

Исследование квазидвухлетней цикличности общего содержания и концентраций озона на отдельных высотных уровнях над Арктикой и Томском по данным спутниковой аппаратуры TOMS

О.Е. Баженов*

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

Поступила в редакцию 28.04.2014 г.

Проанализирована картина квазидвухлетней цикличности общего содержания озона (ОСО) и его концентраций на отдельных высотных уровнях в стратосфере над арктической территорией и Томском по данным спутниковой аппаратуры TOMS. Коэффициент корреляции между изменениями ОСО и вариациями экваториального зонального ветра за период 1996–2013 гг. статистически незначим. Средние весенние (март–апрель) значения концентрации озона и зонального ветра в основном показывают корреляцию в интервале $-0,23 \div -0,26$. Ряды смесового отношения озона, составленные для отдельных высотных уровней за период 2005–2013 гг., демонстрируют квазидвухлетнюю цикличность, которая оформляется на высотах ~ 30 км и ослабевает в вышележащих областях. Корреляционная зависимость между отношением смеси озона и индексом экваториального зонального ветра наиболее отчетливо проявляется в Западном полушарии и более сложна в Восточном.

Ключевые слова: общее содержание озона, вертикальный профиль озона, экваториальный зональный ветер, квазидвухлетняя цикличность; total ozone content, vertical ozone profile, equatorial zonal wind, quasi-biennial oscillation.

Введение

Озон модулирует приток солнечной ультрафиолетовой радиации к поверхности Земли, но и его собственная концентрация также модулируется на различных пространственно-временных масштабах. Одной из мод изменения озона является его квазидвухлетняя цикличность (КДЦ), которую принято связывать с КДЦ экваториального зонального ветра в стратосфере. Ветровая КДЦ характеризуется чередующимися восточными и западными фазами зональных ветров со средним периодом 27–28 мес. В западной фазе КДЦ преобладает нисходящее движение в экваториальной стратосфере, сопровождающееся накоплением озона в экваториальных широтах. Наоборот, в восточной фазе озон, образующийся в экваториальной стратосфере, выносится в вышележащие и внетропические области [1, 2]. Как следствие, количество озона в восточной фазе КДЦ максимально в средних широтах и в глобальном масштабе и минимально в тропиках. На основе данных за период 1962–1977 гг. в работе [3] показано, что северный полярный вихрь подвержен большому волновому возмущению, область его дислокации имеет более высокую температуру и вероятность его разрушения вследствие внезапного

стратосферного потепления выше, если экваториальные ветры на уровне 50 гПа находятся в восточной фазе. Кроме того, интенсивность и направление меридиональной циркуляции изменяются со временем. Она в зимней полусфере интенсивней, чем в летней, ввиду установления более значительного температурного градиента между экватором и полюсом в тропосфере, способствующего более высокой волновой активности, управляющей циркуляцией Брюера–Добсона (ЦБД) [4].

В настоящей статье исследуется КДЦ общего содержания и концентраций озона на отдельных высотных уровнях в стратосфере над арктической территорией и Томском по данным спутниковой аппаратуры TOMS [5].

1. Данные измерений

На Сибирской лидарной станции Института оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН (Томск: $56,48^\circ$ с.ш., $85,05^\circ$ в.д.) измерения общего содержания озона (ОСО) ведутся с помощью озонметра М-124 с 1993 г. Относительная средняя разность между наземными (М-124) и спутниковыми (TOMS) измерениями составила 17 е.Д. в 2011 г., 19 е.Д. в 2012 г. и 16 е.Д. в 2013 г. [6]. Для наглядности будем сравнивать данные по зональному ветру со спутниковыми измерениями озона. Отметим, что

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

КДЦ общего содержания аэрозолей и озона в стратосфере над Томском за период 1986–2003 гг. исследовалась в работе [7]. Было показано присутствие во временном ходе ОСО колебаний, модулируемых квазидвухлетней цикличностью зональной скорости ветра в экваториальной стратосфере, с преимущественно пониженным ОСО в западной фазе КДЦ и повышенным ОСО в восточной.

