

Вулканогенные возмущения стратосферы – главный регулятор долговременного поведения озоносферы в период с 1979 по 2008 г.

В.В. Зуев, Н.Е. Зуева*

*Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН
634021, г. Томск, пр-т Академический, 10/3*

Поступила в редакцию 11.10.2010 г.

Дан анализ вулканогенных возмущений стратосферы в период с 1979 по 2008 г. и их влияния на долговременные изменения озоносферы. Показано, что главным регулятором поведения озоносферы в этот период являлось вулканогенное аэрозольное возмущение стратосферы.

Ключевые слова: вулканогенные возмущения стратосферы, активность, индекс вулканического взрыва, циркуляция, ядра конденсации, полярные стратосферные облака, озоносфера; volcanoes, activity, volcanic explosive index, circulation, condensation nuclei, polar stratospheric clouds, ozonosphere.

Введение

Значительную роль в разрушении стратосферного озона играют возмущения стратосферы аэрозолем вулканогенного происхождения после инжекции в нее продуктов вулканических извержений. При таких извержениях в стратосферу выбрасывается большое количество пепла и сернистых газов, прежде всего диоксида серы SO_2 . Тяжелые частицы пепла в течение нескольких месяцев выпадают на поверхность Земли. Но в стратосфере на высотах в области максимума озонового слоя из диоксида серы образуется серная кислота, которая, обводняясь, превращается в долгоживущий сернокислотный аэрозоль. На поверхностях вулканогенного аэрозоля стратосферный озон разрушается в гетерогенных реакциях. При этом наиболее интенсивно реакции протекают на поверхностях мелкодисперсного («молодого») аэрозоля. Кроме того, при стратосферных температурах ниже 195 К вулканогенный аэрозоль играет роль ядер конденсации для образования полярных стратосферных облаков (ПСО), играющих основную роль в формировании озоновых дыр [1].

Наиболее сильное влияние на озоносферу оказывают извержения вулканов тропического пояса широт. В результате таких извержений происходит глобальное возмущение озоносферы. Образовавшийся в стратосфере сернокислотный аэрозоль разносится зональными ветрами по тропическому поясу и постепенно стягивается меридиональной циркуляцией в полярные зоны, окутывая аэрозольной пеленой всю планету.

Период рутинного глобального мониторинга общего содержания озона (СОС), в основном отражающего поведение стратосферного озона, начался с 1979 г. при использовании космической аппаратуры TOMS. Немногим ранее стали проводиться инструментально выверенные наблюдения за стратосферными выбросами вулканических извержений. Это позволяет провести анализ вулканогенных возмущений озоносферы за период последних тридцати лет.

Вулканогенные возмущения стратосферы за период с 1979 по 2008 г.

Вулканическая активность Земли характеризуется широчайшим диапазоном энергий извержений и объемов вулканических выбросов. В вулканологии принято ранжировать извержения с помощью индекса вулканического взрыва (VEI) от 0 до 8 по объему выброса, который возрастает на порядок с ростом VEI от 10^{-5} до 10^3 км³. В стратосферу, пробив тропопаузу, могут попасть продукты извержений в основном вулканианского и плинианского типов с $\text{VEI} \geq 3$.

Максимальная высота тропопаузы около 15 км расположена в тропиках. Поэтому вулканические выбросы в тропическом поясе, достигающие стратосферных высот, относятся в основном к извержениям плинианского типа с $\text{VEI} \geq 4$. В субарктических широтах высота тропопаузы примерно в 1,5 раза ниже, чем в тропиках, поэтому аэрозольные возмущения стратосферы могут быть вызваны вулканическими извержениями с $\text{VEI} \sim 3\div 4$, относящимися к вулканианскому типу. Такие извержения

* Владимир Владимирович Зуев (vvzuev@imces.ru);
Нина Евгеньевна Зуева.

в Северном полушарии эпизодически наблюдаются у вулканов Японии, Исландии, Камчатки, Курильской гряды, Аляски и Алеутских островов. Стратосферные выбросы этих вулканов довольно быстро стягиваются меридиональной циркуляцией в полярную область широт, поэтому их влияние на глобальную озоносферу проявляется в меньшей степени, чем влияние извержений тропических вулканов.

Все вулканические извержения за период с 1979 по 2008 г., продукты которых зарегистрированы в стратосфере, представлены в таблице.

