

Оценка влияния влажности и температуры в стратосфере на возникновение озоновой аномалии весной 2011 г. в Арктике и над северной территорией России

О.Е. Баженов*

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

Поступила в редакцию 16.04.2012 г.

Исследуются температурные, влажностные и озоновые аномалии, зарегистрированные в марте 2011 г. космической аппаратурой TOMS в стратосфере арктических широт. Анализируется их связь с понижением концентраций озона над Томском в апреле 2011 г. Предполагается, что явления в Арктике — это результат конкуренции между меридиональным переносом озона из его тропического резервуара в зимний период и последующим разрушением озона в результате гетерогенных реакций на поверхностях частиц полярных стратосферных облаков, а явления средних широт обусловлены заносом обедненных озоном влажных арктических воздушных масс на синоптическом масштабе.

Ключевые слова: стратосфера, температура, влажность, озон, спутниковые данные, аномальные изменения; stratosphere, temperature, humidity, ozone, satellite data, anomalous variations.

Введение

В нынешнем столетии ожидаются сокращение содержания галогенных соединений в стратосфере и восстановление озонового слоя. Однако вопрос о преобладающем влиянии химического фактора на восстановление озонового слоя остается дискуссионным [1]. Существенную роль в процессе восстановления играют динамические и климатические факторы. Роль динамических факторов рассматривалась нами в работе [2]. Среди климатических факторов, конкурирующих с процессами галогенной химии, прежде всего выделяются температура и влажность стратосферы [3]. Влияние температуры стратосферы на сезонную динамику общего содержания озона в средних и высоких широтах Северного полушария рассматривалось в работе [4]. В ряде работ показано, что рост содержания водяного пара в стратосфере в долгосрочной перспективе может привести к усилению потепления тропосферы и охлаждения стратосферы [5, 6], а также к увеличению скоростей гетерогенных реакций, инициирующих каталитическое разрушение озона в нижней стратосфере [7, 8].

Следует отметить, что указанные климатические параметры могут быть также подвержены вариациям сезонного и синоптического масштаба. Речь прежде всего идет об образовании полярных стратосферных облаков (ПСО), на поверхности частиц которых происходят гетерогенные реакции разрушения озона. Необходимым условием образования ПСО являются пониженные (ниже -78°C) температуры в стра-

тосфере. ПСО, как правило, наблюдаются над Антарктикой. Однако известны также случаи регистрации ПСО над Арктикой.

В работе [9] описаны наблюдения ПСО на высоте 22–26 км над Норвежскими горами при помощи самолетного лидара 15 января 1995 г. С использованием моделирования показано, что они были вызваны гравитационными волнами, генерируемыми горными системами. Облака имели тонкую нитевидную структуру в виде полос толщиной 100 м по вертикали и незначительно перемещались в течение более 4 ч. Наблюдения показали, что твердые частицы гидрата азотной кислоты (nitric acid hydrate, NAH) могут существовать на синоптическом временном масштабе.

В работе [10] представлены результаты лидарных наблюдений со спутника CALIPSO (Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observations) зимой 2009–2010 гг. в Арктике. В этот период фиксировались необычайно низкие температуры в стратосфере с середины декабря 2009 г. по конец января 2010 г. В течение арктической зимы 2009/10 г. CALIPSO регистрировал ПСО чаще, чем в предыдущие годы вместе взятые. Анализ наблюдений позволил разделить зимний сезон 2009/10 г. приблизительно на четыре периода, отличающиеся оптическими характеристиками ПСО. В первоначальный период (15–30 декабря 2009 г.) наблюдались нерегулярные, слабо различимые ПСО, состоящие из жидкой смеси тригидрата азотной кислоты (nitric acid trihydrate, NAT) с низкой счетной концентрацией. Во время этой фазы наблюдения кристаллические облака не регистрировались; следовательно, на этой стадии облачные частицы NAT формировались за счет ядрообразования без участия льда.

