

Долговременные тренды изменений общего содержания озона по данным наземных (Томск: 56,48° с.ш., 85,05° в.д.) и спутниковых измерений

О.Е. Баженов*

*Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634021, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1*

Поступила в редакцию 18.04.2011 г.

Проводится сравнение результатов наземных измерений общего содержания озона (ОСО) в Томске (56,48° с.ш., 85,05° в.д.) с использованием озонметра М-124 со спутниковыми данными, полученными с помощью аппаратуры TOMS. Рассматриваются различные алгоритмы восстановления ОСО из спутниковых данных. Анализируются тренды ОСО над Томском и в некоторых точках Северного полушария за период 1979–2010 гг. По данным спутниковых и наземных измерений для Томска наблюдается отрицательный линейный тренд, составляющий $(-2,3 \pm 0,1)$ е.Д. в год, для периода 1979–1995 гг. и положительный тренд, составляющий $(1,08 \pm 0,1)$ е.Д. в год, для периода 1996–2010 гг.

Ключевые слова: общее содержание озона, временной ряд, тренд; total ozone content, time series, trend.

Введение

Регистрируемое современными наземными и спутниковыми средствами измерений общее содержание озона (ОСО) значительно уменьшалось с начала 1980-х до середины 1990-х гг. Спад до середины 90-х гг. чаще всего принято связывать с химическим разрушением озона вследствие роста концентраций озоноразрушающих веществ (ОРВ) в стратосфере. Со второй половины 1990-х гг. по настоящее время практически повсеместно наблюдается [1, 2] прекращение деструкции озонового слоя или же намечается тренд роста ОСО, что особенно заметно в средних и высоких широтах Северного полушария. Одновременно наметились стабилизация и уменьшение эффективного эквивалента стратосферного хлора (ЭЭСХ), который характеризует концентрацию ОРВ (рос примерно до 1996 г. [1, 2]); данную тенденцию связывают с реализацией Международного Монреальского протокола и последующих поправок к нему, которые начали действовать с 1989 г. и предусматривают ограничение производства и выбросов в атмосферу ОРВ.

Однако привязка озонного тренда к изменениям ОРВ является сложной задачей в связи с многообразием факторов, дающих собственный вклад в изменчивость и тренды озона, в частности в средних широтах. Выделяют и рассматривают следующие

основные факторы, которые могут иметь характер кратковременного или долговременного природного и антропогенного воздействия: химические атмосферные процессы, атмосферная динамика, температурно-климатические изменения, солнечная активность, вулканические возмущения стратосферы. Эти процессы, в свою очередь, в той или иной степени взаимосвязаны, и усиление или ослабление одного фактора может влиять на изменение степени влияния другого фактора и, в конечном итоге, на изменения содержания озона в определенных регионах.

В многочисленных публикациях [3–13] отмечается, что наблюдаемый и прогнозируемый рост ОСО, особенно выраженный в средних и высоких широтах Северного полушария, не может быть объяснен лишь сокращением ЭЭСХ и всесторонне рассматривается влияние различных факторов на изменения ОСО.

При помощи численных моделей прогнозируется, что стратосферный озон и галогены вернуться к уровню 1980 г. в разное время. Ожидается, что ОСО восстановится в период 2035–2050 гг., а неорганические соединения хлора в стратосфере сократятся до уровня 1980 г. после 2050 г. Рассогласование в поведении вызвано тем, что процессы восстановления озона существенно зависят от температуры и интенсивности стратосферного переноса, которые претерпели значительные изменения с 80-х гг. XX в. [3, 10]. Рост концентрации парниковых газов ведет к охлаждению стратосферы и соответствующему росту концентрации озона в верхней стратосфере,

* Олег Елисеевич Баженов (boe@iao.ru).

так как газофазные реакции фотохимического разрушения озона сильно зависят от температуры [4, 5].