2. Результаты анализа

На рис. 1 представлены годовой ход ОСО и ряд ОСО с удаленной сезонной зависимостью за период 1996–2013 гг. Ветровая КДЦ характеризуется индексом экваториального зонального ветра на уровне 30 мбар. При его представлении принято считать, что зональные ветры в западной фазе КДЦ имеют положительные значения, а ветры в восточной фазе КДЦ – отрицательные. Как уже отмечалось, интенсивность меридиональной циркуляции максимальна в зимней полусфере [4, 8]. Поэтому в дополнение к полному ряду ОСО был проверен сигнал КДЦ озона отдельно для весенних месяцев (периода озонового максимума в средних широтах). Для этого рассчитывалось среднее ОСО для марта и апреля. Полный ряд ОСО сглаживался скользящим средним по 365 точкам.

Картина КДЦ озона на арктических широтах достаточно сложна. В отличие от КДЦ зонального ветра КДЦ озона проявляет сложную временную зависимость и асимметричную широтную структуру. Экстремумы имеют тенденцию возникать в зимне-весенний период вне зависимости от текущей фазы экваториальной КДЦ. Это трудно объяснить только с помощью КДЦ. Вероятно, в результате наложения сезонного хода и КДЦ возникает более сложное

распределение озона во внетропических широтах [9]. Тем не менее можно выделить отдельные временные интервалы, когда максимумы ОСО совпадают с минимумами зонального ветра, и наоборот. Из рис. 1 видно, что сигнал КДЦ в ОСО можно считать достаточно отчетливым до 2002–2004 гг. По всей видимости, он снова проявился после 2009 г. По большей части это связано с озоновой дырой 2011 г. в Арктике. Она совпала с западной фазой КДЦ. Естественно, ОСО после провала 2011 г. начало расти, и это совпало с восточной фазой КДЦ.

На рис. 2 показано поведение отношения смеси озона на высотных уровнях для п. Эврика за период 2005–2013 гг.

На высотные ряды наложена кривая индекса экваториальных зональных ветров. Высотные ряды на низших атмосферных уровнях практически не содержат сигнала КДЦ. Максимумы и минимумы, составляющие сигнал КДЦ, постепенно развиваются с высотой и оформляются приблизительно на 30 км. На этом уровне вариации отношения смеси озона и поведение кривой ветров находятся в достаточно отчетливой противофазе. Далее с ростом высоты сигнал КДЦ постепенно затухает. Содержание озона в стратосфере составляет преобладающую часть его общего содержания в атмосфере, поэтому все изменения ОСО определяются в основном вариациями содержания озона в области максимума озонового слоя [7]. Для Арктики это наиболее очевидно, так как в зимний период устойчивого полярного вихря происходят оседание воздушных масс, доставленных ЦБД из экваториального резервуара, их накопление и формирование озонового максимума. Поэтому следует ожидать, что сигнал КДЦ наиболее отчетлив в этих высотных интервалах.

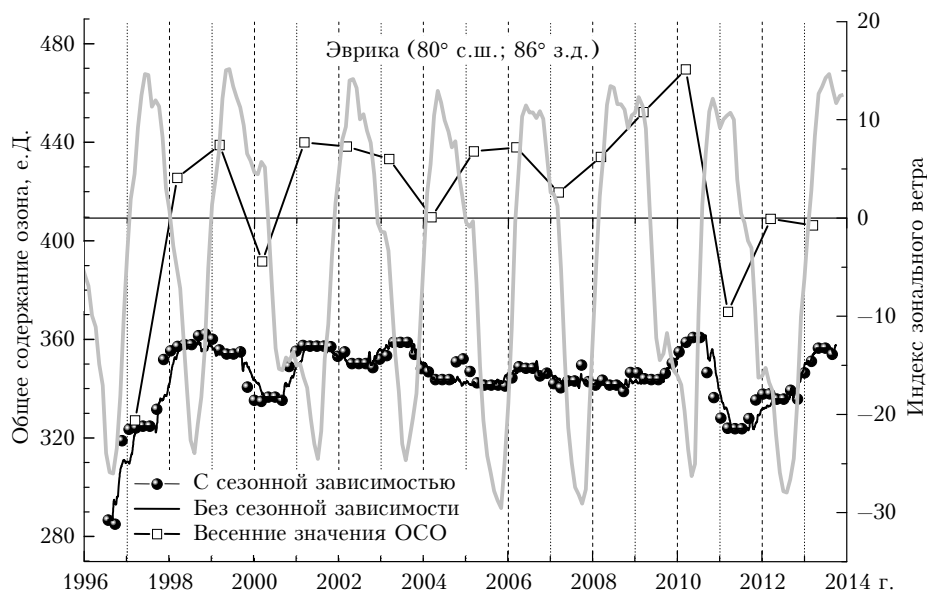


Рис. 1. Индекс зонального ветра (серая кривая), полный временной ряд ОСО с учетом и за вычетом сезонной зависимости и ряд средних весенних (март–апрель) значений. Полный ряд сглажен скользящим средним по 365 точкам