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

В течение второго периода (31 декабря 2009 г. – 14 января 2010 г.) часто наблюдались кристаллические облака, образовавшиеся вследствие генерируемых горными системами волн и способствовавшие обширному ядрообразованию частиц NAT во всей области полярного вихря. Третий период (15–21 января 2010 г.) характеризовался синоптическими понижениями температуры ниже точки замерзания, приведшими к эпизодическим прорывам обширных кристаллических облаков. В четвертом периоде (22–28 января) наблюдалось значительное стратосферное потепление, которое разрушило полярный вихрь путем перемещения холодной области из центральной зоны вихря. В этой завершающей фазе преобладали ПСО, состоящие из переохлажденного тернарного раствора, хотя частицы NAT также могли присутствовать в незначительном количестве, но маскировались более многочисленными частицами переохлажденного тернарного раствора с более низкой температурой.

Весной 2011 г. над северными территориями Евразии наблюдался аномальный уровень общего содержания озона (ОСО). Озоновый слой в Арктике потерял порядка 40% ОСО с начала зимы по конец марта по данным Всемирной метеорологической организации (ВМО) вследствие озоноразрушающих веществ (ОРВ), все еще присутствующих в атмосфере, и очень холодной зимы в стратосфере. Четвертого января 2011 г. спутник CALIPSO фиксировал ПСО при пролете над Гренландским морем и Датским проливом на широте ~ 70° [11].

В настоящей статье исследуется влияние аномально высокой влажности и аномально низкой температуры в арктической стратосфере на понижение концентраций озона в арктических широтах и над Томском в марте – апреле 2011 г.

1. Данные измерений

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. В наших измерениях мы зафиксировали падение уровня ОСО в марте – апреле 2011 г. над Томском и сравнили его с данными спутниковой аппаратуры TOMS (спутник Aura) [12]. Наблюдается хорошее совпадение результатов измерений с максимальным уменьшением ОСО в апреле [4]. Средняя относительная разность измерений за 10 мес 2011 г. составила 8,9 е.д.

Для установления причин аномального весеннего понижения ОСО в 2011 г. над Евразией и, в частности, над Томском использовались спутниковые данные TOMS в виде профилей температуры, а также профилей смесевых отношений влажности и озона для периода 2005–2011 гг. Были исследованы следующие пункты на наличие аномалий температуры, влажности и озона: Эврика, Канада (80,0° с.ш.; 86,2° з.д.); Нью-Олесунн, Норвегия (78,9° с.ш.; 11,9° в.д.); Туле, Гренландия (76,5° с.ш.; 68,7° з.д.); Саммит, Гренландия (72,6° с.ш.; 38,5° з.д.); Аломар, Норвегия (69,3° с.ш.; 16,0° в.д.); Соданкюла, Фин-

ляндия (67,4° с.ш.; 26,6° в.д.); Сондрестром, Гренландия (67° с.ш.; 50,6° з.д.); Томск, Россия (56,48° с.ш.; 85,05° в.д.). В целом указанные аномалии проявлялись во всех исследованных пунктах. Однако наиболее выраженными они оказались на широтах севернее 70-й параллели (напомним, что именно в районе 70-й параллели спутник CALIPSO фиксировал ПСО 4 января 2011 г. [11]).

На рис. 1–3 представлены высотные профили температуры, влажности и озона для пунктов Эврика, Туле и Томск.

В качестве формы представления высотных профилей выбраны годовые временные ряды указанных параметров на определенных высотных уровнях, сокращенные для большей наглядности до интервала первых 6 мес, когда наблюдались озоновые аномалии. При построении кривых проводились усреднение ежедневных измерений и сглаживание по 30 точкам. Высотные уровни выбирались прежде всего из соображений иллюстрации масштабов озоновой аномалии. Высотное поведение годовых ходов различно для трех рассматриваемых параметров. Поэтому для Туле дополнительно приводится годовой ход влажности на высотном уровне 27 км, где максимальна ее аномалия (см. фрагмент на рис. 2).

2. Обсуждение результатов измерений

Из анализа рис. 1–3 следует, что в рассматриваемый период над исследуемыми пунктами имели место аномалии в поведении температуры, влажности и озона в широких высотных интервалах. По сравнению с предыдущими годами наблюдаются аномально низкие температуры и концентрации озона, а также повышенные значения влажности. Рассмотрев годовой ход указанных параметров на фиксированных высотных уровнях, можно сделать вывод о том, что озон в стратосфере прежде всего реагирует на падение температуры до пороговых значений (–78 °С) для образования ПСО. Следовательно, температура в стратосфере может рассматриваться в качестве доминирующего фактора разрушения озона.