Кроме того, результаты численного моделирования указывают на то, что рост концентрации парниковых газов будет сопровождаться интенсификацией циркуляции Брюера–Добсона (ЦБД) [6, 11–13], которая объясняет механизм широтного распределения озона. Упрощенно ее можно представить в виде единой средней меридиональной ячейки в каждом полушарии с восходящей ветвью в тропиках, меридиональным стратосферным переносом в направлении полюсов и нисходящим переносом в средних и высоких широтах. В результате интенсификации ЦБД большее количество озона доставляется из его тропического резервуара в средние и высокие широты. Это может замедлить восстановление озона в тропиках и ускорить процесс восстановления во внетропических областях [7–9].

Важно также отметить влияние на уровень ОСО повышенного содержания стратосферного аэрозоля (СА) после взрывных вулканических извержений [14–18], когда серосодержащие продукты извержения попадают непосредственно в стратосферу. Гетерогенные химические реакции на увеличенной поверхности сернокислотного аэрозоля переводят устойчивые соединения хлора в фотохимически активные соединения, которые разрушают озон. Рекордно низкие значения ОСО в 1992–1993 гг. совпали с периодом максимального аэрозольного загрязнения стратосферы продуктами извержения влк. Пинатубо (1991 г.). Стабилизация и рост ОСО со 2-й половины 1990-х гг. совпадают с минимальным фоновым содержанием СА, которое наблюдалось с 1997 по 2006 г. в условиях длительного вулканически спокойного периода.

Исходные данные

На Сибирской лидарной станции Института оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН (Томск: 56,48° с.ш., 85,05° в.д.) измерения ОСО ведутся с помощью озонметра М-124 с 1993 г. С момента начала измерений накоплен длительный однородный ряд, который можно использовать для изучения долгопериодных колебаний ОСО.

Для построения долгосрочных трендов изменений ОСО данные измерений с помощью озонметра М-124 дополняются данными спутниковых измерений с помощью аппаратуры TOMS. Рассматриваются данные спутниковых измерений с использованием следующих космических аппаратов: Nimbus-7 (1 ноября 1978 – 5 июля 1993 г.); Meteor (22 августа 1991 – 24 ноября 1994 г.); Earth Probe (22 июля 1996 – 14 декабря 2005 г.); Aura (1 октября 2004 г. – по настоящее время).

Данные измерений первых трех спутников доступны на сайте [20], а данные измерений четвертого спутника (аппаратура OMI) – на сайте [21]. Озоновые данные восстанавливаются с помощью двух алгоритмов: OMI–TOMS и OMI–DOAS [22]. Первый алгоритм основан на версии TOMSv8 и ис-

пользовался уже на 4 спутниках аппаратуры TOMS с ноября 1978 г. Измерения проводятся в четырех дискретных спектральных областях с центром на 313, 318, 331 и 360 нм. Во втором алгоритме используется гиперспектральная особенность OMI. Он основан на принципе Differential Optical Absorption Spectroscopy (DOAS). В восстановлении участвуют измерения в спектральном интервале 331,1–336,6 нм.

Основным отличием двух алгоритмов является то, что в DOAS устраняется влияние аэрозоля, облачности, диоксида серы и подстилающей поверхности путем спектральной подгонки, а в алгоритме TOMS для этого применяется эмпирическая подгонка. Кроме того, в алгоритме TOMS используется климатология высоты облачного покрова, полученная на основе спутниковых измерений в ИК-области, а в алгоритме DOAS используется информация об облачности, полученная из измерений OMI в полосе поглощения O₂–O₂ на длине волны 470 нм.

В настоящее время осуществляются постоянная валидация данных спутниковых измерений, развитие алгоритмов восстановления ОСО; выставляются наборы данных, восстановленные различными алгоритмами. Различные разработчики учитывают степень влияния на точность восстановления ОСО различных факторов. Единого устоявшегося алгоритма обработки данных спутниковых измерений пока не принято. Качественный ход долгосрочных изменений ОСО при использовании различных алгоритмов совпадает.

Ранее мы сравнивали данные измерений М-124 в Томске с данными аппаратуры TOMS за 2003 и 2004 гг. [23]. Спутниковые данные обрабатывались с помощью алгоритма OMI–TOMS. Коэффициент корреляции для двух наборов данных составил 0,95 для 2003 г. и 0,94 для 2004 г. Абсолютная средняя разность для периода двух лет составила 23,94 е.Д., а относительная средняя разность – 7,1%.