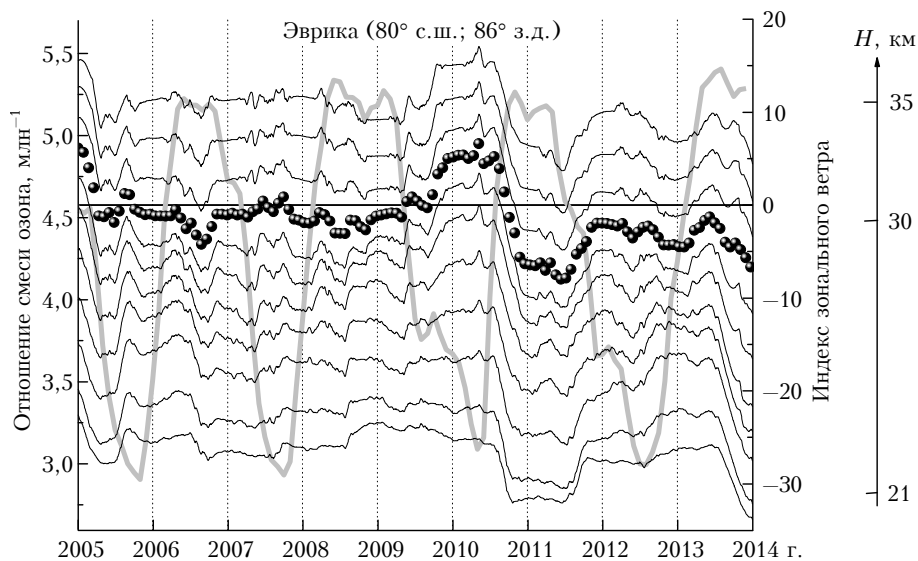


Рис. 2. Сравнение вариаций отношения смеси озона на высотных уровнях приблизительно 21, 23, 24, 26, 27, 28, 30, 31, 32, 34 и 35 км для п. Эврика с поведением экваториального зонального ветра на уровне 30 мбар. Высотные ряды сглажены с помощью скользящего среднего по 365 точкам. Символами показан ход концентрации озона на уровне ~30 км

Были исследованы высотные профили отношения смеси озона для следующих географических пунктов: Эврика, Канада (80,0° с.ш.; 86,2° з.д.; EUR); Нью-Олесунн, Норвегия (78,9° с.ш.; 11,9° в.д.; NAD); Туле, Гренландия (76,5° с.ш.; 68,7° з.д.; THU); Саммит, Гренландия (72,6° с.ш.; 38,5° з.д.; SUM); Аломар, Норвегия (69,3° с.ш.; 16,0° в.д.; ALO); Соданкюла, Финляндия (67,4° с.ш.; 26,6° в.д.; SDA); Сондрестром, Гренландия (67° с.ш.; 50,6° з.д.; SDM) и Томск, Россия (56,48° с.ш.; 85,05° в.д.;

TSK). Наиболее отчетливый сигнал озоновой КДЦ был найден в пунктах Западного полушария. Поэтому на рис. 3 представлены высотные ряды для пунктов EUR, THU, SUM и SDM на уровне 30 км. На вставке показаны временные ряды отношения смеси на высотном уровне 30 км для пункта EUR с включенной и удаленной сезонной зависимостью. Видно, что качественно кривые совпадают. Поэтому сезонная зависимость не будет удаляться из полного ряда, а будет подавляться процедурой сглаживания [7].