Жирным шрифтом выделены извержения тропических вулканов. Курсивом отмечены извержения вулканов внетропической части Южного полушария. Видно, что основное количество вулкано-генных возмущений стратосферы приходится на первый 15-летний период. Причем в этот период произошло 13 возмущений в тропическом поясе против 3 в следующий 15-летний период. Такая вулканическая активность с 1979 по 1994 г. привела в этот период к непрерывному загрязнению глобальной стратосферы вулкано-генным аэрозолем.

Значительное понижение активности взрывного вулканизма во второй 15-летний период с 1995 по 2008 г. привело к уменьшению аэрозольного содержания в стратосфере до фонового уровня к 1998 г.

Вулкано-генная депрессия стратосферного озона в Северном полушарии

Многолетние наблюдения за поведением аэрозоля и озона в стратосфере, проводимые с 1986 г. на Сибирской лидарной станции в Томске (56,3° с.ш.; 85,5° в.д.), показали, что вулкано-генные аэрозольные возмущения стратосферы играют значительную роль в разрушении озонового слоя в течение 2–3 лет после извержения вулканов особенно тропического пояса [1]. На рис. 1 показано поведение интегрального коэффициента обратного аэрозольного рассеяния стратосферы V^a в диапазоне высот 13–30 км по данным лидарных измерений на длине волны 532 нм и ОСО над Томском.

Список вулканических извержений, продукты которых зарегистрированы в стратосфере за период с 1979 по 2008 г. (по данным сайта [2])

Период	№	Год (месяц) извержения	Вулкан	Местность	Координаты	VEI	Высота выброса, км
I 15-летний период	1	1979 (04)	Суфриер	Вест-Индия	13,33° с.ш./61,18° з.д.	3	18
	2	1980 (05)	Сент-Хеленс	США	46,20° с.ш./122,18° з.д.	5	23
	3	1980 (08)	Гекла	Исландия	63,98° с.ш./19,70° з.д.	3	15
	4	1981 (04)	Алаид	Курильские о-ва	50,86° с.ш./155,55° в.д.	4	15
	5	1981 (05)	Паган	Марианские о-ва	18,13° с.ш./145,80° в.д.	4	20
	6	1982 (03)	Эль-Чичон	Мексика	17,36° с.ш./93,23° з.д.	5	30
	7	1982 (04)	Эль-Чичон	Мексика	17,36° с.ш./93,23° з.д.	4+	24
	8	1982 (05)	Галунггунг	Индонезия	7,25° ю.ш./108,05° в.д.	4	16
	9	1983 (07)	Коло	Индонезия	0,17° ю.ш./121,61° в.д.	4	16
	10	1985 (10)	Руиз	Колумбия	4,9° с.ш./75,32° з.д.	3	17
	11	1986 (03)	Августин	Аляска	59,363° с.ш./153,43° з.д.	4	21
	12	1986 (09)	Ласкар	Северное Чили	23,37° ю.ш./67,73° з.д.	3	16
	13	1987 (02)	Ключевская Сопка	Камчатка	56,06° с.ш./160,64° в.д.	4	14
	14	1988 (08)	Банда-Апи	Индонезия	4,52° ю.ш./129,87° в.д.	3	17
	15	1990 (02)	Келут	Индонезия	7,93° ю.ш./112,31° в.д.	4	20
	16	1991 (06)	Пинатубо	Филиппины	15,13° с.ш./120,35° в.д.	6	40
	17	<i>1991 (08)</i>	<i>Серро-Хадсон</i>	<i>Южное Чили</i>	<i>45,9° ю.ш./72,97° з.д.</i>	<i>5+</i>	<i>18</i>
	18	1992 (06)	Спурр	Аляска	61,30° с.ш./152,25° з.д.	4	18
	19	1993 (04)	Ласкар	Северное Чили	23,37° ю.ш./67,73° з.д.	4	25
	20	1993 (10)	Безымянная Сопка	Камчатка	55,98° с.ш./160,59° в.д.	3	15
	21	1994 (09)	Рабаул	Папуа–Новая Гвинея	4,27° ю.ш./152,20° в.д.	4	18
II 15-летний период	22	1999 (04)	Шишалдина	Алеутские о-ва	54,76° с.ш./163,97° з.д.	3	14
	23	2000 (02)	Гекла	Исландия	63,98° с.ш./19,70° з.д.	3	15
	24	2002 (11)	Ревентадор	Эквадор	0,08° ю.ш./77,67° з.д.	4	20
	25	2004 (11)	Гримсвётн	Исландия	64,42° с.ш./17,33° з.д.	3	14
	26	2005 (01)	Манам	Папуа–Новая Гвинея	4,08° ю.ш./145,04° в.д.	4	20
	27	2006 (10)	Рабаул	Папуа–Новая Гвинея	4,27° ю.ш./152,20° в.д.	4	18
	28	<i>2008 (05)</i>	<i>Чайтен</i>	<i>Южное Чили</i>	<i>42,83° ю.ш./72,65° з.д.</i>	<i>4</i>	<i>30</i>
	29	2008 (07)	Окмок	Алеутские о-ва	53,43° с.ш./168,13° з.д.	4	15
	30	2008 (08)	Касаточи	Алеутские о-ва	52,18° с.ш./175,51° з.д.	4	14

