска и оправдываемость прогноза их среднегодовых концентраций на десятилетие

П.Н. Антохин¹, М.Ю. Аршинов^{1,2}, Б.Д. Белан¹, С.Б. Белан¹,
Т.К. Складнева¹, Г.Н. Толмачев^{1*}

¹Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН

634021, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1

²Томский государственный университет

634050, г. Томск, пр. Ленина, 36

Поступила в редакцию 17.05.2010 г.

Рассматриваются многолетние изменения концентрации озона и аэрозоля в районе Томского академгородка, которые авторы связывают с солнечной активностью. Сопоставляются результаты прогноза, данного на 23-й цикл солнечной активности, с фактическими данными. Оказалось, что прогноз почти полностью оправдался для аэрозоля и значительно хуже для озона. Составлен прогноз на следующий 24-й 11-летний цикл.

Ключевые слова: озон, аэрозоль, солнечная активность, прогноз; ozone, aerosol, solar activity, forecast.

Введение

Ряд данных, полученных на горе Пик-ду-Миди, показывает, что с момента промышленной революции (конец XIX в.) по настоящее время концентрация озона повысилась в 5 раз [1]. При этом бюджет озона в тропосфере возрос от 71 до 88 Тг [2]. Этот процесс повышения концентрации озона на Пик-ду-Миди продолжается и в настоящее время [3].

Вместе с тем развернувшиеся во многих местах планеты исследования тропосферного озона показывают, что, по-видимому, в глобальном плане его концентрация близка к насыщению. Положительный тренд сохраняется, как правило, в городах, где имеются выбросы газов-предшественников [4–8]. На большинстве измерительных пунктов фиксируются изменения концентрации с периодичностью от нескольких до десятков лет [9–19], причем, как показало сопоставление длинных рядов, характер их изменения для большинства мест похож [20, 21].

Измерения концентрации озона и счетной концентрации аэрозоля в приземном слое воздуха, выполненные в районе г. Томска, выявили наличие подобных периодичностей и в этом регионе. Анализ периодичности изменения концентрации озона и аэрозоля показал, что она близка к 11-летней [22, 23]. Аналогичные результаты получены и в [24, 25].

Поиск возможных причин 11-летней периодичности изменения концентрации аэрозоля был описан

в [23]. Рассмотрены и отвергнуты гипотезы об антропогенной природе тренда и о его поствулканическом (Эль-Чичон и Пинатубо) происхождении. Оказалось, что изменение счетной концентрации лучше всего коррелирует с формами W , E и C общей циркуляции, введенными А.Л. Кацем, которые, как известно, определяются солнечной активностью [26].

С одной стороны, солнечная активность определяет ход самых разных процессов на Земле, будь то живая или неживая природа [27, 28]. С другой стороны, механизм передачи сигнала от Солнца в тропосферу Земли до сих пор не установлен. Более менее понятен лишь механизм воздействия на стратосферу [29, 30]. Относительно тропосферы корреляционные связи устанавливаются, но механизм не указывается. Это касается, например, давления и циркуляции воздуха [31–35] и ряда других параметров и компонент.

В [36] были проанализированы возможные механизмы взаимосвязи изменения концентрации озона и аэрозоля с солнечной активностью. На основании многолетних экспериментов [37–39] по воздействию ультрафиолетовой радиации на растительность мы пришли к выводу, что такая периодичность обусловлена ее реакцией на вариации УФ-компоненты солнечной радиации. На основании выявленной связи между солнечной активностью и концентрациями озона и аэрозоля была выведена эмпирическая зависимость с помощью кросскорреляционного анализа [36]. Воспользовавшись ею и прогнозом солнечной активности, сделанным в [40, 41], мы спрогнозировали ход озона и аэрозоля в 23-м цикле [36].