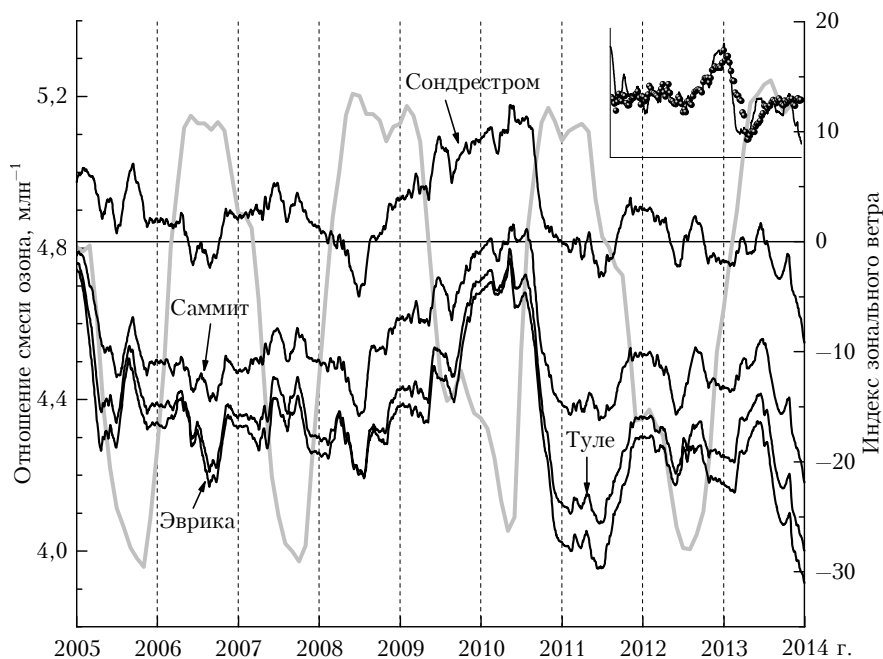


Рис. 3. Сравнение вариаций отношения смеси озона на высотном уровне 30 км для пунктов Эврика, Туле, Саммит и Сондрестром с поведением экваториального зонального ветра на уровне 30 мбар. Высотные ряды сглажены с помощью скользящего среднего по 365 точкам

В работе [10] с использованием данных озонного зондирования на западноевропейских станциях Линденберг, Хоэнпайсенберг и Пайерн проанализированы квазидвухлетние вариации в вертикальных распределениях озона, температуры, давления воздуха, зональной и меридиональной составляющих скорости ветра. В стратосфере над станциями Линденберг и Хоэнпайсенберг в озонных спектрах выявлена 28–30-месячная компонента, наиболее четкая в слоях 24–32 и 17–22 км. При сравнении озонных вариаций в различных слоях атмосферы и вариаций индекса Эль-Ниньо – Южного колебания (El Niño – Southern Oscillation, ENSO), в распределениях коэффициентов корреляции выделены два стратосферных слоя (примерно 17–23 и 26–34 км для Хоэнпайсенберга), в пределах которых 2,5-летние вариации озона, как правило, имеют фазовый сдвиг по высоте с опережением вариаций в верхней части отдельного слоя по отношению к вариациям в нижней части слоя.

В настоящей статье для количественной оценки связи между изменениями содержания озона и поведением индекса экваториального зонального ветра рассчитаны коэффициенты корреляции R между этими характеристиками на соответствующих пространственно-временных масштабах. Первоначальные

данные по ветру представлены в виде среднемесячных значений, а содержание озона определялось как среднее за день. Поэтому необходимо было привести два набора данных к общей временной сетке. Применение операции помесечного усреднения среднедневных значений концентраций озона вело к утере тонкой структуры месячного хода и, как следствие, к подавлению корреляционных связей между озоном и ветром. Исходя из этого были проведены интерполяция среднемесячных значений индекса экваториального зонального ветра и их перевод в ежедневные значения. Рассчитанные коэффициенты корреляции R представлены в таблице.

Характер распределения коэффициента корреляции с высотой в стратосфере различен между пунктами Западного и Восточного полушарий. В Западном полушарии на всех исследуемых высотах изменения концентрации озона находятся в противофазе к колебаниям зонального ветра. Как и в работе [10], в высотном поведении коэффициента корреляции можно выявить два минимума: на высотах 23–26 и 28–31 км. Следует отметить, что минимум в области малых высот отчетливо проявляется в пунктах EUR и THU, а на станциях SUM и SDM он лишь обозначен стабильно отрицательными значениями R на нескольких атмосферных уровнях.

