

Оценка эффектов извержения вулкана Пинатубо в стратосферном содержании O_3 и NO_2 с учетом вариаций уровня солнечной активности

А.Н. Груздев*

*Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН
119017, г. Москва, Пыжевский пер., 3*

Поступила в редакцию 10.01.2014 г.

По данным спутниковых измерений концентрации озона с помощью приборов SBUV, SBUV-2 и результатам наземных измерений общего содержания NO_2 на сети NDACC получены оценки воздействий извержения влк. Пинатубо и вариаций уровня солнечной активности на стратосферное содержание O_3 и NO_2 . Уменьшение содержания NO_2 в результате извержения влк. Пинатубо на разных станциях составило от 19 до 34%, при этом уменьшение содержания NO_2 в Южном полушарии (ЮП) в целом несколько больше, чем в Северном полушарии (СП). Уменьшение концентрации O_3 в нижней стратосфере внетропических широт СП (~10%), наоборот, намного больше, чем в ЮП. Максимальное процентное уменьшение концентрации озона ~22% выявлено в окрестности уровня 10 гПа (32 км) на 10–15° ю.ш. Эффект 11-летнего солнечного цикла в стратосферном озоне в общих чертах симметричен относительно экватора. Высотные максимумы отклика O_3 на солнечный цикл выявлены на высотах 50–55, 35–40 и ниже 25 км. Изменения концентрации O_3 в этих слоях обычно заключены в пределах нескольких процентов. В отклике NO_2 на 11-летний солнечный цикл выявлены существенные межполушарные различия. Содержание NO_2 в фазе максимума солнечной активности на большей части станций ЮП обычно меньше, чем в фазе минимума. Содержание NO_2 в низких и средних широтах СП чаще выше во время максимума солнечной активности, чем во время минимума. Изменения содержания NO_2 в солнечном цикле обычно заключены в пределах 5%.

Ключевые слова: озон, NO_2 , влк. Пинатубо, солнечная активность; ozone, NO_2 , Pinatubo volcano, solar activity.

Введение

Продукты мощных взрывных вулканических извержений, выбрасываемые в стратосферу, могут находиться в ней в течение длительного времени, приводя к заметным изменениям химического состава, температуры и циркуляции атмосферы [1]. В период инструментальных наблюдений состава стратосферы произошло два крупных извержения с выбросом вулканических продуктов до высот 30–34 км. Это извержения вулканов Эль-Чичон в Мексике в марте–апреле 1982 г. и Пинатубо на Филиппинах в июне 1991 г. Обусловленные ими изменения температуры, содержания озона и некоторых других примесей отмечены в разных регионах от Арктики до Антарктики [2–14].

Вызванные вулканическими извержениями изменения накладываются на изменения, обусловленные другими причинами. В большинстве работ оценки вулканического эффекта основаны на относительно коротких рядах измерений. Отметим, что извержения вулканов Эль-Чичон и Пинатубо произошли в конце фазы максимума солнечной активности и временной интервал между извержениями

(~9,2 лет) близок к периоду 11-летнего солнечного цикла, который составил для того интервала времени около 10 лет (рис. 1, а). Для более четкого разделения вулканического и солнечного эффектов в данных измерений нужны временные ряды, включающие достаточно длительный период наблюдений в отсутствие крупных извержений.

В [15–17] получены оценки уменьшения стратосферного содержания NO_2 после извержения влк. Пинатубо с учетом вариаций уровня солнечной активности. С момента опубликования работ [16, 17], в которых представлено широтное распределение эффекта Пинатубо в содержании NO_2 во внетропических широтах северного (СП) и южного (ЮП) полушарий, данные измерений на некоторых станциях были скорректированы и оценки вулканического эффекта по этим данным могут отличаться от прежних оценок.

Цель настоящей работы состоит в анализе воздействия продуктов извержения влк. Пинатубо на стратосферное содержание NO_2 и озона по результатам измерений. Совместное рассмотрение вулканических эффектов в озоне и NO_2 представляет интерес по следующим причинам. Согласно фотохимическим представлениям на поверхностях аэрозольных частиц, образовавшихся из продуктов извержения, происходит гидролиз азотного ангидрида N_2O_5 с образованием азотной кислоты HNO_3 , в результате чего

* Александр Николаевич Груздев (a.n.gruzdev@mail.ru).

возрастает содержание HNO_3 и падает содержание окислов азота, включая NO_2 [6, 18]. Уменьшение содержания окислов азота, с одной стороны, должно приводить к увеличению содержания озона, а с другой – способствовать большей эффективности разрушения озона в водородном и хлорном циклах [11, 19]. Таким образом, уменьшение содержания NO_2 есть прямой результат гетерогенных химических реакций на поверхности вулканического аэрозоля, в то время как отклик озона является опосредованным и вызван смещением фотохимического баланса O_3 .

Использованные данные и метод анализа

Измерения отношения смеси озона в 1978–2003 гг. с борта спутников Nimbus-7, NOAA-9, NOAA-11 и NOAA-16 проводились с помощью приборов SBUV и SBUV-2. Данные доступны по адресу <http://mirador.gsfc.nasa.gov/cgi-bin/mirador/presentNavigation.pl?tree=project&project=SBUV&CGISESSID=3e87ff5484b18bc47992ab39ff6a5c2d>. Результаты спутниковых измерений были нами усреднены по широтным поясам шириной 5° и помесечно.

Исходные данные об озоне содержат значения отношения смеси O_3 на изобарических поверхностях в диапазоне от 50 до 0,5 гПа, а также значения содержания O_3 в различных атмосферных слоях, причем высоты нижнего и верхнего слоев выходят за пределы указанного диапазона. Аналогично [20], для анализа были использованы данные на изобарических поверхностях и, для расширения высотного диапазона, – данные по слоям. Для приблизительной привязки по высоте значений содержания O_3 в нижнем (1000–63 гПа) и верхнем (выше 0,4 гПа) слоях им поставлены в соответствие положения «центров тяжести» этих озонных слоев. «Центр тяжести» определялся как уровень, делящий слой на две части с одинаковыми значениями в них интегрального содержания озона. При этом считалось, что характер вертикального распределения озона внутри слоя оп-

ределяется вертикальным градиентом концентрации O_3 , значение которого предполагалось равным вертикальному градиенту на ближайшем участке вертикального профиля озона по данным, приведенным на изобарических поверхностях. Положение «центра тяжести» верхнего слоя незначительно варьирует по широте и принято равным 0,27 гПа. Положение «центра тяжести» нижнего слоя изменяется от ~80 гПа на экваторе до 100 гПа в средних широтах и для простоты везде принято равным 90 гПа.