На рис. 1 сравниваются данные измерений за 2005–2010 гг. озонметром М-124 со спутниковыми значениями, обработанными различными алгоритмами [21].

На рис. 1, а представлены относительные разности между значениями М-124 и результатами спутниковых измерений, усредненные за различные годы (2005–2010). Для данных, полученных OMI и обработанных алгоритмом OMI–TOMS, принято обозначение OMTO (версии 8.5 и 8.6), а для данных, основанных на алгоритме OMI–DOAS, – OMDO. Лучшее согласие показывают данные измерений с помощью озонметра М-124 и данные на основе алгоритма OMDO.

Как правило, измерения М-124 превышают спутниковые данные. Усредненное за 2010 г. относительное расхождение между наземными и спутниковыми данными, восстановленными с помощью алгоритма OMI–DOAS, составляет 3,8 е.Д. (1,1% от среднего за год). Для иллюстрации на рис. 1, б показаны ряды измерений за первые 100 дней 2010 г., выполненных прибором М-124 и обработанных алгоритмом OMI–DOAS.

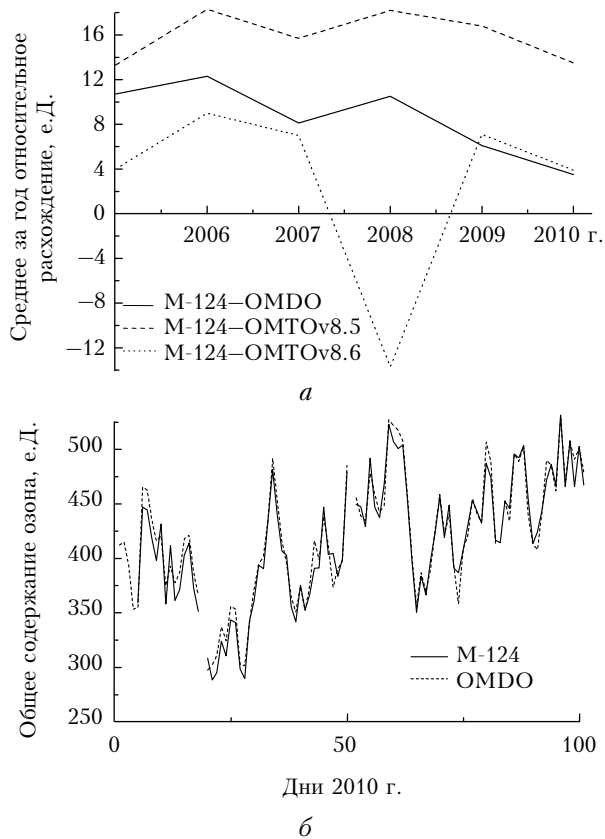


Рис. 1. Сравнение результатов измерения общего содержания озона с помощью озонметра М-124 и на основе аппаратуры TOMS за период 2005–2010 гг.: а – среднее за год относительное расхождение измерений М-124 и значений, восстановленных с помощью различных алгоритмов; б – результаты измерений общего содержания озона с помощью М-124 и OMI (спутниковые измерения восстановлены с использованием алгоритма OMI–DOAS) за 100 дней 2010 г.

Результаты измерений

На рис. 2 представлено поведение временного ряда за период 1979–2010 гг.

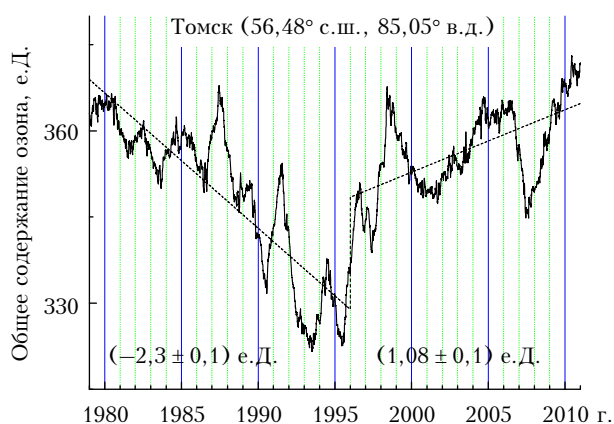


Рис. 2. Временной ряд общего содержания озона для Томска (56,48° с.ш., 85,05° в.д.), построенный с использованием спутниковых данных (до 1993 г.) и данных озонметра М-124 (с 1994 г.), и линейные тренды для периодов 1979–1995 и 1996–2010 гг.