Коэффициенты корреляции R между изменениями содержания озона на отдельных высотных уровнях в стратосфере во временном интервале 2005–2013 гг., а также за весенние месяцы и за год в интервале времени 1996–2013 гг. для указанных пунктов наблюдения, и поведением индекса экваториального зонального ветра за соответствующие периоды времени. Если не указано особо, плотность вероятности $P < 0,0001$

Высота, км; содержание O_3	EUR	THU	SUM	SDM	NYO	ALO	SDA	TOM
	80,0° с.ш.; 86,2° з.д.	76,5° с.ш.; 68,7° з.д.	72,6° с.ш.; 38,5° з.д.	67° с.ш.; 50,6° з.д.	78,9° с.ш.; 11,9° в.д.	69,3° с.ш.; 16,0° в.д.	67,4° с.ш.; 26,6° в.д.	56,48° с.ш.; 85,05° в.д.
21	-0,22	-0,17	-0,16	-0,25	0,09	0,18	0,22	-0,14
23	-0,27	-0,24	-0,19	-0,30	0,03	0,19	0,19	-0,03; $P = 0,13$
24	-0,33	-0,31	-0,19	-0,30	-0,02	0,12	0,11	0,1; $P = 0,52$
26	-0,35	-0,32	-0,19	-0,30	-0,07	-0,004	-0,02	-0,06; $P = 8E-4$
27	-0,32	-0,31	-0,25	-0,37	-0,13	-0,10	-0,16	-0,18
28	-0,34	-0,36	-0,33	-0,44	-0,20	-0,18	-0,29	-0,24
30	-0,39	-0,40	-0,35	-0,44	-0,25	-0,24	-0,32	-0,24
31	-0,41	-0,40	-0,33	-0,39	-0,28	-0,22	-0,26	-0,17
32	-0,40	-0,39	-0,30	-0,34	-0,30	-0,17	-0,18	-0,06; $P = 8E-4$
34	-0,39	-0,38	-0,26	-0,28	-0,30	-0,11	-0,09	-0,02; $P = 0,31$
35	-0,37	-0,36	-0,23	-0,22	-0,30	-0,05; $P = 0,03$	0,01; $P = 0,5$	0,04; $P = 0,03$
36	-0,36	-0,35	-0,22	-0,16	-0,30	0,04; $P = 0,01$	0,14	-0,06; $P = 0,001$
38	-0,34	-0,32	-0,19	-0,10	-0,25	0,16	0,23	-0,06; $P = 6E-4$
39	-0,32	-0,28	-0,14	-0,08	-0,17	0,21	0,24	-0,04; $P = 0,02$
Весна	-0,36; $P = 0,16$	-0,56; $P = 0,12^*$	-0,23; $P = 0,37$	-0,24; $P = 0,34$	-0,26; $P = 0,31$	-0,23; $P = 0,37$	-0,22; $P = 0,40$	-0,25; $P = 0,33$
ОСО	-0,04; $P = 7E-4$	-0,14; $P = 0,12^*$	0,04; $P = 0,003$	0,04; $P = 0,004$	-0,09	-0,08	0,01; $P = 0,24$	-0,12

* 2005–2013 гг.

В Восточном полушарии зависимость между изменениями концентрации и ветра более сложная, со слабо положительной корреляцией на высотах 21–24 км, минимумом в диапазоне $-0,24 \div -0,32$ в высотной области ~ 30 км и положительными корреляциями в диапазоне $0,14-0,24$ на высотах 36–39 км. Специфический ход показывает NAD, для которого корреляции слабо положительны на высотах 21–23 км; минимум, составляющий $-0,30$, распространяется до высот ~ 36 км, и в дальнейшем R постепенно растет с высотой. Также следует отметить ход R для пункта TSK, располагающегося в Восточном полушарии. Для него значения R отрицательны на всех высотных уровнях и имеют минимум, составляющий $-0,24$, на высоте ~ 30 км.

Средние весенние (март–апрель) значения R составляют $-0,23 \div -0,26$ для всех станций за исключением EUR ($-0,36$), а также THU ($-0,56$), для которой временной ряд оказался укороченным (2005–2013 гг.). Для временных рядов ОСО и экваториального ветра значимой корреляции не найдено. В заключение отметим, что озоновая аномалия 2011 г. в Арктике совпала по времени с западной фазой КДЦ, что могло способствовать слабости ЦБД, устойчивости полярного вихря и пониженному содержанию озона в этот год в Арктике.