В качестве данных об NO_2 использованы результаты утренних и вечерних измерений общего содержания NO_2 на станциях Сети для обнаружения изменений состава атмосферы (Network for the Detection of Atmospheric Composition Change – NDACC). Они доступны по адресу <http://www.ndacc.org>. Список станций с наиболее длинными рядами измерений приведен в таблице.

Наблюдения на некоторых станциях (2, 3, 6, 7, 8, 12, 15, 16) начаты до или вскоре после извержения влк. Пинатубо. Содержание NO_2 в тропосфере в фоновых условиях мало (это справедливо для большинства станций), и подавляющий вклад в него вносит стратосфера. На ст. Звенигород, расположенной в Подмосковье, используется специальный метод, позволяющий выделять стратосферную и тропосферную части общего содержания NO_2 [21, 22]. Поэтому общее содержание NO_2 будем отождествлять с содержанием NO_2 в вертикальном столбе стратосферы.

Для анализа использован метод множественной линейной регрессии, но вулканические эффекты в озоне и NO_2 аппроксимировались несколько различающимися способами. Это вызвано различиями амплитуды данных эффектов в O_3 и NO_2 .

На рис. 1, б–г в качестве примера приведены среднемесячные значения содержания NO_2 в Звенигороде, Лаудере (Южный остров) и Дюмон-Дюрвиле (Восточная Антарктида) по результатам утренних и вечерних измерений. Различие между утренними и вечерними значениями для Дюмон-Дюрвиля невелико из-за относительно более слабого суточного хода NO_2 в периоды полярного дня и полярной ночи

Станции наблюдений NO_2

Номер, станция	Широта	Долгота	Период наблюдений
1. Нью-Олесунн (Ny-Alesund)	78,92° с.ш.	11,93° в.д.	Март 1992 – апрель 2008
2. Скорсбисунн (Scoresbysund)	70,48° с.ш.	21,95° з.д.	Октябрь 1991 – декабрь 2012
3. Кируна (Kiruna)	67,84° с.ш.	20,41° в.д.	Август 1991 – март 2010
4. Жиганск	66,79° с.ш.	123,35° в.д.	Декабрь 1991 – декабрь 2012
5. Харестуа (Harestua)	60,22° с.ш.	10,75° в.д.	Январь 1994 – апрель 20013
6. Звенигород	55,69° с.ш.	36,77° в.д.	Март 1990 – декабрь 2012
7. Юнгфрауйох (Jungfraujoch)	46,55° с.ш.	7,98° в.д.	Июнь 1990 – август 2012
8. Иссик-Куль	42,62° с.ш.	76,99° в.д.	Январь 1983 – август 2012
9. Мауна-Лоа (Mauna Loa)	19,54° с.ш.	155,58° з.д.	Июль 1996 – январь 2008
10. Реюньон (Reunion)	20,90° ю.ш.	55,48° в.д.	Июль 1993 – декабрь 2012
11. Бауру (Bauro)	22,35° ю.ш.	49,03° з.д.	Ноябрь 1995 – декабрь 2012
12. Лаудер (Lauder)	45,04° ю.ш.	169,68° в.д.	Декабрь 1980 – декабрь 2012
13. Кергелен (Kerguelen)	49,35° ю.ш.	70,26° в.д.	Декабрь 1995 – декабрь 2012
14. Маккуори (Macquarie)	54,50° ю.ш.	158,94° в.д.	Январь 1996 – декабрь 2012
15. Дюмон-Дюрвиль (Dumont d'Urville)	66,67° ю.ш.	140,02° в.д.	Январь 1988 – декабрь 2012
16. Арривал-Хайтс (Arrival Heights)	77,83° ю.ш.	166,66° в.д.	Февраль 1991 – октябрь 2010