В данной статье рассматривается изменение концентрации озона и аэрозоля за прошедший период,

* Павел Николаевич Антохин; Михаил Юрьевич Аршинов (michael@iao.ru); Борис Денисович Белан (bbd@iao.ru); Сергей Борисович Белан; Татьяна Константиновна Складнева (tatyana@iao.ru); Геннадий Николаевич Толмачев (tgn@iao.ru).

насколько оправдался многолетний прогноз, и по данным предсказанных изменений солнечной активности дается прогноз на следующий 11-летний цикл.

1. Изменение концентрации озона и аэрозоля в последнем десятилетии

Напомним, что измерения озона и аэрозоля выполняются в приземном слое воздуха в районе Томского академгородка с помощью TOR-станции. Описание ее имеется в [42]. Там же приведены характеристики приборов и временной график измерений.

Обратимся к рис. 1, на котором показаны среднегодовые концентрации приземного озона и среднегодовые значения счетной концентрации аэрозольных частиц диаметром более 0,4 мкм.

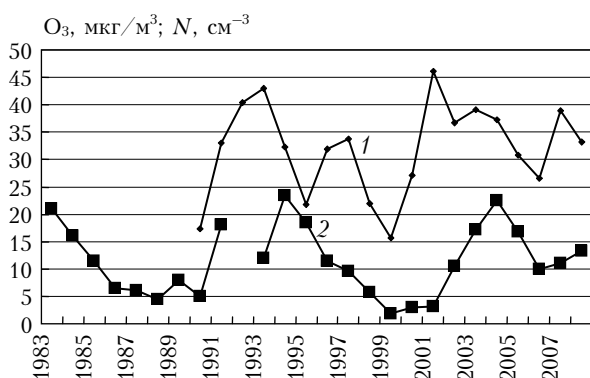


Рис. 1. Многолетний ход концентрации озона (1) и счетной концентрации аэрозоля (2) в приземном слое воздуха в районе г. Томска

Из рис. 1 видно, что с 1983 по 1989 г. счетная концентрация аэрозоля упала с 22 до 4 см⁻³, т.е. более чем в 5 раз. В 1995 г. она восстановилась и даже превысила исходное значение — 24 см⁻³. Затем вновь начался процесс падения. Второй минимум — 2 см⁻³ — наблюдался в 1999 г. После этого счетная концентрация вновь начала расти и в 2004 г. превысила 23 см⁻³, после чего зафиксирован, скорее всего, вторичный минимум 10 см⁻³. Таким образом, за рассмотренный 20-летний период концентрация частиц трижды возрастала при двух минимумах. Причем в отличие от других малых примесей атмосферы ее изменения происходили не в процентах, а в кратное количество раз.

Рис. 1 показывает, что концентрация озона за период измерений дважды достигала в максимумах 40–45 мкг/м³ и в 1999 г. опускалась до значений примерно 20 мкг/м³. При этом моменты наступления максимумов и минимумов у озона и аэрозоля близки по времени. С учетом фотохимической природы образования обоих компонентов в атмосфере такой взаимный ход представляется не случайным.

Существенные вариации среднегодовых значений концентрации озона и аэрозоля вызывают обычно некоторое сомнение. Для проверки полученных результатов нами были обработаны данные мировой озонометрической сети [43], которые представлены на рис. 2. Поскольку концентрация озона существенно

отличается по регионам, среднегодовые значения были пронормированы на минимальное значение на каждой станции.