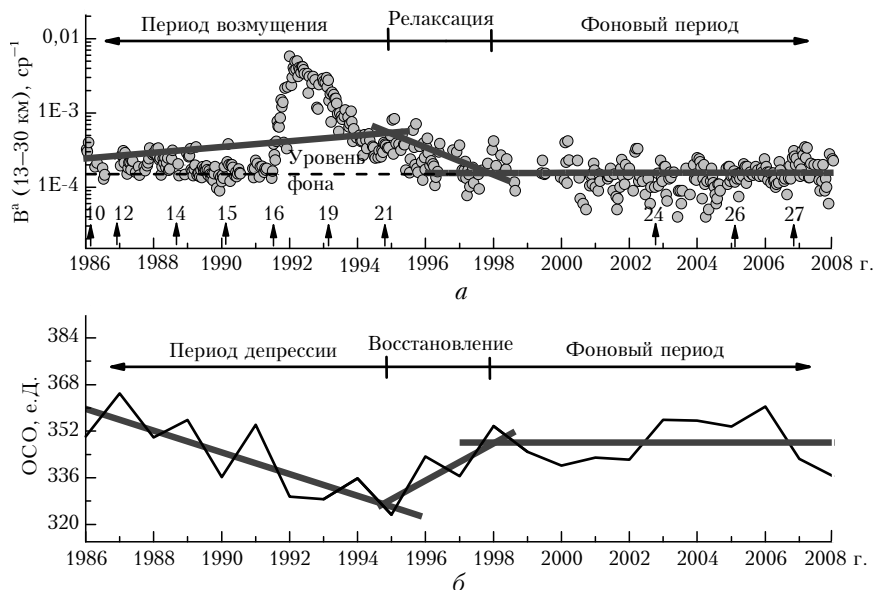


Рис. 1. Временные ходы интегрального коэффициента обратного аэрозольного рассеяния в диапазоне высот 13–30 км на длине волны 532 нм (а) и ОСО (б) над Томском. Стрелками указаны годы извержений тропических вулканов по номерам согласно списку из таблицы

Видно, что в период вулканогенного аэрозольного возмущения стратосферы поведение ОСО характеризовалось отрицательным трендом. В период релаксации аэрозольного возмущения с 1995 по 1998 г. произошло быстрое восстановление ОСО. В период фоновое аэрозольного состояния с 1998 по 2008 г. практически с нулевым трендом долговременные изменения ОСО также характеризуются нулевым трендом.

Наиболее чувствительной областью озоносферы Северного полушария к аэрозольным возмущениям является пояс субарктических широт. В отличие от умеренных широт Северного полушария на озоносферу в субполярных и полярных областях значительно усиливается влияние извержений вулканов северного пояса широт. На рис. 2 тонкой линией изображен временной ряд среднегодовых

значений ОСО с 1979 по 2008 г., усредненных для пояса широт 55–65° с.ш.

Ряд построен на основе мультисенсорного реанализа спутниковых данных аппаратуры TOMS, SCIAMACHY и GOME по проекту «TEMIS» [3–5], представленных на сайте [6]. Поскольку продолжительность вулканогенных возмущений озоносферы в полярных и субполярных широтах обычно превышает 2–3 года, ряд ОСО можно загладить FFT-фильтром по трем точкам. Результат сглаживания представлен на рис. 2 жирной линией. Вертикальными столбиками на рис. 2 представлена хронология вулканических взрывов тропического пояса широт и Северного полушария, отмеченных цифрами согласно списку из таблицы.