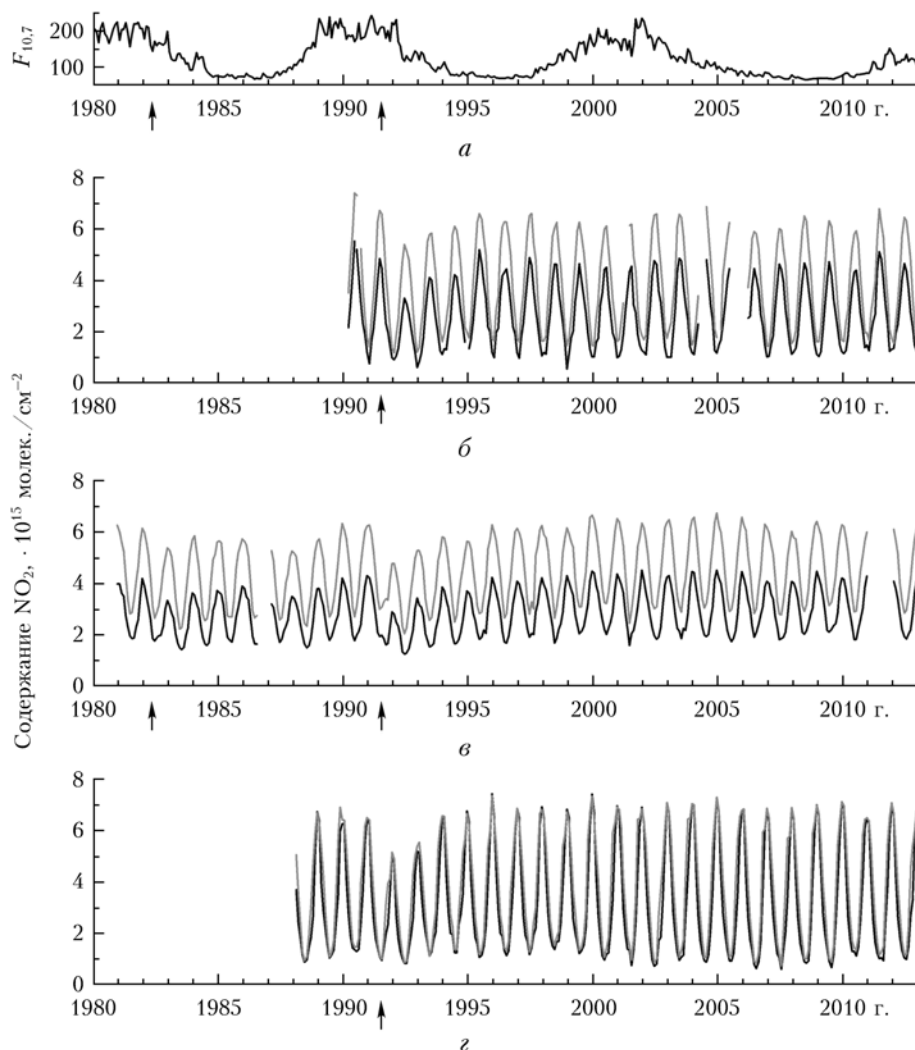


Рис. 1. Среднемесячные значения индекса солнечной активности $F_{10,7}$ в единицах $10^{-22} \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{Гц}^{-1}$ (а) и содержания NO_2 в вертикальном столбе стратосферы по результатам утренних (черные кривые) и вечерних (серые кривые) измерений на станциях Звенигород (б), Лаудер (в) и Дюмон-Дюрвиль (г). Стрелками показаны моменты извержения вулканов Эль-Чичон в 1982 г. и Пинатубо в 1991 г.

(рис. 1, г). На рис. 1, а приведены среднемесячные значения индекса солнечной активности $F_{10,7}$ — потока солнечного радиоизлучения на длине волны 10,7 см.

Как следует из рис. 1, после извержений вулканов Эль-Чичон и Пинатубо произошло уменьшение стратосферного содержания NO_2 , и оно пришлось на нисходящую фазу солнечной активности. Уменьшение было особенно значительным и длительным после извержения влк. Пинатубо. Для вулканического эффекта характерны относительно быстрое уменьшение содержания NO_2 вскоре после извержений и последующее более медленное его возрастание.

На рис. 2 показаны среднесезонные среднемесячные значения отношения смеси озона на стратосферных уровнях над экватором и в высоких широтах СП. Они соответствуют областям наибольшего изменения концентрации озона после извержения влк. Пинатубо (см. следующий раздел).

Из рис. 2 следует, что эффект извержения Эль-Чичона визуально не выявляется в озонных дан-

ных, а эффект извержения влк. Пинатубо не всегда отчетливо проявляется на фоне межгодовой изменчивости.

Аналогично [16, 17] для анализа содержания NO_2 использована модель множественной линейной регрессии:

$$\begin{aligned}
 [\text{NO}_2](t_n) = & a_0 + a_1 t_n + a_2 A(t_n) + a_3 F(t_n) + \\
 & + a_4 Q(t_n + t_{dQ}) + a_5 S(t_n + t_{dS}) + a_6 V_P(t_n) + \\
 & + a_7 V_E(t_n) + \varepsilon(t_n), \quad n = 1, \dots, N, \quad (1)
 \end{aligned}$$

где $[\text{NO}_2](t_n)$ — ряд среднемесячных значений содержания NO_2 ; t_n — время; N — количество членов ряда; A — периодически продленный годовой ход NO_2 ; F — индекс солнечной активности $F_{10,7}$ (адрес: http://sec.noaa.gov/ftpmenu/indices/old_indices.html); Q — среднемесячные значения зональной скорости экваториального стратосферного ветра на изобарической поверхности 30 гПа (<http://www.geo.fu-berlin.de/>

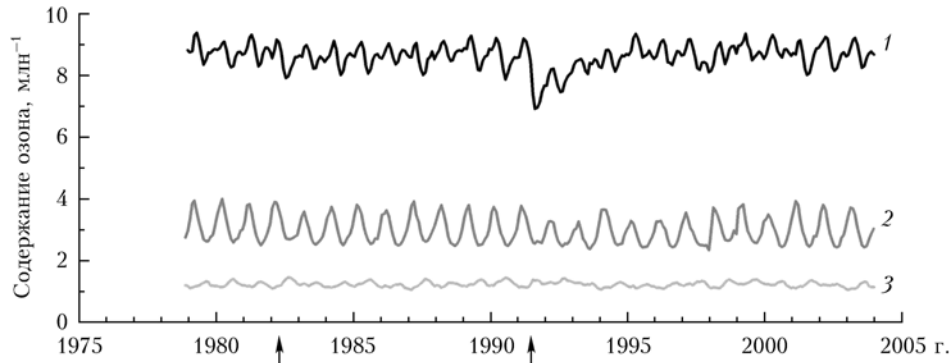


Рис. 2. Среднесезонные значения отношения смеси озона на изобарической поверхности 15 гПа на широте 10° ю.ш. (1) и на изобарической поверхности 50 гПа на широтах 60° с.ш. (2) и 5° ю.ш. (3). Стрелками показаны моменты извержений вулканов Эль-Чичон в 1982 г. и Пинатубо в 1991 г.

en/met/ag/strat/produkte/qbo/index.html), использованные в качестве индекса квазидвухлетней цикличности; S — среднесезонные значения индекса Эль-Ниньо — Южного колебания (<http://www.bom.gov.au/climate/current/soihtm1.shtml>); V_P , V_E — индексы стратосферного содержания аэрозоля после извержения влк. Пинатубо и влк. Эль-Чичон; t_{dQ} и t_{dS} — временные задержки; a_0, a_1, \dots, a_7 — искомые константы, имеющие смысл линейного тренда (a_1) и других коэффициентов регрессии (a_2, \dots, a_7); ε — остаточный ряд, включающий неучтенные в модели зависимости, а также случайные ошибки.

Индекс V_P представлен в виде

$$V_P(t_n) = 0 \quad \text{при } t_n \leq T_P + t_{dP};$$

$$V_P(t_n) = (1 - \exp(-t_n/\tau_{ox})) \exp(-t_n/\tau_a) (1 + g\gamma(t_n))$$

при $t_n > T_P + t_{dP}$, (2)

где T_P — момент извержения влк. Пинатубо (июнь 1991 г.); t_{dP} — задержка появления продуктов извержения над пунктом наблюдения NO_2 ; τ_{ox} — постоянная времени окисления SO_2 , характеризующая нарастание площади поверхности частиц стратосферного аэрозоля; τ_a — постоянная времени удаления аэрозоля из стратосферы; γ — нормированный на амплитуду годовой ход NO_2 ; g — константа. Индекс V_E представлен похожим образом за тем исключением, что в выражении для него отсутствует последний множитель, а значения постоянных времени нарастания и удаления аэрозоля полагаются, согласно [15], равными 5,8 нед и одному году соответственно.