Для иллюстрации масштабов высотного и пространственного распространения Арктической аномалии и ее влияния на часть территории Северной Евразии в таблице приводятся значения максимальной и минимальной высот аномалий температуры (H_1 и H_2), влажности (H_3 и H_4) и озона (H_5 и H_6) для пунктов: Эврика (EUR), Нью-Олесунн (NAD), Саммит (SUM), Туле (THU) и Томск (TSK).

Значения максимальной и минимальной высот (км) аномалий температуры T (H_1 и H_2), влажности H_2O (H_3 и H_4) и озона O_3 (H_5 и H_6)

Параметр	Высота	EUR	NAD	SUM	THU	TSK
T	H_1	19	19	26	19	–
	H_2	26	30	27	27	–
H_2O	H_3	26	26	19	24	12
	H_4	31	30	31	31	28
O_3	H_5	17	17	17	15	12
	H_6	26	26	31	31	26

Эврика, Канада (80,0° с.ш.; 86,2° з.д.)

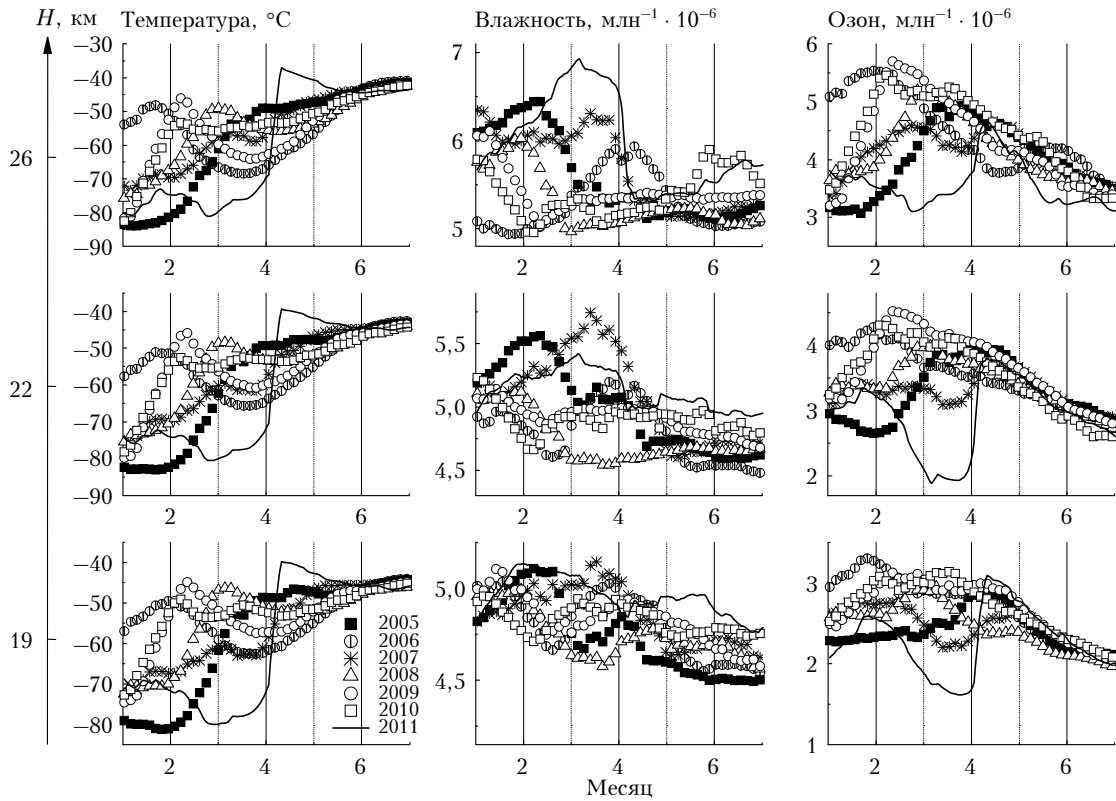


Рис. 1. Спутниковые данные о температуре, влажности и озоне [11] за период 2005–2011 гг. для географического пункта Эврика. При построении использовано сглаживание по 30 точкам

Туле, Гренландия (76,5° с.ш.; 68,7° з.д.)