Для построения использовались заново обработанные (reprocessed) данные спутников Nimbus-7 (1979–1992 гг., доступны на сайте <http://avdc.gsfc.nasa.gov/index.php?site=296832442&id=66&go=list&path=/N7TO3> [21]), Meteor (1993 г. [20]) и данные озонметра М-124 (1994–2010 гг.). Тренды строились отдельно для периодов 1979–1995 и 1996–2010 гг. Перед нахождением трендов из годового ряда удалялась сезонная зависимость и прибавлялось среднее значение за год. При построении временной ряд сглаживался по 365 точкам.

Видно, что во временном ходе присутствуют две зависимости: отрицательный линейный тренд, составляющий $(-2,3 \pm 0,1)$ е.Д. в год, для периода 1979–1995 гг. и положительный тренд, составляющий $(1,08 \pm 0,1)$ е.Д. в год, для периода 1996–2010 гг. Минимальные значения ОСО в 1992–1993 гг. совпадают с периодом аномально высокого содержания аэрозоля в стратосфере после извержения влк. Пинатубо.

Некоторые физико-химические аспекты влияния вулканогенного аэрозоля на изменения стратосферного озона и двуокси азота (один из компонентов азотного каталитического цикла разрушения озона) рассматриваются на основе измерений Сибирской лидарной станции в работе [17]. Тренд роста ОСО совпадает с минимальным фоновым содержанием стратосферного аэрозоля в условиях длительного физико-химически спокойного периода 1997–2006 гг.

Последующая серия взрывных извержений вулканов так называемого Тихоокеанского «огненного кольца» в конце 2006–2009 гг. (Рабаул, Окмок, Касаточи, Редоубт, пик Сарычева) была сравнительно малой мощности (по массе инжектированной в стратосферу двуокси серы почти на 2 порядка меньше, чем после влк. Пинатубо) и сопровождалась кратковременными увеличениями содержания СА [17, 19], длительностью до нескольких месяцев. При этом наблюдались незначительные кратковременные изменения ОСО. Так, после извержения влк. Рабаул (октябрь 2006 г.) в период максимального аэрозольного возмущения стратосферы в конце января – начале марта 2007 г. на широте Томска прослеживалась статистически значимая отрицательная корреляция между изменениями содержания стратосферного аэрозоля и ОСО [17]. Эти кратковременные изменения ОСО не сказались на его общем тренде роста по 2010 г.

По данным наземной сети озонметров М-124 и спутниковых измерений подобный качественный ход изменений ОСО наблюдается над всей территорией России [24]. В работе [24] показано, что в период 1979–1995 гг. отмечался отрицательный тренд ОСО, а в период 1996–2007 гг. – близкий к нему по абсолютной величине положительный. Высказано предположение, что положительный тренд ОСО в период 1996–2007 гг. обусловлен не изменением в стратосфере концентраций соединений хлора и брома, а является следствием происходящих в атмосфере климатических изменений.

На рис. 3 представлены временные ряды для различных точек Северного полушария. Для их построе-

ния использовались спутниковые данные [20, 21]. Следует отметить, что в них имеется пробел за период декабрь 1994 – июнь 1996 гг., когда измерения не проводились. Временные ряды и тренды обработаны так же, как и для рис. 2. Кривые размещены с учетом широты.