Переопределенная ($N \gg 8$) система уравнений (1) решалась методом наименьших квадратов при варьировании параметров t_{dQ} , t_{dS} , t_{dP} , t_{dE} (задержка появления продуктов извержения влк. Эль-Чичон), τ_{ox} , τ_a и g . Окончательные значения параметров определялись из условия минимизации дисперсии остаточного ряда. Доверительные интервалы определялись при решении системы (1).

Для анализа содержания O_3 использована следующая регрессионная модель:

$$[\text{O}_3](t_n) = a_0 + a_1 t_n + a_2 A(t_n) + a_3 F(t_n) + a_4 Q(t_n + t_{dQ}) + a_5 V_P(t_n) + \varepsilon(t_n), \quad n = 1, \dots, N. \quad (3)$$

В ней индекс V_P , зависящий от высоты и широты, аппроксимировался по формуле (2) с исключенным из нее последним сомножителем (т.е. полагалось $g = 0$). Система уравнений (3) решалась при варьировании параметра t_{dQ} , а значения параметров t_{dP} , τ_{ox} и τ_a задавались. Они оценивались по представленным в [23, 24] результатам наблюдения площади поверхности стратосферного аэрозоля. За пределами слоя вулканического аэрозоля полагалось $V_P = 0$.

Результаты анализа и их обсуждение

Вулканический эффект

Уменьшение содержания NO_2 после извержения влк. Пинатубо можно оценить, умножая формулу (2) на коэффициент регрессии a_6 , определяемый из решения системы (1). На рис. 3, а представлено широтное распределение уменьшения содержания NO_2 после извержения влк. Пинатубо. Значения, полученные по данным утренних и вечерних измерений, близки между собой. Уменьшение содержания NO_2 в ЮП в целом несколько больше, чем в СП. Полученные значения для СП находятся в пределах $(0,9-1,7) \cdot 10^{15}$ молек./см², а для ЮП — в пределах $(1,4-2,4) \cdot 10^{15}$ молек./см². Максимальное уменьшение содержания NO_2 отмечено в высоких широтах ЮП по результатам измерений на ст. Дюмон-Дюрвиль. В процентном отношении уменьшение вне полярных областей составило 27–38% по утренним данным и 21–29% по вечерним (рис. 3, б). Это соответствует 23–33% относительно среднедневных значений содержания NO_2 . В Антарктике содержание NO_2 уменьшилось на 27–34%, а в Арктике — на 19–23%. Максимальное процентное уменьшение содержания NO_2 отмечено в средних широтах СП по результатам измерений на ст. Юнгфрауйох.

Полученные оценки вулканического эффекта в NO_2 на некоторых станциях весьма заметно отличаются от предыдущих оценок, опубликованных в [17]. По новым оценкам эффект Пинатубо над станциями Дюмон-Дюрвиль и Юнгфрауйох проявился сильнее, а над ст. Иссък-Куль — слабее, чем по предыдущим оценкам. Оценки для ст. Скорсбисунн (№ 2 на рис. 3) получены впервые, и они хорошо соответствуют оценкам для ближайшей к ней по широте

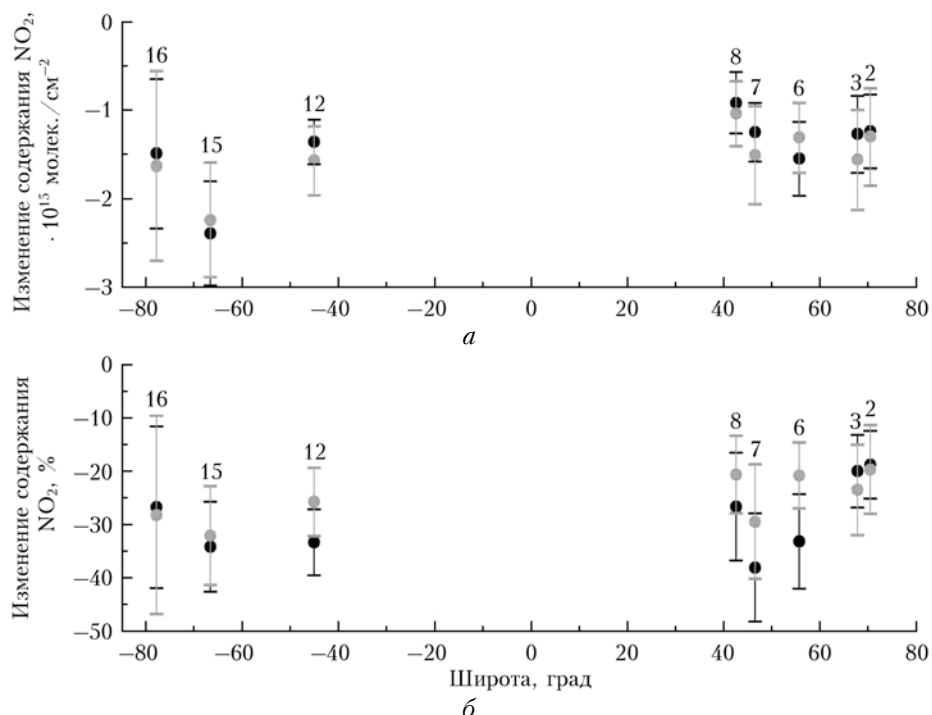


Рис. 3. Максимальные значения изменения содержания NO_2 в столбе стратосферы после извержения влк. Пинатубо по данным утренних (черные кружки) и вечерних (серые кружки) измерений в абсолютных единицах (а) и в процентах относительно многолетних среднегодовых значений (б). Вертикальные отрезки соответствуют 95%-м доверительным интервалам. Цифры – номера станций

ст. Кируна. Отметим также соответствие новых оценок для ст. Лаудер оценкам, полученным в [15–17]. Межполушарная асимметрия вулканического эффекта и его количественные оценки на рис. 3 вполне адекватно воспроизводятся в расчетах с помощью химико-климатической модели в [25].

Широтно-высотное распределение эффекта извержения влк. Пинатубо в стратосферном озоне показано на рис. 4.