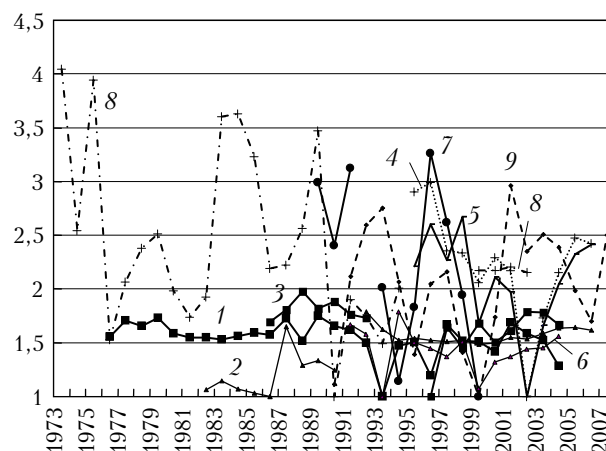


Рис. 2. Многолетнее изменение концентрации озона на мировой сети озонометрических станций, нормированное на минимальное значение: 1 — Tutuila (Cape Matatula); 2 — Neumayer; 3 — McMurdo; 4 — Ushuaia; 5 — Ushuaia; 6 — Baring Head; 7 — Funchal; 8 — Lisboa/Gago Coutinho; 9 — Tomsk

Из рис. 2 видно, что район Томска по вариациям озона не является исключительным. Имеются станции, на которых вариации его концентрации бывают и больше. К сожалению, подобных длинных рядов не удалось обнаружить для аэрозоля, а имеющиеся данные об аэрозольной оптической толщине не обнаруживают процессов в приземном слое. Они лучше отражают вулканическую деятельность.

2. Сопоставление измеренных и спрогнозированных концентраций

В связи с тем что между экстремумами концентрации озона и аэрозоля имеется определенный сдвиг, проведем сопоставление прогнозируемых и фактических их изменений отдельно. Эти данные приведены на рис. 3.

Из рис. 3, а видно, что фактические изменения концентрации озона были на большом участке значительно ниже спрогнозированных. И наоборот, в минимуме активности оказались выше.

Для счетной концентрации аэрозоля прогноз выполнен чуть ли не на 100% (рис. 3, б).

Пока трудно комментировать такие совпадения и расхождения, поскольку это был первый опыт. Возможно, сказалось действие конкурирующих процессов. К ним относятся: Эль-Ниньо [44, 45], Североатлантическое [46] и Арктическое [47] колебания, поствулканическое действие [48–50], неоднородность скорости вращения Земли или орбиты [51–53]. Конечно, эти факторы очень важны и могут воздействовать на глобальные атмосферные процессы. Вместе с тем они в той или иной степени связаны с солнечной активностью, с одной стороны. С другой — солнечная энергия является основным источником

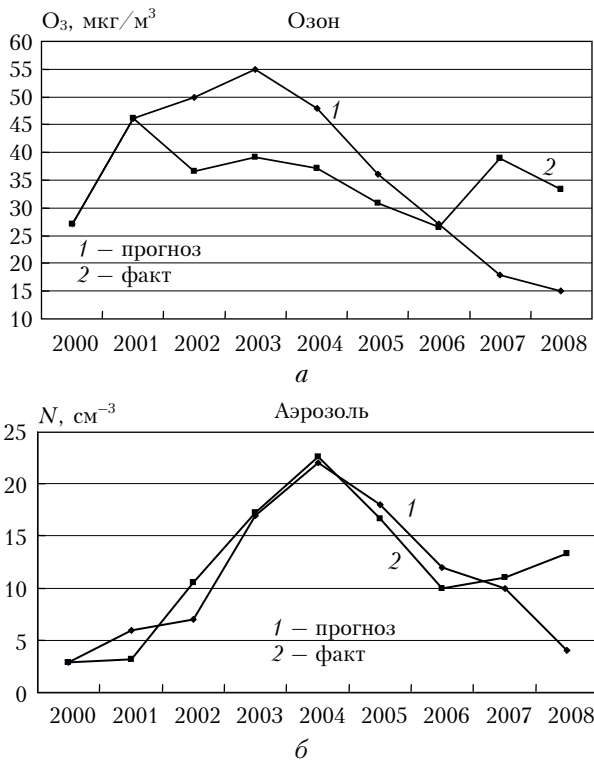


Рис. 3. Сопоставление предсказанных и фактических многолетних изменений: а – озона; б – аэрозоля

энергии для атмосферы, В связи с этим представляется, что конкурирующие процессы будут «замывать» действие солнечной активности при отрицательном вкладе. Но при всем этом солнечная энергия и ее вариации будут первичны.