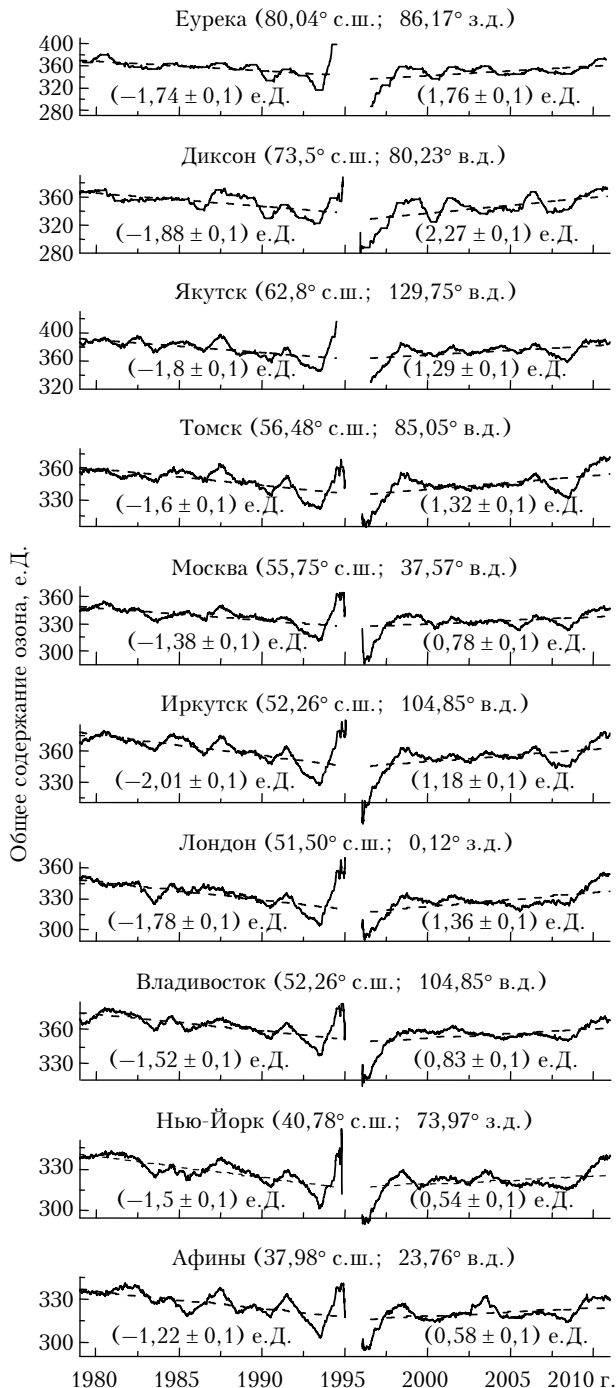


Рис. 3. Временные ряды ОСО, полученные с использованием данных аппаратуры TOMS

Из рис. 3 видно, что отрицательный тренд не зависит от широты. Для положительных трендов в целом можно выявить широтную зависимость с увеличением тренда в высоких широтах; данная

тенденция может объясняться интенсификацией циркуляции Брюера–Добсона, в результате чего большее количество озона переносится из тропического резервуара в средние и высокие широты. Широтный ход положительного тренда несколько нарушается в крупных городах. Возможно, это связано с влиянием промышленных выбросов.

Заключение

Результаты, изложенные в настоящей статье, позволяют сделать следующие выводы:

1. Данные измерений с использованием озонметра М-124 удовлетворительно согласуются со спутниковыми данными, полученными с помощью аппаратуры TOMS. Усредненное за 2010 г. относительное расхождение между наземными и спутниковыми данными, восстановленными с помощью алгоритма OMI–DOAS, составляет 3,8 е.Д. (1,1% от среднего значения ОСО за 2010 г.).

2. Во временном ходе, построенном на основе данных TOMS и озонметра М-124 для Томска, присутствуют две зависимости: отрицательный линейный тренд, составляющий $(-2,3 \pm 0,1)$ е.Д. в год, для периода 1979–1995 гг. и положительный тренд, составляющий $(1,08 \pm 0,1)$ е.Д. в год, для периода 1996–2010 гг.

3. Временные зависимости, построенные на основе спутниковых данных для различных точек Северного полушария для периода 1979–2010 гг., показывают, что отрицательный тренд не зависит от широты. Положительные тренды в целом проявляют широтную зависимость. Данная тенденция может объясняться интенсификацией циркуляции Брюера–Добсона, в результате чего большее количество озона переносится из тропического резервуара в средние и высокие широты.