На рис. 2 видно, что с 1979 по 1995 г. в период аномально частых вулканогенных возмущений

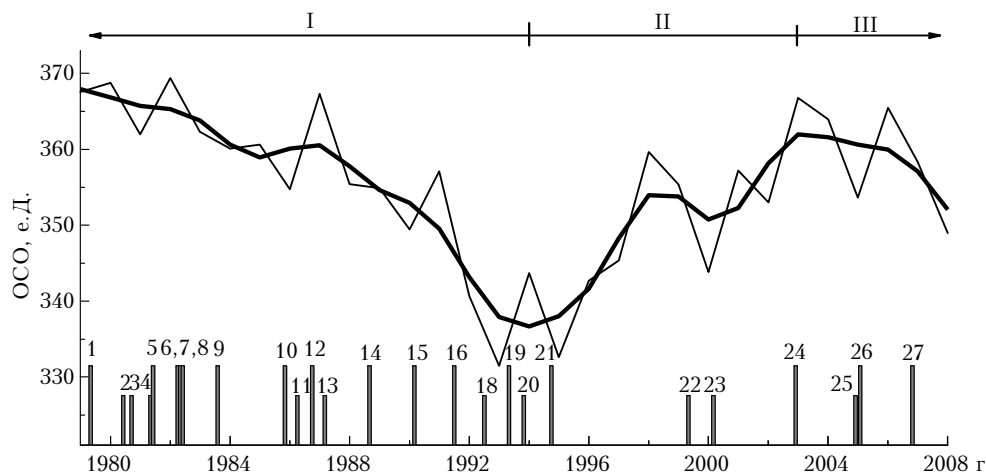


Рис. 2. Временной ход ОСО по данным космического мониторинга в субарктическом поясе широт (тонкая линия), результат сглаживания (жирная линия), хронология вулканических взрывов (вертикальные столбики) согласно списку из таблицы. Римскими цифрами I, II и III отмечены периоды соответственно аномально повышенной, пониженной и среднеповышенной вулканической активности

озоносферы (I период) долговременное изменение ОСО имеет отрицательную тенденцию. С 1995 по 2008 г. изменения ОСО в целом характеризуются положительным трендом. До 2004 г. быстрое восстановление озоносферы происходило на фоне редких и незначительных вулканических взрывов (II период), в дальнейшем их усиление (III период) вновь проявилось в систематическом снижении ОСО.

Вулканогенный аэрозоль и озоновая дыра над Антарктидой

Активность вулканических извержений имеет прямое отношение и к существованию антарктической озоновой дыры (ОД). Вулканогенный аэрозоль играет роль ядер конденсации при формировании частиц ПСО в условиях аномально низких температур (ниже 195 К), которые реализуются в стратосфере над Антарктидой в зимне-весенний период благодаря изоляции стратосферных воздушных масс внутри циркумполярного вихря. На твердой поверхности частиц ПСО, содержащих замерзший хлористый водород HCl, в результате гетерогенных реакций происходит высвобождение молекул хлора из инертных молекул-резервуаров хлористого нитрозила ClONO₂ в газовой фазе с одновременным захватом в твердой фазе диоксида азота (денитрификация) в виде замерзшей азотной кислоты. С завершением полярной ночи в весенний период под действием света молекулы хлора распадаются на атомы. Появление свободного хлора катализирует реакции распада озона в хлорном цикле, а денитрификация уменьшает вероятность блокирования этого цикла путем перевода активного соединения окиси хлора в инертное соединение хлористого нитрозила. В результате в границах полей ПСО в весенний период формируется озоновая дыра, которая исчезает к концу весеннего периода при испарении частиц ПСО с повышением стратосферных температур.

Таким образом, для формирования озоновой дыры необходимо сочетание нескольких условий: аномальное переохлаждение стратосферного воздуха, наличие в стратосфере кислотных аэрозолей как ядер конденсации и молекул-резервуаров ClONO₂ и HCl. Если стратосферные температуры превышают 195 К, то частицы ПСО либо не образуются, либо (если они уже сформировались ранее) испаряются. При отсутствии ПСО стратосферный озон не разрушается. Стратосферные температуры над антарктической станцией Халли в октябре 1986, 1988 и 2002 гг. оказались в основном выше 195 К, что и определило незначительные потери ОСО по сравнению с другими годами (рис. 3).