Возможно, причиной отклонений является необычно затянувшийся минимум солнечной активности, на который обратили внимание астрофизики [54, 55].

3. Прогноз изменения среднегодовой концентрации аэрозоля и озона в следующем цикле солнечной активности

В отличие от прогноза атмосферных процессов, долговременные предсказания солнечной активности более надежны. Из многочисленных прогнозов солнечной активности были отобраны два, которые опубликованы в [56, 57].

С использованием этих данных и эмпирической зависимости, установленной в [36], был составлен прогноз изменения среднегодовой концентрации озона и аэрозоля в 24-м цикле солнечной активности.

Основные его параметры следующие.

Максимум концентрации озона должен наблюдаться в 2014 г. со значением 37 мг/м³ по обоим прогнозам. Минимум концентрации – в 2020 г. Значение концентрации в минимуме по одному прогнозу 16 мг/м³, по второму 24 мг/м³.

Максимум концентрации аэрозоля должен наблюдаться в 2015 г. со значением 20,5 см⁻³ по обо-

им прогнозам, минимум концентрации – в 2021 г. Значение концентрации в минимуме по одному прогнозу 6 см⁻³, по второму 8 см⁻³.

Поскольку мониторинг аэрозоля и озона продолжается в районе г. Томска, то дальнейшие измерения покажут, насколько точен данный прогноз.

Работа выполнена при поддержке программ: Президиума РАН № 16 «Окружающая среда в условиях изменяющегося климата: экстремальные природные явления и катастрофы», Отделения наук о Земле РАН № 5 «Наноразмерные частицы в природе и в техногенных продуктах: условия нахождения, физические и химические свойства и механизмы образования», гранта РФФИ № 08-05-92499, госконтрактов Роснауки № 02.518.11.7153 и 02.740.11.0674.

1. *Bojkov R.* Tropospheric ozone, its changes and possible radiative effects // WMO. 1995. V. 16. P. 94–127.
2. *Lamarque J.-F., Hess P., Emmons L., Buja L., Washington W., Granier C.* Tropospheric ozone evolution between 1890 and 1990 // J. Geophys. Res. 2005. V. 110. D08304, doi: 10.1029/2004JD005537.
3. *Marenco A., Gourget H., Nedelic Ph., Pages J.-P., Karcher F.* Evidence of a long-term increase in tropospheric ozone from Pic du Midi data series: Consequences: Positive radiative forcing // J. Geophys. Res. D. 1994. V. 99, N 8. P. 16617–16632.
4. *De Leeuw F.A.A.M.* Trends in ground level ozone concentrations in the European Union // Environ. Sci. Policy. 2000. V. 3, N 2. P. 189–199.
5. *Sandroni S., Anfossi D.* Trend a ozone in the free troposphere above Europe // Nuovo Cim. 1995. V. 18, N 5. P. 497–503.
6. *Jenkin M.E.* Trends in ozone concentration distribution in the UK since 1990: Local, regional and global influences // Atmos. Environ. 2008. V. 42, N 21. P. 5434–5445.
7. *Dollard G., Fowler D., Smith R.I., Hjellbrekke A.-G., Uhse K., Wallasch M.* Ozone measurements in Europe // Water Air Soil Pollut. 1995. V. 85, N 4. P. 1949–1954.
8. *Chou Ch.-K., Liu Sh.C., Lin Ch.-Y., Shin Ch.-J., Chang K.-H.* The trend of surface ozone in Taipei, Taiwan, and its causes: Implications for ozone control strategies // Atmos. Environ. 2006. V. 40, N 21. P. 3898–3908.
9. *Gardner M.W., Dorling S.R.* Meteorologically adjusted trends in UK daily maximum surface ozone concentrations // Atmos. Environ. 2000. V. 34, N 2. P. 171–176.
10. *Bronnimann S., Buchmann B., Wanner H.* Trends in near-surface ozone concentrations in Switzerland: the 1990s // Atmos. Environ. 2002. V. 36, N 17. P. 2841–2852.
11. *Harris J.M., Dlugokencky E.J., Oltmans S.J., Tans P.P., Conway T.J., Novelly P.C., Thoning K.W.* An interpretation of trace gas correlations during Barrow, Alaska, winter dark periods, 1986–1997 // J. Geophys. Res. D. 2000. V. 105, N 13. P. 17267–17278.
12. *Girgzdiene R., Girgzdys A.* Analysis of the ozone trend in Lithuania during 1982–2002 // Proc. Quadrennial Ozone Symposium. Kos, Greece. 2004. P. 874–875.
13. *Saliba M., Ellul R., Camilleri L., Gusten H.* A 10-year study of background surface ozone concentrations on the island of Gozor in the Central Mediterranean // J. Atmos. Chem. 2008. V. 60, N 2. P. 117–135.
14. *Zanis P., Schuepbach E., Scheel H.E., Baudenbacher M., Buchmann B.* Inhomogeneities and trends in the surface ozone record (1988–1996) at Jungfrauoch in the Swiss Alps // Atmos. Environ. 1999. V. 33, N 23. P. 3777–3786.
15. *Libiseller C., Grimvall A., Walden J., Saari H.* Meteorological normalization and non-parametric smoothing for