Автор признателен персоналу сайта TOMS за любезное предоставление данных и отдельно Christian Retscher (christian.retscher@nasa.gov) за информацию, касающуюся наборов данных на сайте AURA Validation Data Center (AVDC). Содержание статьи значительно улучшилось благодаря замечаниям В.Д. Бурлакова.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ (госконтракты № 02.740.11.0674, 14.740.11.0204 и 16.518.11.7067) и проекта № 2 Президиума СО РАН.

1. World Meteorological Organization (WMO)/United Nations Environment Programme (UNEP): Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2006, World Meteorological Organization, Global Ozone Research and Monitoring Project, Report N 50, Geneva, Switzerland, 2007.
2. Weatherhead E.C., Anderson S.B. The search for signs of recovery of the ozone layer // Nature (Gr. Brit.). 2006. V. 441, N 4. doi: 10.1038.
3. Eyring V., Waugh D.W., Bodeker G.E., Cordero E., Akiyoshi H., Austin J., Beagley S.R., Boville B.A., Braesicke P., Bruhl C., Butchart N., Chipperfield M.P., Dameris M., Deckert R., Deushi M., Frith S.M., Garcia R.R., Gettelman A., Giorgetta M.A., Kinnison D.E., Mancini E., Manzini E., Marsh D.R., Matthes S., Na-