Аналогичная ситуация почти всегда реализуется в арктической стратосфере, где аномально низкие температуры, а следовательно, и озоновые дыры наблюдаются редко и крайне непродолжительное время, хотя хлорных соединений регистрируется не меньше, чем над Антарктидой.

Наличие ядер конденсации тесно связано с вулканогенными возмущениями стратосферы. Аэрозольные возмущения антарктической стратосферы, произошедшие после череды вулканических извержений в начале 80-х гг. в тропическом поясе, привели к усилению в этот период разрушения стратосферного озона вплоть до устойчивого достижения, зарегистрированного, в частности, в октябре 1984 г. на станции Халли [8]. Наиболее сильное аэрозольное возмущение антарктической стратосферы, определившее долговременную весеннюю депрессию стратосферного озона над Антарктидой, возникло после двух мощнейших извержений вулканов, произошедших в течение 1991 г.: Пинатубо на Филиппинах в июне и Серро-Хадсон в Чили в августе. Кроме того, в апреле 1993 г. произошло крупное извержение еще одного чилийского вулкана Ласкар. В результате весной 1993 г. практически на всех антарктических станциях наблюдались максимально глубокие и продолжительные озоновые дыры.

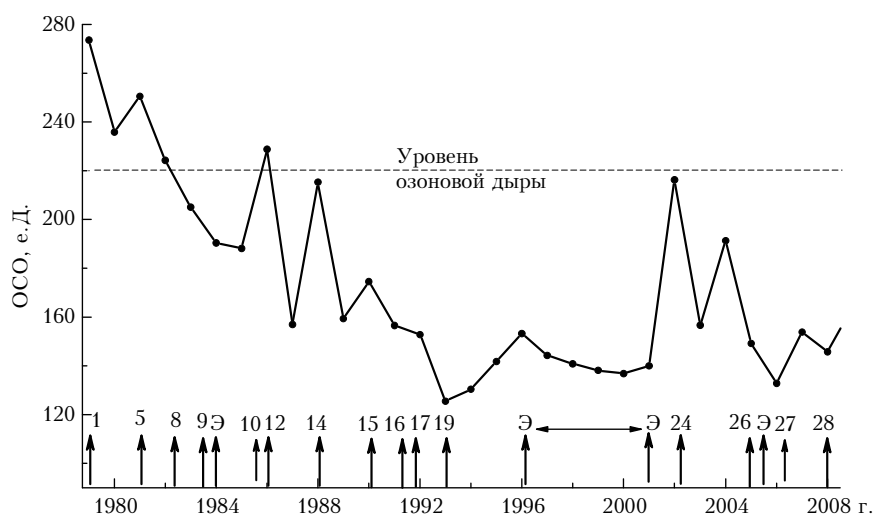


Рис. 3. Поведение ОСО в октябре над антарктической станцией Халли по данным сайта [7]. Стрелками указаны годы извержений вулканов по номерам согласно списку из таблицы; Э – проявление повышенной активности Эребуса

Другим поставщиком вулканогенного серно-кислотного аэрозоля в антарктическую стратосферу является постоянно действующий влк. Эребус (высота 3794 м), активность которого возобновилась в 1972 г. и продолжается по настоящее время. Извержения Эребуса относятся к стромболианскому типу, характеризующемуся относительно невысоким, от сотен метров до 1,5–2 км, выбросом продуктов извержения, преимущественно вулканических бомб. Однако по описанию известного вулканолога Г. Тазиева [9], исследовавшего Эребус в 1974 г., в момент его извержения вверх под большим давлением вырываются газовые струи с начальной скоростью более 700 км/ч. При таких скоростях газовые выбросы, состоящие в основном из диоксида серы и хлористого водорода, быстро достигают высоты зимней тропопаузы, опускающейся ниже 6 км, и проникают в стратосферу. Из диоксида серы формируется сернокислотный аэрозоль, выступающий ядрами конденсации частиц ПСО. Хлористый водород, замерзая в частицах ПСО, обеспечивает эффективность описанных выше гетерогенных реакций на их поверхностях.