- quality assessment and trend analysis of tropospheric ozone data // *Environ. Monit. Assess.* 2005. V. 100, N 1. P. 33–52.
16. *Derwent R.G., Simmonds P.G., Manning A.J., Spain T.G.* Trends over a 20-year period from 1987 to 2007 in surface ozone at the atmospheric research station, Mace Head, Ireland // *Atmos. Environ.* 2007. V. 41, N 39. P. 9091–9098.
 17. *Ainsline B., Steyn D.G.* Spatiotemporal trends in episodic ozone pollution in the Lower Fraser valley, British Columbia, in relation to mesoscale atmospheric circulation patterns and Emissions // *J. Appl. Meteorol.* 2007. V. 46, N 10. P. 1631–1644.
 18. *Звягинцев А.М., Крученицкий Г.М., Черников А.А.* Долговременные изменения содержания озона в тропосфере // *Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана.* 2005. Т. 41, № 1. С. 66–77.
 19. *Звягинцев А.М., Крученицкий Г.М.* Приземная концентрация озона в окрестностях Москвы в 1991–1999 гг. // *Оптика атмосфер. и океана.* 2000. Т. 13, № 2. С. 175–178.
 20. *Oltmans S.J., Lefohn A.S., Harris J.M., Galbally I., Scheel H.E., Bodeker G., Brunke E., Claude H., Tarasik D., Johnson B.J., Simmonds P., Snadwick D., Anlauf K., Hayden K., Schmidlin F., Fujimoto N., Akagi R., Meyer C., Nichol S., Davies J., Redondas A., Cuevas E.* Long-Term Changes in tropospheric ozone // *Atmos. Environ.* 2006. V. 40, N 17. P. 3156–3173.
 21. *Звягинцев А.М.* О сходстве долговременных рядов наблюдений приземного озона на станциях Долгопрудный Московской области и Бельск, Польша // *Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана.* 2003. Т. 39, № 4. С. 510–514.
 22. *Аршинова В.Г., Белан Б.Д., Воронцова Е.В., Задде Г.О., Рассказчикова Т.М., Семьянова О.И., Складнева Т.К., Толмачев Г.Н.* Анализ природы долговременного тренда аэрозоля в тропосфере над Западной Сибирью // *Оптика атмосфер. и океана.* 1997. Т. 10, № 8. С. 926–933.
 23. *Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Ковалевский В.К., Плотников А.П., Складнева Т.К., Толмачев Г.Н.* Многолетняя изменчивость тропосферного аэрозоля над Западной Сибирью // *Оптика атмосфер. и океана.* 2000. Т. 13, № 6–7. С. 627–630.
 24. *Chandra S., Ziemke J.R., Stewart R.W.* An 11-year solar cycle in tropospheric ozone from TOMS measurements // *Geophys. Res. Lett.* 1999. V. 26, N 2. P. 185–188.
 25. *Erbotseder T., Eyring V., Bittner M., Dameris M., Grewe V.* Hemispheric ozone variability indices derived from satellite observations and comparison to a coupled chemistry-climate model // *Atmos. Chem. Phys.* 2006. V. 6, N 12. P. 4105–5120.
 26. *Вительс Л.А.* Синоптическая метеорология и гелиогеофизика. Л.: Гидрометеиздат, 1977. 256 с.
 27. *Чижевский А.Л.* Земное эхо солнечных бурь. М.: Мысль, 1973. 350 с.
 28. *Владимирский Б.М., Темуриянц Н.А.* Влияние солнечной активности на биосферу–ноосферу (Гелиобиология от А.Л. Чижевского до наших дней). М.: Изд-во МНЭПУ, 2000. 374 с.
 29. *Логинов В.Ф., Ракитова Л.Р., Сухомазова Г.И.* Эффекты солнечной активности в стратосфере. Л.: Гидрометеиздат, 1980. 80 с.
 30. *Labitzke K., Austin J., Butchart N., Knight J., Takahashi M., Nakamoto M., Nagashima T., Haigh J., Williams V.* The global signal of the 11-year solar cycle in the stratosphere: observations and models // *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* 2002. V. 64, N 2. P. 203–210.
 31. *Егоров А.Г.* Два варианта колебаний приземного давления во внетропической зоне Северного полушария в зависимости от многолетних изменений солнечной активности // *Метеорол. и гидрол.* 2008. № 10. С. 9–23.