- gashima T., Newman P.A., Nielsen J.E., Pawson S., Pitari G., Plummer D.A., Rozanov E., Schraner M., Scinocca J.F., Semeniuk K., Shepherd T.G., Shibata K., Steil B., Stolarski R.S., Tian W., Yoshiki M.* Multi-model projections of stratospheric ozone in the 21st century // *J. Geophys. Res. D.* 2007. V. 112, N 16303. doi: 10.1029/2006JD008332.
4. *Barnett J.J., Houghton J.T., Pyle J.A.* The temperature dependence of the ozone concentration near the stratosphere // *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.* 1975. V. 101, N 248. P. 245–257.
 5. *Jonsson A.I., De Grandpre J., Fomichev V.I., McConnell J.C., Beagley S.R.* Doubled CO₂-induced cooling in the middle atmosphere: photochemical analysis of the ozone radiative feedback // *J. Geophys. Res. D.* 2004. V. 109. N 24103.
 6. *Butchart N., Scaife A.A., Bourqui M., de Grandpre J., Hare S.H.E., Kettleborough J., Langematz U., Manzini E., Sassi F., Shibata K., Shindell D., Sigmond M.* Simulations of anthropogenic change in the strength of the Brewer–Dobson circulation // *Clim. Dyn.* 2006. V. 27. P. 727–741.
 7. *Austin J., Wilson R.J.* Ensemble simulations of the decline and recovery of stratospheric ozone // *J. Geophys. Res. D.* 2006. V. 111, N 16314. doi: 10.1029/2005JD006907.
 8. *Shepherd T.G.* Dynamics, stratospheric ozone, and climate change // *ATMOSPHERE–OCEAN.* 2008. V. 46, N 1. P. 117–138. doi: 10.3137/ao.460106.
 9. *Waugh D.W., Oman L., Kawa S.R., Stolarski R.S., Pawson S., Douglass A.R., Newman P.A., Nielsen J.E.* Impacts of climate change on stratospheric ozone recovery // *Geophys. Res. Lett.* 2009. V. 36, N L03805. doi: 10.1029/2008GL036223.
 10. *Dhomse S., Weber M., Wohltmann I., Rex M., Burrows J.P.* On the possible causes of recent increases in northern hemispheric total ozone from a statistical analysis of satellite data from 1979 to 2003 // *Atmos. Chem. Phys.* 2006. V. 6. P. 1165–1180.
 11. *Xun Jiang, Eichelberger S.J., Hartmann D.L., Runlie Shia, Yung Y.L.* Influence of doubled CO₂ on ozone via changes in the Brewer–Dobson circulation // *J. Atmos. Sci.* 2007. V. 64, N 7. P. 2751–2755.
 12. *Eichelberger S.J., Hartmann D.L.* Changes in the strength of the Brewer–Dobson circulation in a simple AGCM // *Geophys. Res. Lett.* 2005. V. 32, N L15807. doi: 10.1029/2005GL022924.
 13. *Li F., Stolarski R.S., Newman P.A.* Stratospheric ozone in the post-CFC era // *Atmos. Chem. Phys.* 2009. V. 9, N 16. P. 2207–2213.
 14. *Prather M.J.* Catastrophic loss of stratospheric ozone in dense volcanic clouds // *J. Geophys. Res. D.* 1992. V. 97, N 9. P. 10187–10191.
 15. *Hofmann D., Oltmans S., Komhyr W., Harris J., Lathrop J., Langford A., Deshler T., Johnson B., Torres A., Matthews W.* Ozone loss in the lower stratosphere over the United States in 1992–1993: Evidence for heterogeneous chemistry on the Pinatubo aerosols // *Geophys. Res. Lett.* 1994. V. 21, N 811. P. 65–68.
 16. *Schoeberl M.R., Bhartia P.K., Herman J.R.* Tropical ozone loss following the eruption of Mt. Pinatubo // *Geophys. Res. Lett.* 1993. V. 20, N 214. P. 29–32.
 17. *Зуев В.В., Баженов О.Е., Бурлаков В.Д., Гришаев М.В., Долгий С.И., Невзоров А.В.* О влиянии вулканогенного аэрозоля на изменения стратосферного озона и NO₂ по данным измерений на Сибирской лидарной станции // *Оптика атмосфер. и океана.* 2008. Т. 21, № 11. С. 945–951.
 18. *Зуев В.В., Зуева Н.Е.* Вулканогенные возмущения стратосферы – главный регулятор долговременного поведения озоносферы в период с 1979 по 2008 г. // *Оптика атмосфер. и океана.* 2011. Т. 24, № 1. С. 30–34.
 19. *Зуев В.В., Балин Ю.С., Букин О.А., Бурлаков В.Д., Долгий С.И., Кабашиников В.П., Невзоров А.В., Осипенко Ф.П., Павлов А.Н., Пеннер Н.Э., Самойлова С.В., Столярчук С.Ю., Чайковский А.П., Шмирко К.А.* Результаты совместных лидарных наблюдений аэрозольных возмущений стратосферы на станциях сети CIS-LiNet в 2008 г. // *Оптика атмосфер. и океана.* 2009. Т. 22, № 5. С. 450–456.
 20. URL: <http://toms.gsfc.nasa.gov/>
 21. URL: <http://avdc.gsfc.nasa.gov/>
 22. *Kroon M., Veeffkind J.P., Sneep M., McPeters R.D., Bhartia P.K., Levelt P.F.* Comparing OMI–TOMS and OMI–DOAS total ozone column data // *J. Geophys. Res.* 2008. V. 113, N D16S28. doi: 10.1029/2007JD008798.
 23. *Бондаренко М.А., Баженов О.Е., Гришаев М.В.* Результаты сравнения данных космической аппаратуры TOMS и наземной озонотрии // *Оптика атмосфер. и океана.* 2006. Т. 19, № 9. С. 780–783.
 24. *Звягинцев А.М., Ананьев Л.Б., Артамонова А.А.* Изменчивость общего содержания озона над территорией России в 1973–2008 гг. // *Оптика атмосфер. и океана.* 2010. Т. 23, № 3. С. 190–195.

O.E. Bazhenov. Long-term trends of variations in total ozone content according to data of ground-based (Tomsk: 56.48°N, 85.05°E) and satellite measurements.

The paper compares the results of ground-based measurements of total ozone (TO) content in Tomsk (56.48°N, 85.05°E) with the use of M-124 ozonometer against satellite data, obtained with the help of TOMS instruments. Different algorithms of TO retrieval from satellite data are considered. TO trends over Tomsk and at some Northern Hemisphere sites for period 1979–2010 are analyzed. Based on satellite and ground-based measurements for Tomsk, there are negative linear trend of (-2.3 ± 0.1) DU per year for the period 1979–1995 and positive trend of (1.08 ± 0.1) DU per year for the period 1996–2010.