Можно выделить два высотных слоя с уменьшением концентрации O_3 : слой 25–32 км в широтном поясе 50° с.ш. – 40° ю.ш. и слой 18–25 км в более

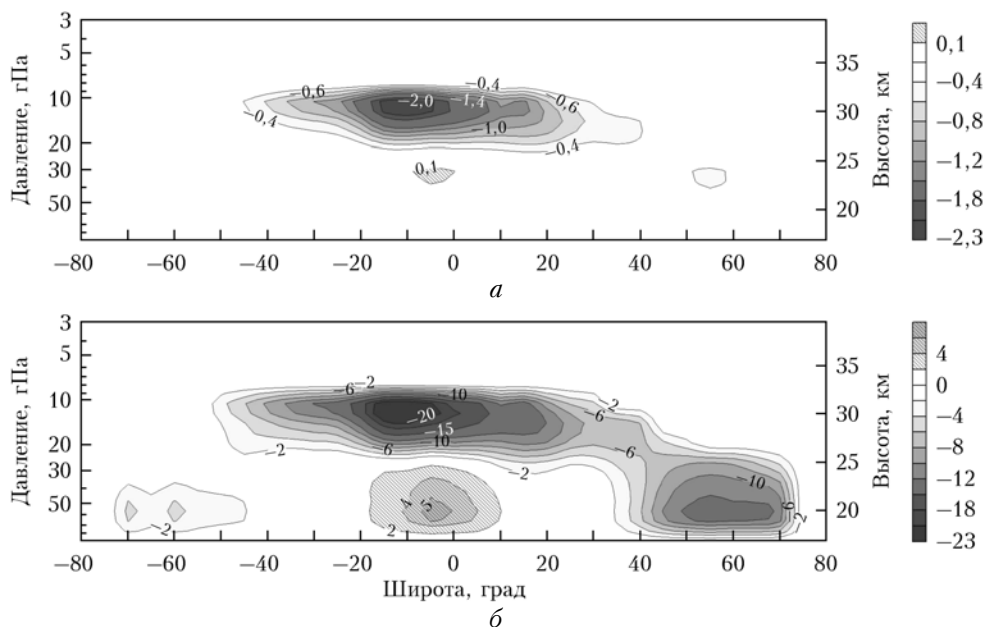


Рис. 4. Максимальные значения изменений отношения смеси озона (млн^{-1}) в слое вулканического аэрозоля (а) и соответствующие им процентные изменения относительно многолетних среднегодовых значений (б) в зависимости от широты и высоты

высоких широтах обоих полушарий. В нижней стратосфере над экватором отмечено увеличение концентрации O_3 на ~4% (рис. 4, б). Максимальное уменьшение концентрации озона в относительных единицах ~22% характерно для окрестности уровня 10 гПа (~32 км) в широтной зоне 10–15° ю.ш. (широта влк. Пинатубо 15° ю.ш.). Уменьшение в нижнем слое в СП, достигающее 12%, намного больше, чем в ЮП (~2%).

В [25–27] обсуждается положительная аномалия общего содержания озона в средних и высоких широтах ЮП после извержения влк. Пинатубо. Слабая отрицательная аномалия концентрации озона в ЮП на рис. 4, б не противоречит этим результатам. Во-первых, она соответствует по времени появлению и развитию в нижней стратосфере слоя вулканического аэрозоля [24, рис. 14]. Во-вторых, этой аномалии соответствует отрицательная аномалия общего содержания озона [26, рис. 7] и [25, рис. 1] в высоких и полярных широтах ЮП. Так или иначе и наши результаты, и результаты работ [25–27] свидетельствуют о значительной межполушарной асимметрии эффекта Пинатубо в содержании озона в нижней стратосфере.

Из результатов модельных расчетов [25] и анализа данных реанализа [27] следует, что ослабление вулканического эффекта в озоне в ЮП вызвано усилением меридиональной циркуляции Брюэра–Добсона с нисходящей ветвью во внетропических широтах ЮП, компенсирующей за счет переноса из тропиков убыль озона в слое вулканического аэрозоля. По мнению авторов [25], это не отразилось на эффекте Пинатубо в NO_2 по причине гораздо меньшего временного масштаба гетерогенных химических процессов в отношении разрушения NO_2 , чем в отношении разрушения озона, а также в силу несущественной роли вертикальной адвекции NO_2 из-за малого вертикального градиента содержания NO_2 в слое вулканического аэрозоля. Однако наши наблюдения указывают на значительную величину вертикального градиента NO_2 в окрестности 20-км высоты [8, 21]. Поэтому причиной того, что эффект Пинатубо в NO_2 в ЮП, как и в СП, проявился в полной мере, следует, по-видимому, считать малость характерного времени фотохимической релаксации семейства окислов азота NO_x к фотохимически равновесному состоянию по сравнению с временным масштабом глобальной атмосферной циркуляции.

Полученные нами оценки изменения концентрации стратосферного озона после извержения влк. Пинатубо, как правило, меньше оценок, опубликованных в 1990-х гг. по результатам анализа вертикальных профилей O_3 . Так, уменьшение концентрации озона по данным озонзондов оценено в 15% в слое 12–22 км над США [4], 10–30% в слое 15–20 км над Западной Европой [10], 15% в слое 16–24 км во внетропических широтах СП [13], в то время как по нашим результатам максимальное уменьшение внутри этого слоя составило ~10% (см. рис. 4, б). Анализируя данные озонного зондирования в тропиках в сопоставлении с предшествующими результатами спутниковых измерений (SAGE II), авторы

[5] дают оценку уменьшения содержания озона до 33% в слое 16–28 км, в то время как в соответствии с рис. 4, б уменьшение концентрации O_3 в окрестности высоты 30 км не превысило над тропиками 23%. В [11] сообщается о 10%-м уменьшении концентрации O_3 на изобарической поверхности 17 гПа в широтном поясе 35–45° ю.ш., выявленном на основе спутниковых данных HALOE, а по нашим результатам уменьшение здесь составило ~4%. В [28] сообщается о 8–10%-м уменьшении содержания озона в слое 15–24 км над индийскими станциями озонного зондирования (18–28° с.ш.). Согласно нашим результатам, уменьшение среднезональной концентрации озона ниже 24 км в этом широтном поясе менее 1% (оно не показано на рис. 4 как статистически незначимое), при этом в экваториальном поясе в данном слое отмечено увеличение концентрации O_3 .