 32. *Егоров А.Г.* Солнечно обусловленные барические колебания в Арктике и многолетняя повторяемость ледовой оппозиции в Арктических морях России // *Докл. РАН.* 2005. Т. 401, № 2. С. 242–247.
 33. *Смирнов Р.В.* Гелиогеофизические факторы в изменчивости системы океан – атмосфера // *Биофизика.* 1998. Т. 43, вып. 4. С. 689–693.
 34. *Вовк В.Я., Егорова Л.В., Москвин И.В.* Влияние наземного возрастания космических лучей на характеристики атмосферы в Антарктиде // *Геомagnetизм и аэрономия.* 1999. Т. 39, № 3. С. 111–114.
 35. *Coughlin K., Tung K.K.* Eleven-year solar cycle signal throughout the lower atmosphere // *J. Geophys. Res.* 2004. V. 109. D21105, doi: 10.1029/2004JD004873.
 36. *Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Ковалевский В.К., Рассказчикова Т.М., Складнева Т.К., Толмачев Г.Н.* Роль солнечной активности в многолетней изменчивости фотохимических компонентов воздуха в нижней тропосфере // *Оптика атмосфер. и океана.* 2002. Т. 15, № 12. С. 1056–1071.
 37. *Sullivan J.H., Teramura A.N.* The effects of ultraviolet-B radiation on loblolly pines. 2. Growth of field-grown seeding // *Trees.* 1992. V. 6, N 1. P. 115–120.
 38. *Teramura A.H., Sullivan J.H.* Effects of UV-B radiation on photosynthesis and growth of terrestrial plants // *Photosyn. Res.* 1994. V. 39, N 3. P. 463–473.
 39. *Teramura A.H., Sullivan J.H.* Annual Report to the US Environmental Protection Agency. The effect of Changing Climate and Stratospheric Ozone Modification on plants. University of Maryland, College Park, MD, 1988. 11 p.
 40. *Панкратов А.К., Норманнский В.Я., Владимирский Б.М.* Фазовая диаграмма солнечной активности и прогноз активности на предстоящий 23-й цикл // *Биофизика.* 1998. Т. 43, вып. 5. С. 883–887.
 41. *Schatten K., Hoyt D.* Solar cycle 23 forecast update // *Geoph. Res. Lett.* 1998. V. 25, N 5. P. 599–601.
 42. *Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Давыдов Д.К., Ковалевский В.К., Плотников А.П., Покровский Е.В., Складнева Т.К., Толмачев Г.Н.* Автоматический пост для мониторинга малых газовых составляющих атмосферного воздуха // *Метеорол. и гидрол.* 1999. № 3. С. 110–118.
 43. *WMO WDCGG Data summary.* 2009. N 33. 99 p.
 44. *Клименко В.В.* Изменение глобального климата: естественные факторы и прогноз // *Экономика. Техника. Экология.* 1994. № 2. С. 11–17.
 45. *Ясаманов Н.А.* Антропогенез и современные изменения климата // *Жизнь Земли. Природа и общество.* М.: МГУ, 1993. С. 31–42.
 46. *Kurida Y., Yamazaki K., Shibata K.* Role of ozone in the solar cycle modulation of the North Atlantic Oscillation // *J. Geophys. Res.* 2008. V. 113. D14122, doi: 10.1029/2007JD009336.
 47. *Huth R., Vochnicek J., Heida P.* The 11-year solar cycle affects the intensity and annuality of the Atlantik Oscillation // *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* 2007. V. 69, N 9. P. 1095–1109.
 48. *Логинов В.Ф.* Вулканические извержения и климат. Л.: Гидрометеиздат, 1984. 64 с.
 49. *Robock A., Mao J.* Winter warning from large volcanic eruptions // *Geophys. Res. Lett.* 1992. V. 19, N 14. P. 2405–2408.
 50. *Дроздов О.А., Малкова И.В.* Уточнение воздействия эруптивного вулканизма на климат // *Вестн. С.-Петербург. ун-та.* 1994. Сер. 7. Вып. 2. С. 46–60.
 51. *Слепцов-Шевлевич Б.А.* О ротационном механизме солнечно-земных связей // *Докл. РАН.* 1998. Т. 361, № 1. С. 109–112.
 52. *Charvatova I.* Solar-Terrestrial and climatic phenomena in relation to solar inertial motion // *Surv. Geophys.* 1997. V. 18, N 2–3. P. 131–146.