Заключение

Из проведенного анализа данных измерений TOMS можно заключить следующее:

1. Коэффициент корреляции между изменениями ОСО в Арктике и Томске и вариациями экваториального зонального ветра за период 1996–2013 гг. статистически не значим. Это, по-видимому, можно объяснить многообразием и разнонаправленностью факторов, участвующих в формировании уровня ОСО на этих широтах. Средние весенние (март–апрель) значения концентрации озона и зонального ветра показывают корреляцию в интервале $-0,23 \div -0,26$ для всех станций за исключением пунктов EUR ($-0,36$) и THU ($-0,56$).

2. Ряды смесового отношения озона, составленные для отдельных высотных уровней за период 2005–2013 гг., демонстрируют квазидвухлетнюю цикличность, которая оформляется на высотах ~ 30 км и ослабевает в вышележащих областях.

3. Корреляционная зависимость между отношением смеси озона и индексом экваториального зонального ветра наиболее отчетливо проявляется в Западном полушарии и, по-видимому, имеет бимодальную (с минимумами на высотах 23–26 и 28–31 км) структуру. Максимальное значение R составляет $-0,44$ для пункта SDM. В Восточном полушарии данная зависимость более сложная, и ее знак зависит от высоты атмосферного уровня.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и образования РФ (Соглашение № 14.604.21.0100), Российского научного фонда (Соглашение № 14-27-00022) и гранта Президента РФ по поддержке ведущих научных школ НШ-4714.2014.5.

1. Hamilton K. Interhemispheric asymmetry and annual synchronization of the ozone quasi-biennial oscillation // J. Atmos. Sci. 1989. V. 46, N 7. P. 1019–1025.
2. Echer E., Guarnieri F.L., Rigozo N.R., Vieira L.E.A. A study of the latitudinal dependence of the quasi-biennial oscillation in Total Ozone Mapping Spectrometer total ozone // Tellus. A. 2004. N 56. P. 527–535.
3. Holton J.R., Hsiu-Chi Tan. The influence of the equatorial quasi-biennial oscillation on the global circulation at 50 mb // J. Atmos. Sci. 1980. V. 37, N 10. P. 2200–2208.
4. Baldwin M.P. et al. The quasi-biennial oscillation // Rev. Geophys. 2001. V. 39, N 2. P. 179–229.
5. URL: <http://avdc.gsfc.nasa.gov/>
6. Баженов О.Е. Сравнение наземных измерений общего содержания озона в Томске со спутниковыми данными // XX юбилейная Рабочая группа «Аэрозоли Сибири»: Тезисы докл. Томск, 26–29 ноября 2013 г.
7. Зуев В.В., Ельников А.В., Бурлаков В.Д. Результаты исследования квазидвухлетних колебаний содержания аэрозолей и озона в стратосфере над Томском за период 1986–2003 гг. // Оптика атмосфер. и океана. 2004. Т. 17, № 12. С. 991–995.
8. Punge H.J., Konopka P., Giorgetta M.A., Müller R. Effects of the quasi-biennial oscillation on low-latitude transport in the stratosphere derived from trajectory calculations // J. Geophys. Res. D. 2009. V. 114, N 03102. DOI: 10.1029/2008JD010518.
9. Gray L.J., Dunkerton T.J. The role of the seasonal cycle in the quasi-biennial oscillation of ozone // J. Atmos. Sci. 1990. V. 47, N 20. P. 2429–2451.
10. Груздев А.Н., Безверхний В.А. Квазидвухлетние вариации озона и метеопараметров над Западной Европой по данным озонного зондирования // Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана. 2006. Т. 42, № 2. С. 224–236.

O.E. Bazhenov. Study of the quasi-biennial oscillation of total ozone and ozone concentrations at individual altitude levels over Arctic and Tomsk according to data of TOMS satellite instrumentation.

The paper analyzed the pattern of the quasi-biennial oscillation of the total ozone (TO) and ozone concentrations at separate altitudinal levels in the stratosphere over Arctic territory and Tomsk according to data of TOMS satellite instrumentation. The correlation coefficient between TO changes and variations in equatorial zonal wind for the period of 1996–2013 is statistically insignificant. The average springtime (over March–April) values of ozone concentration and zonal wind mostly show the correlation in the interval of $-0.23 \div -0.26$. The time series of the mixing ratio, composed for separate altitudinal levels over the period of 2005–2013, exhibit quasi-biennial oscillation, which takes shape at heights of ~ 30 km and weakens in overlying regions. The correlation dependence between the ozone mixing ratio and the equatorial zonal wind index most distinctly manifests itself in the Western Hemisphere and is more complex in the Eastern Hemisphere.