Расхождение оценок может быть вызвано рядом причин. Это различие типов использованных данных, разная длительность временных рядов, отличающиеся от нашего способы учета вариаций уровня солнечной активности [13], отсутствие или невозможность такого учета [5, 10, 11]. Изменения концентрации стратосферного озона в 11-летнем солнечном цикле происходят примерно в фазе с циклом [20], и уменьшение концентрации озона, связанное с понижением уровня солнечной активности в период после извержения влк. Пинатубо, накладывается на изменение концентрации O_3 в результате вулканического эффекта. Поэтому оценки уменьшения концентрации O_3 в результате извержения могут быть завышены, если не учитывать влияние солнечного цикла.

Эффект солнечного цикла

Изменение содержания NO_2 и O_3 в 11-летнем солнечном цикле можно оценить, умножая коэффициенты регрессии a_3 в (1) и (2) на разность между средними за периоды наблюдений NO_2 и O_3 значениями потока $F_{10.7}$ в фазах максимума и минимума солнечной активности. На рис. 5 приведены величины такого изменения для NO_2 . Сразу отметим, что оценки эффекта солнечного цикла в NO_2 и характер их широтного распределения претерпели заметные изменения по сравнению с результатами, представленными в [16, 17].

Как следует из рис. 5, содержание NO_2 в фазе максимума солнечной активности на большинстве станций ЮП, за исключением станций Лаудер (№ 12) и Арривал Хайтс (№ 16), обычно меньше, чем в фазе минимума. Аналогичная зависимость от уровня солнечной активности характерна и для станций Звенигород (№ 6) и Нью-Олесунн (№ 1) в СП. Однако в целом содержание NO_2 в низких и средних широтах СП выше во время максимума солнечной активности, чем во время фазы минимума. Согласно полученным оценкам изменения содержания NO_2 в солнечном цикле большей частью заключены в пределах 5%. Отметим, что знаки новых оценок для станций Лаудер и Звенигород, «выбивающихся»

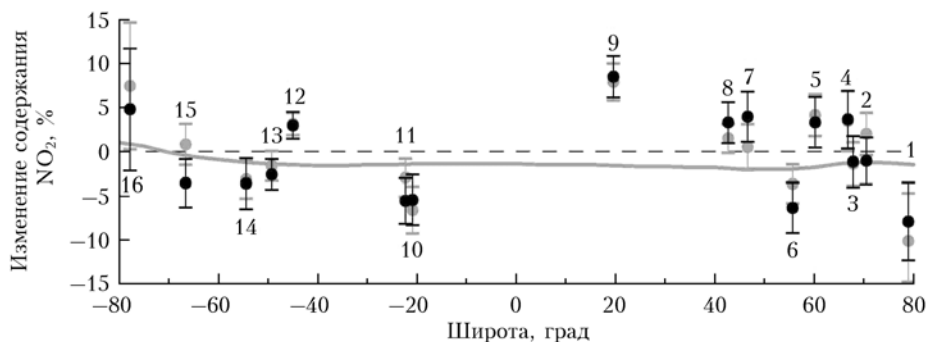


Рис. 5. Изменение содержания NO_2 в вертикальном столбе стратосферы от фазы минимума к фазе максимума солнечной активности в зависимости от широты по данным утренних (черные кружки) и вечерних (серые кружки) измерений и по расчетам с помощью модели SOCRATES (кривая). Вертикальные отрезки соответствуют 95%-м доверительным интервалам. Цифры – номера станций

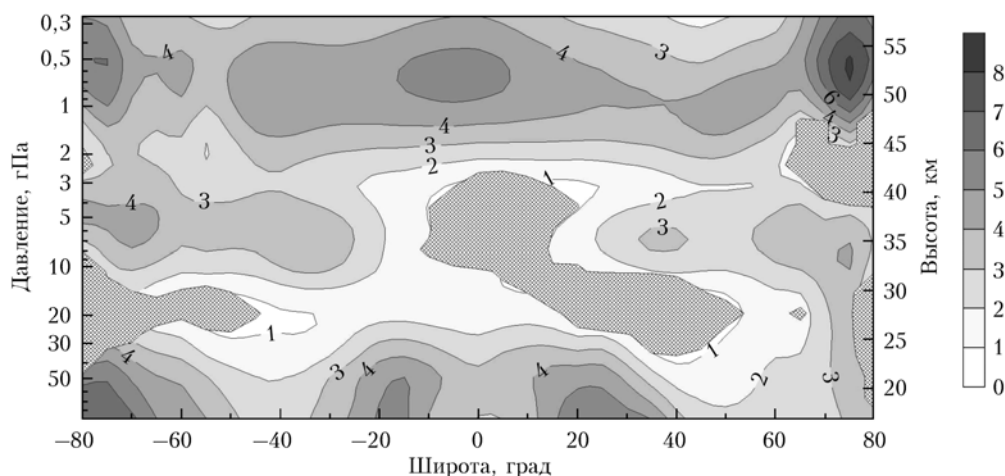


Рис. 6. Изменение содержания озона от фазы минимума к фазе максимума солнечной активности (%) в зависимости от широты и высоты. Заштрихованные области соответствуют статистически недостоверным значениям (по уровню статистической значимости 0,05)

из окружающего их «фона» (см. рис. 5), остались неизменными в сравнении с результатами анализа в [15–17]. Очень вероятно, что эффект 11-летнего солнечного цикла в NO_2 неоднороден по долготе, и в его широтном распределении на рис. 5 проявились региональные особенности. Однако недостаточное количество станций наблюдения NO_2 не позволяет провести зональное осреднение.

Кривой на рис. 5, заимствованной из [16], показано изменение содержания NO_2 в стратосферном столбе между фазами максимума и минимума солнечной активности по расчетам на двумерной среднезональной фотохимической модели SOCRATES (подробности см. в [16]). Качественное соответствие (по знаку эффекта) между модельными результатами и результатами анализа данных измерений можно отметить лишь для ЮП.

Изменение содержания стратосферного озона от минимума к максимуму солнечной активности как функция широты и высоты показано на рис. 6. В отличие от NO_2 , содержание озона в большей части стратосферы изменяется примерно в фазе с солнечной активностью, и широтно-высотная структура отклика озона на 11-летний солнечный цикл в общих чертах симметрична относительно экватора. Высот-

ные максимумы эффекта солнечного цикла в O_3 характерны для верхней окрестности стратоспаузы (50–55 км), средней стратосферы (35–40 км) и нижней стратосферы (ниже 25 км). Изменения концентрации O_3 в этих слоях обычно заключены в пределах нескольких процентов, но в полярных областях могут достигать больших значений. Эффект солнечного цикла в озоне рассмотрен более подробно в [20].