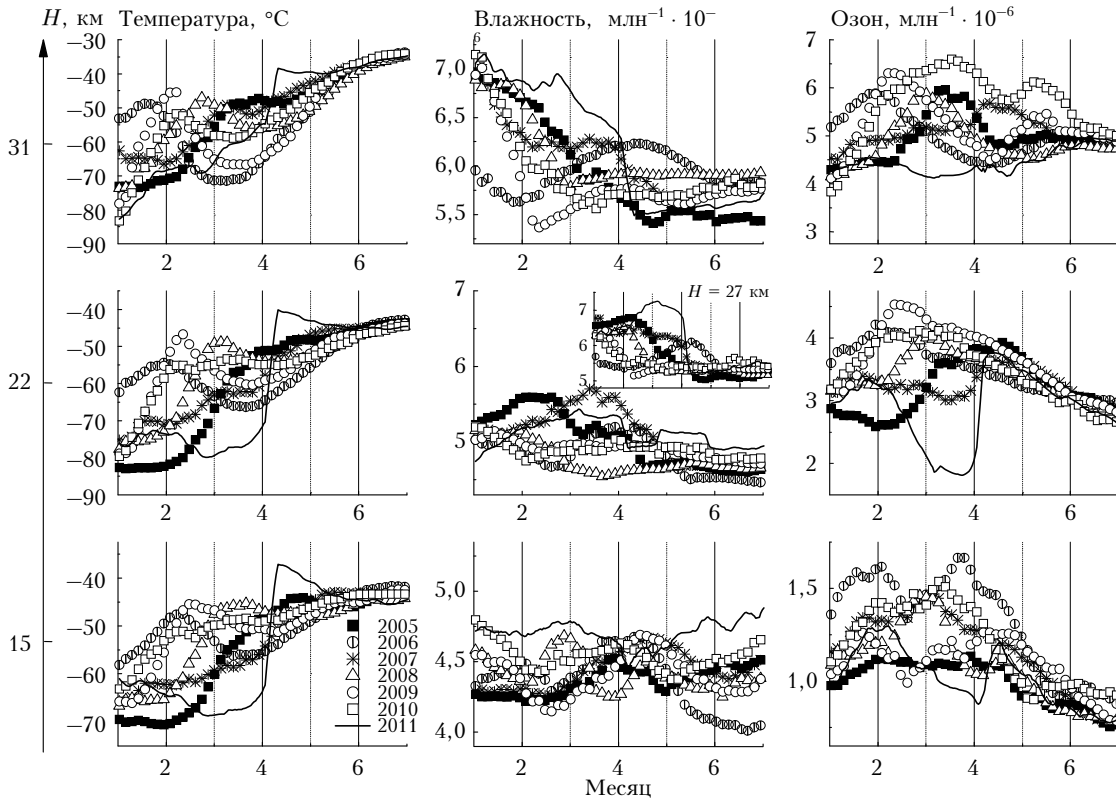


Рис. 2. То же, что и на рис. 1, но для географического пункта Туле

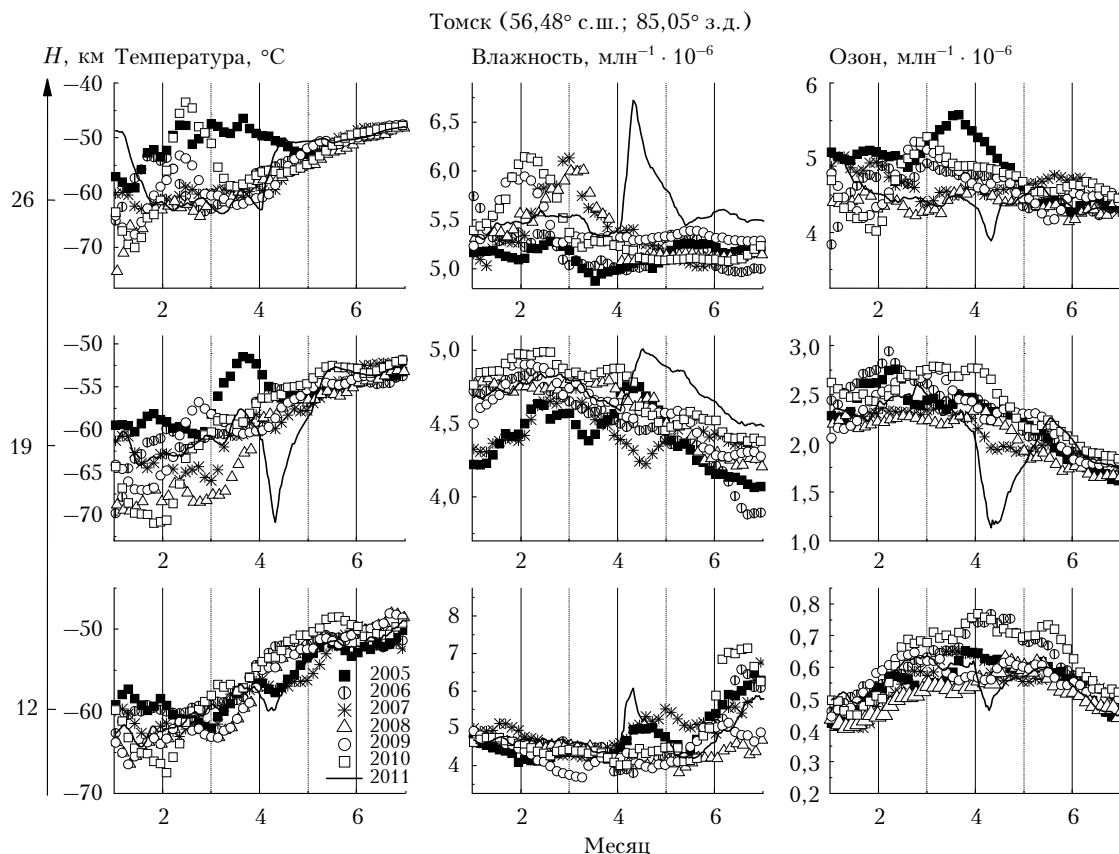


Рис. 3. То же, что и на рис. 1, но для географического пункта Томск

Из совместного анализа рисунков и таблицы можно сделать вывод о том, что понижение температуры в стратосфере (до значений ниже -78°C) в марте 2011 г. над Арктикой практически неизменно сопровождается падением концентрации озона. Аномалия влажности может распространяться до высот на несколько километров выше озоновой (ср. H_3 и H_5 и H_4 и H_6 для EUR и NAD). Для EUR и NAD озоновая аномалия заканчивается (H_6) там, где начинается аномалия влажности (H_3). С другой стороны, понижение содержания озона может распространяться вниз до высот, где температуры уже недостаточно для образования ПСО (выше -78°C) (ср. H_1 и H_5 для SUM и THU). Температура в стратосфере над TSK не достигает аномальных уровней, а высотные диапазоны аномалий влажности и озона расширяются до более низких высот по сравнению с арктическими широтами. Кроме того, более поздний отклик влажности и озона над TSK [4] свидетельствует о заносе влажных и обедненных озоном воздушных масс из арктических областей в средние широты. Дополнительным аргументом в пользу данного предположения может быть кратковременный характер аномалий трех указанных характеристик по сравнению с характером аномалий арктических широт.

Заключение

Из проведенного анализа данных измерений TOMS можно заключить:

1. В марте 2011 г. в стратосфере арктических широт наблюдались пониженные температуры, пониженные уровни влажности и пониженные концентрации озона. Это может свидетельствовать об образовании ПСО и разрушении озона, доставленного с экватора меридиональным переносом в арктические широты в зимний период.

2. В апреле 2011 г. над Томском и частью северной территории России регистрировались аномальные (до 30% по сравнению с многолетней нормой) понижения уровня ОСО, что явилось следствием разрушения озона в полярной стратосфере арктических широт и выноса обедненных озоном арктических воздушных масс в области за пределами полярного вихря после разрушения последнего.