53. *Завалишин Н.Н.* Оценка влияния смещения Солнца от центра инерции на температуру тропосферы // Оптика атмосф. и океана. 2009. Т. 22, № 1. С. 31–33.
54. *Фиолетов С.* Капризы светила // Поиск. 2009. № 38. С. 24.
55. *Livingston W., Penn M.* Are sunspots different during this solar minimum? // EOS. 2009. V. 90, N 30. P. 257–258.
56. *Echer E., Rigozo N.R., Nordemann D.J.R., Vieira L.E.A.* Prediction of solar activity on the basis of spectral characteristics of sunspot number // Ann. Geophys. 2004. V 22, N 6. P. 2239–2243.
57. *Uwamahoro J., McKinnell L.-A., Cilliers P.J.* Forecasting solar cycle 24 using neural networks // J. Atmos. Sol.-Terr. Phys. 2009. V. 71, N 5. P. 569–574.

P.N. Antokhin, M.Yu. Arshinov, B.D. Belan, S.B. Belan, T.K. Sklyadneva, G.N. Tolmachev. **Many-year variability of ozone and aerosol near Tomsk and justification of the ten-year prediction of their yearly average concentrations.**

Long-term changes of concentration of ozone and an aerosol in area of the Tomsk Academgorodok, which authors connect to solar activity are considered. Results of the forecast, given for 23 cycle of solar activity are compared to the actual data. It turned out that the forecast almost completely was justified for the aerosol and was much worse for ozone. The forecast on the following twenty fourth 11-years cycle is made.