Заключение

В работе с помощью метода множественной линейной регрессии получены оценки воздействия извержения влк. Пинатубо и вариаций уровня солнечной активности на стратосферное содержание озона и NO_2 по результатам измерений. Использованы данные спутниковых измерений отношения смеси озона с помощью приборов SBUV и SBUV-2 в 1978–2003 гг. и данные утренних и вечерних измерений общего содержания NO_2 на станциях сети NDACC в течение 12–30 лет. Эффект извержения влк. Пинатубо проявился в период понижающей фазы солнечной активности и наложился, таким образом, на эффект, обусловленный 11-летним солнечным циклом.

Уменьшение содержания NO_2 в результате извержения влк. Пинатубо составило в средних широтах 23–33% относительно многолетних среднегодовых дневных значений содержания NO_2 . В Антарктике содержание NO_2 уменьшилось на 27–34%, а в Арктике – на 19–23%. Уменьшение содержания NO_2 в ЮП в целом несколько больше, чем в СП.

В широтно-высотном распределении отклика озона на извержение влк. Пинатубо выделяются два слоя с уменьшением концентрации O_3 после извержения вулкана: слой 25–32 км в широтной зоне 50° ю.ш. – 40° с.ш. и слой 18–25 км в более высоких широтах обоих полушарий. Максимальное процентное уменьшение концентрации озона ~ 22% выявлено в окрестности уровня 10 гПа (32 км) на 10–15° ю.ш. Уменьшение в нижнем слое в Северном полушарии, достигающее 12%, намного больше, чем в Южном полушарии (~ 2%). В нижней стратосфере над экватором отмечено увеличение концентрации O_3 на ~ 4%.

Содержание озона в большей части стратосферы изменяется примерно в фазе с солнечной активностью. В отличие от эффекта Пинатубо, эффект 11-летнего солнечного цикла в стратосферном озоне в общих чертах симметричен относительно экватора. Высотные максимумы отклика O_3 на солнечный цикл выявлены в верхней окрестности стратопаузы (50–55 км), средней (35–40 км) и нижней (ниже 25 км) стратосфере. Изменения концентрации O_3 в этих слоях обычно заключены в пределах нескольких процентов, но в полярных областях могут достигать больших значений.

Изменения содержания NO_2 в солнечном цикле чаще всего заключены в пределах 5%. Однако в отклике NO_2 на 11-летний солнечный цикл выявлены существенные межполушарные различия. Содержание NO_2 в фазе максимума солнечной активности на большей части станций ЮП обычно меньше, чем в фазе минимума. Содержание NO_2 в низких и средних широтах СП чаще выше во время максимума солнечной активности, чем во время минимума. Важные исключения из этих закономерностей указывают на существенные региональные особенности 11-летних вариаций содержания NO_2 .

Автор признателен всем людям, связанным с организацией и выполнением измерений содержания NO_2 на сети NDACC и обработкой их результатов. Данные о содержании NO_2 доступны на сайте NDACC по адресу <http://www.ndacc.org>. Данные о содержании озона подготовлены Сервисным центром информации и данных (Data and Information Services Center – DISC) Центра космических полетов им. Годдарда (Goddard Space Flight Center).

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты № 12-05-00938, 13-05-00187) и программ РАН.

1. *Robock A.* Volcanic eruptions and climate // *Rev. Geophys.* 2000. V. 38, N 2. P. 191–219.
2. *Johnston P.V., McKenzie R.L., Keys J.G., Matthew W.A.* Observations of depleted stratospheric NO_2 following the Pinatubo volcanic eruption // *Geophys. Res. Lett.* 1992. V. 19, N 2. P. 211–213.

3. *Chandra S.* Changes in stratospheric ozone and temperature due to the eruption of Mt. Pinatubo // *Geophys. Res. Lett.* 1993. V. 20, N 1. P. 33–36.
4. *Hofmann D.J., Oltmans S.J., Komhyr W.D., Harris J.M., Lathrop J.A., Langford A.O., Deshler T., Johnson B.J., Torres A., Matthews W.A.* Ozone loss in the lower stratosphere over the United States in 1992–1993: Evidence for heterogeneous chemistry on the Pinatubo aerosol // *Geophys. Res. Lett.* 1994. V. 21, N 1. P. 65–68.
5. *Grant W.B., Browell E.V., Fishman J., Brackett V.J., Veiga R.E., Nganga D., Minga A., Cros B., Butler C.F., Fenn M.A., Long C.S., Stowe L.L.* Aerosol-associated changes in tropical stratospheric ozone following the eruption of Mount Pinatubo // *J. Geophys. Res. D.* 1994. V. 99, N 4. P. 8197–8211.
6. *Rinsland C.P., Gunson M.R., Abrams M.C., Lowes L.L., Zander R., Mahieu E., Goldman A., Ko M.K.W., Rodriguez J.M., Sze N.D.* Heterogeneous conversion of N_2O_5 to HNO_3 in the post-Mount Pinatubo eruption stratosphere // *J. Geophys. Res. D.* 1994. V. 99, N 4. P. 8213–8219.
7. *Solomon S., Sanders R.W., Jakoubek R.O., Arpag K.H., Stephens S.L., Keys J.G., Garcia R.R.* Visible and near-ultraviolet spectroscopy at McMurdo Station, Antarctica. 10. Reductions of stratospheric NO_2 due to Pinatubo aerosols 1994 // *J. Geophys. Res. D.* 1994. V. 99, N 2. P. 3509–3516.
8. *Elokhov A.S., Gruzdev A.N.* Estimation of tropospheric and stratospheric NO_2 from spectrometric measurements of column NO_2 abundances // *Proc. SPIE.* 1995. V. 2506. P. 444–454.
9. *Di Sarra A., Cacciani M., Fiocco G., Fuà D., Jørgensen T.S., Knudsen B., Larsen N., Mikkelsen I.S.* Ozone and aerosol correlated observations at Thule, Greenland, in the period 1991–1994 // *J. Geophys. Res. D.* 1995. V. 100, N 12. P. 25965–25977.
10. *Ansmann A., Wagner F., Wandinger U., Mattis I., Gerdorf U., Dier H.-D., Reichardt I.* Pinatubo aerosol and stratospheric ozone reduction: Observations over Central Europe // *J. Geophys. Res. D.* 1996. V. 101, N 13. P. 18775–18785.
11. *Mickley L.J., Abbatt J.P.D., Frederik J.E., Russell J.M., III.* Response of summertime odd nitrogen and ozone at 17 mbar to Mount Pinatubo aerosol over the southern midlatitudes: Observations from the Halogen Occultation Experiment // *J. Geophys. Res. D.* 1997. V. 102, N 19. P. 23573–23582.
12. *Van Roozendaal M., De Mazière M., Hermans C., Simon P.C., Pommereau J.-P., Goutail F., Tie X.X., Brasseur G., Granier C.* Ground-based observations of stratospheric NO_2 at high and midlatitudes in Europe after the Mount Pinatubo eruption // *J. Geophys. Res. D.* 1997. V. 102, N 15. P. 19171–19176.
13. *Angell J.K.* Impact of El Chichon and Pinatubo on ozonesonde profiles in north extratropics // *Geophys. Res. Lett.* 1998. V. 25, N 24. P. 4485–4488.
14. *De Mazière M., Van Roozendaal M., Hermans C., Simon P.C., Demoulin P., Roland G., Zander R.* Quantitative evaluation of the post-Mount Pinatubo NO_2 reduction and recovery, based on 10 years of Fourier transform infrared and UV-visible spectroscopic measurements at Jungfraujoch // *J. Geophys. Res. D.* 1998. V. 103, N 9. P. 10849–10858.
15. *Liley J.B., Johnston P.V., McKenzie R.L., Thomas A.J., Boyd I.S.* Stratospheric NO_2 variations from a long time series at Lauder, New Zealand // *J. Geophys. Res. D.* 2000. V. 105, N 9. P. 11633–11640.
16. *Груздев А.Н.* Широтная зависимость вариаций стратосферного содержания NO_2 // *Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана.* 2008. Т. 44, № 3. С. 345–359.