3. В мае 2011 г. ОСО вернулось к своим нормальным средним сезонным значениям как в арктических, так и в средних широтах.

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).

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ (госконтракты № 02.740.11.0674, 14.740.11.0204, 16.518.11.7067 и 11.519.11.60.33) и интеграционного проекта Президиума РАН № 4.5.

1. World Meteorological Organization. Global Ozone Research and Monitoring Project – Report No. 52 Scientific Assessment of ozone Depletion: 2010 Pursuant to Article

- 6 of the Montreal Protocol on Substances that Deplete the Ozone Layer. Geneva, Switzerland.
2. *Баженов О.Е.* Долговременные тренды изменений общего содержания озона по данным наземных (Томск: 56,48° с.ш., 85,05° в.д.) и спутниковых измерений // *Оптика атмосф. и океана*. 2011. Т. 24, № 9. С. 770–774.
 3. *Shindell D.T., Grewe V.* Separating the influence of halogen and climate changes on ozone recovery in the upper stratosphere // *J. Geophys. Res. D*. 2002. V. 107, N 12. ACL-3. P. 4144–4154. doi: 10.1029/2001JD000420.
 4. *Баженов О.Е., Бурлаков В.Д.* Аномальное понижение уровня общего содержания озона над Томском и северной территорией России в марте–апреле 2011 г. // *Оптика атмосф. и океана*. 2011. Т. 24, № 10. С. 515–519.
 5. *Rind D.E., Lonergan P.* Modeled impacts of stratospheric ozone and water vapor perturbations with implications for high-speed civil transport aircraft // *J. Geophys. Res. D*. 1995. V. 100, N 4. P. 7381–7396.
 6. *Dvortsov V.L., Solomon S.* Response of the stratospheric temperatures and ozone to past and future increases in stratospheric humidity // *J. Geophys. Res. D*. 2001. V. 106, N 7. P. 7507–7514.
 7. *Hofmann D.J., Oltmans S.J.* The effect of stratospheric water vapor on the heterogeneous reaction rate of ClONO₂ and H₂O // *Geophys. Res. Lett.* 1992. V. 19, N 22. P. 2211–2214.
 8. *Michelsen H.A., Spivakovsky C.M., Wofsy S.C.* Aerosol-mediated partitioning of stratospheric Cl_y and NO_y at temperatures above 200 K // *Geophys. Res. Lett.* 1999. V. 26, N 3. P. 299–302.
 9. *Carlaw K.S., Wirth M., Tsias A., Luo B.P., Dörnbrack A., Leutbecher M., Volkert H., Renger W., Bacmeister J.T., Peter T.* Particle microphysics and chemistry in remotely observed mountain polar stratospheric clouds // *J. Geophys. Res. D*. 1998. V. 103, N 5. P. 5785–5796. doi: 10.1029/97JD03626.
 10. *Pitts M.C., Poole L.R., Dörnbrack A., Thomason L.W.* The 2009–2010 Arctic polar stratospheric cloud season: a CALIPSO perspective // *Atmos. Chem. Phys.* 2011. V. 11. P. 2161–2177. doi: 10.5194/acp-11-2161-2011.
 11. URL: <http://www.physorg.com/news/2011-02-calipsospies-polar-stratospheric-clouds.html>
 12. URL: <http://avdc.gsfc.nasa.gov/>

O.E. Bazhenov. Assessing the effects of humidity and temperature in the stratosphere on the occurrence of ozone anomaly in spring of 2011 in Arctic and over northern territory of Russia.

The paper studies the temperature, humidity, and ozone anomalies, recorded in March 2011 by the TOMS satellite instrumentation in the stratosphere of Arctic latitudes. Their relation to the decrease in the ozone concentration over Tomsk in April 2011 is analyzed. It is hypothesized that the Arctic phenomena are the result of the competition between the meridional ozone transport from tropical ozone reservoir in winter season and the subsequent ozone loss due to heterogeneous reactions on the surfaces of particles in polar stratospheric clouds, while the midlatitude phenomena are caused by synoptic-scale export of the ozone-depleted humid Arctic air masses.