Значительное повышение активности Эребуса наблюдалось с 1995 по 2007 г. Частые сильные извержения вулкана во второй половине 90-х гг. препятствовали росту весенних значений ОСО, наметившемуся после минимума 1993 г. (см. рис. 3). Самые мощные серии извержений наблюдались в 2000 и 2006 гг. Именно в эти годы были зарегистрированы самые большие размеры озоновой дыры за весь период наблюдений, достигшие почти 30 млн км² (рис. 4).



Рис. 4. Временной ход максимальных значений площади озоновой дыры, регистрируемых над Антарктидой со спутников каждый год (тонкая линия) по данным сайта [10], и параболический тренд (жирная линия)

Достижению максимальных размеров ОД в 2000 г. способствовали также аэрозольные ядра конденсации из ионных кластеров, возникших в антарктической стратосфере после мощнейшей вспышки на Солнце, произошедшей как раз в период зимне-весеннего формирования ПСО. Ионные кластеры обладают активированной (заряженной) по-

верхностью, что дополнительно усиливало процессы разрушения озона.

Возросшая активность влк. Эребус после 1995 г. способствует формированию ПСО и, следовательно, препятствует динамике уменьшения ОД, наметившегося после 2000 г. (см. поведение параболического тренда на рис. 4).

Заключение

Как правило, сильные вулканические извержения, особенно плинианского типа, происходят не чаще, чем один раз в несколько десятков и даже сотню лет. Но за период с 1979 по 1994 г. только в тропическом поясе произошло 10 таких извержений (в среднем каждые 1,5 года). Столь высокая вулканическая активность привела к необычайно длительному периоду непрерывного загрязнения глобальной стратосферы вулканогенным аэрозолем, в течение которого спад среднегодовых значений ОСО происходил со скоростью примерно 2,5% за 10 лет. Когда же к концу 90-х гг. стратосфера очистилась от вулканогенного аэрозоля, содержание стратосферного озона быстро возросло. Из совокупности всех факторов, влияющих на озоносферу в этот период, столь динамичное изменение характерно только для аэрозольного наполнения стратосферы. Это означает, что главным регулятором поведения озоносферы в последние десятилетия являлись вулканогенные аэрозольные возмущения стратосферы.

Работа выполнена в рамках проекта СО РАН VII.63.3.1. при частичной финансовой поддержке по гранту РФФИ № 08-05-00558-а.

1. Зуев В.В. Лидарный контроль стратосферы. Новосибирск: Наука, 2004. 307 с.
2. URL: <http://www.volcano.si.edu>
3. Eskes H.J., van der A. R.J., Brinksma E.J., Veefkind J.P., de Haan J.F., Valks P.J.M. Retrieval and validation of ozone columns derived from measurements of SCIAMACHY // *Envisat, Atmos. Chem. Phys. Discuss.* 2005. V. 5, N 5. P. 4429–4475.
4. Valks P.J.M., de Haan J.F., Veefkind J.P., van Oss R.F., Balis D.S. TOGOMI: An improved total ozone retrieval algorithm for GOME // *XX Quadrennial Ozone Symposium, 1/6/2004-8/6/2004, C.S. Zerefos (Ed.). Athens, University of Athens, 2004. P. 129–130.*
5. Veefkind J.P., de Haan J.F., Brinksma E.J., Kroon M., Levelt P.F. Total Ozone from the Ozone Monitoring Instrument (OMI) Using the DOAS technique // *IEEE Trans. Geo. Remote Sens.* 2006. V. 44, N 5. P. 1239–1244, doi:10.1109/TGRS.2006.871204.
6. URL: <http://www.temis.nl>
7. URL: <ftp://jwocky.gsfc.nasa.gov>
8. Farman J.C., Gardiner B.G., Shanklin J.D. Large losses of ozone in Antarctica reveal seasonal ClO_x/NO_x interaction // *Nature.* 1985. V. 315, N 6016. P. 207–210.
9. Тазиев Г. На вулканах. / Перевод с фр. М.: Мир, 1987. 181 с.
10. URL: <http://www.theozonhole.com>

V.V. Zuev, N.E. Zueva. **Volcanogenic disturbances of the stratosphere as the principle regulator of the long-term behavior of the ozonosphere from 1979 to 2008.**

The article gives the analysis of volcanogenic disturbances of the stratosphere since 1979 till 2008 and their impact on the long-term changes of the ozonosphere. It is shown that volcanogenic aerosol disturbance of the stratosphere was the principle regulator of the behavior of the ozonosphere during this period.