17. *Gruzdev A.N.* Latitudinal structure of variations and trends in stratospheric NO₂ // *Int. J. Remote Sens.* 2009. V. 30, N 15–16. P. 4227–4246.
18. *Koike M., Jones N.B., Matthews W.A., Johnston P.V., McKenzie R.L., Kinnison D., Rodriguez J.* Impact of Pinatubo aerosols on the partitioning between NO₂ and HNO₃ // *Geophys. Res. Lett.* 1994. V. 21, N 7. P. 597–600.
19. *Tie X.X., Brasseur G.* The response of stratospheric ozone to volcanic eruptions: Sensitivity to atmospheric chlorine loading // *Geophys. Res. Lett.* 1995. V. 22, N 22. P. 3035–3038.
20. *Груздев А.Н.* Оценка влияния 11-летнего цикла солнечной активности на содержание озона в стратосфере // *Геомагнет. и аэроном.* 2014. Т. 54, № 4.
21. *Елохов А.С., Груздев А.Н.* Измерения общего содержания и вертикального распределения NO₂ на Звенигородской научной станции // *Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана.* 2000. Т. 36, № 6. С. 831–846.
22. *Gruzdev A.N., Elokhov A.S.* Variability of stratospheric and tropospheric nitrogen dioxide observed by visible spectrophotometer at Zvenigorod, Russia // *Int. J. Remote Sens.* 2011. V. 32, N 11. P. 3115–3127.
23. *Thomason L.W., Poole L.R., Deshler T.* A global climatology of stratospheric aerosol surface area density deduced from Stratospheric Aerosol and Gas Experiment II measurements: 1984–1994 // *J. Geophys. Res. D.* 1997. V. 102, N 7. P. 8967–8976.
24. *Bauman J.J., Russell P.B., Geller M.A., Hamill P.* A stratospheric aerosol climatology from SAGE II and CLAES measurements: 2. Results and comparison, 1984–1999 // *J. Geophys. Res. D.* 2003. V. 108, N 13. 4383. DOI: 10.1029/2002JD002993.
25. *Aquila V., Oman D., Stolarski R., Douglass A.R., Newman P.A.* The response of ozone and nitrogen dioxide to the eruption of Mt. Pinatubo at southern and northern midlatitudes // *J. Atmos. Sci.* 2013. V. 70, N 3. P. 894–900.
26. *Randel W.J., Wu F., Russell J.M. III, Waters J.W., Froidevaux L.* Ozone and temperature changes in the stratosphere following the eruption of Mount Pinatubo // *J. Geophys. Res. D.* 1995. V. 100, N 8. P. 16753–16764.
27. *Poberaj C.S., Staehelin J., Brunner D.* Missing stratospheric ozone decrease at southern hemisphere // *J. Atmos. Sci.* 2011. V. 68, N 9. P. 1922–1945.
28. *Beig G., Saraf N., Peshin S.K.* Evidence of the Pinatubo volcanic eruption on the distribution of ozone over the tropical Indian region // *J. Geophys. Res. D.* 2002. V. 107, N 23. 4674. DOI: 10.1029/2002JD002337.

A.N. Gruzdev. Estimation of the Pinatubo volcano eruption effect on stratospheric O₃ and NO₂, taking into account variations of solar activity.

Effects of the Pinatubo volcano eruption and variations of solar activity on stratospheric O₃ and NO₂ are estimated, using data of satellite measurements of ozone concentration by SBUV/SBUV-2 instruments and results of ground-based measurements of the column NO₂ content in the NDACC. The NO₂ decrease related to the Pinatubo eruption is within 19–23% at different stations, the NO₂ decrease in the Southern hemisphere (SH) is on the whole something larger than in the Northern hemisphere (NH). The decrease in O₃ concentration in the NH extratropical lower stratosphere (~ 10%) is, on the contrary, much larger than in the SH. Maximal decrease in ozone concentration is noted in the neighbourhood of 10 hPa level (32 km) at 10–15°S. The effect of the 11-year solar cycle in stratospheric ozone is approximately symmetrical about the equator. Altitude maxima of the O₃ response to the solar cycle are noted at altitudes of 50–55, 35–40, and below 25 km. The changes in O₃ concentration in these layers are usually within several percents. Essential interhemispheric difference is noted in the NO₂ response to the 11-year solar cycle. The NO₂ content at most of SH stations is usually lower during the phase of maximum than during the phase of minimum of solar activity. The NO₂ content at the low- and mid-latitude stations of the NH is often larger during a solar activity maximum compared to that during its minimum. NO₂ changes related to the solar cycle are usually within 5%.