

И. Галиндо, К.Я. Кондратьев, Г. Зентено

АЭРОЗОЛЬНАЯ ОПТИЧЕСКАЯ ТОЛЩИНА АТМОСФЕРЫ ПОСЛЕ ИЗВЕРЖЕНИЯ ВУЛКАНА ЭЛЬ-ЧИЧОН ПО ДАННЫМ НАБЛЮДЕНИЙ В МЕХИКО И ВАНКУВЕРЕ

По данным наблюдений прямой солнечной радиации в условиях загрязненной атмосферы г. Мехико определен рост аэрозольной оптической толщины (АОТ), связанный с наличием в атмосфере эруптивного аэрозоля и больших частиц вулканического пепла, которые возникли после извержения вулкана Эль-Чичон (Мексика: 17,5°с.ш., 93,3°з.д.) в период с 28 марта до 4 апреля 1982 г. Сравнение этих результатов с данными наблюдений в Ванкувере (Канада) обнаружило, что в обоих рассматриваемых пунктах первоначальный эпизод увеличения АОТ имел место в период апреля – июля 1982 г. В г. Мехико рост АОТ был более значительным. Значения АОТ уменьшились до обычного фонового уровня лишь к февралю 1993 г. Вторичные максимумы АОТ в Мехико зарегистрированы в апреле – июле 1983 г., а в Ванкувере наблюдался вторичный максимум в период с октября 1982 г. по сентябрь 1983 г. Полученные результаты указывают на то, что первоначальный рост АОТ в апреле – июле 1983 г. в Мехико и Ванкувере был обусловлен главным образом короткоживущими частицами вулканического пепла, находящимися вблизи подстилающей поверхности, тогда как последующий максимум связан с образованием стратосферного вулканического аэрозоля.

1. Введение

Существенным фактором природных и антропогенных изменений глобального климата является атмосферный аэрозоль, что связано с его влиянием на перенос как коротковолновой, так и длинноволновой радиации и, соответственно, на радиационный баланс подстилающей поверхности, атмосферы и системы «подстилающая поверхность – атмосфера», а следовательно, и на климат [1–10]. Важная роль принадлежит в этой связи сульфатному аэрозолю. В тропосфере это главным образом сульфатный аэрозоль, являющийся продуктом газофазных реакций преобразования промышленных выбросов сернистого газа, а в стратосфере – эруптивный аэрозоль, возникающий (также в ходе газофазных реакций) после взрывных вулканических извержений.

Полученные Лангнером и Родэ [11] приближенные оценки вклада различных источников сульфатных соединений в Северном полушарии привели к следующим значениям (в гигатонах серы в год): 64 (промышленность); 6,9 (Мировой океан); 5,8 (вулканы). Соотношение этих цифр свидетельствует о том, что распознавание «вулканического» сигнала в изменениях климата является сложной задачей. Из числа параметров, определяющих свойства аэрозоля (размер, форма, микроструктура, счетная концентрация, комплексный показатель преломления частиц и др.), с точки зрения воздействий на климат первостепенное значение имеет аэрозольная оптическая толщина (АОТ) атмосферы (следует, однако, подчеркнуть, что ставшее весьма популярным при оценках влияния тропосферного аэрозоля на климат далекое от реальности предположение о чисто рассеивающем аэрозоле побуждает напомнить актуальность учета комплексности показателя преломления частиц аэрозоля и, в связи с этим, – поглощения радиации аэрозолем [1, 4]). Именно поэтому главной целью настоящей статьи является обсуждение результатов наблюдений прямой солнечной радиации (ПСР) в Мехико и Ванкувере в 1982–1983 гг. для определения изменений АОТ, обусловленных извержениями вулкана Эль-Чичон (17,5°с.ш.; 93,3°з.д.).

2. Извержения вулкана Эль-Чичон

Первое из серии последовательных извержений вулкана Эль-Чичон, находящегося в штате Чиapas (юго-запад Мексики), произошло 28 марта 1982 г. В период с конца марта по начало апреля 1982 г. возникло три крупных извержения этого вулкана, расположенного вблизи

восточной оконечности мексиканского неовулканического пояса (на современной вулканической дуге Чиapas). В течение нескольких веков Эль-Чичон характеризовался наличием лишь сольфатарной активности. Поскольку регион Чиapas расположен на стыке Американской, Кокос и Карибской тектонических плит, предполагалось, что вулканическая активность должна быть обусловлена здесь главным образом непрерывным опусканием плиты Кокос под юго-восточную часть Мексики.

После извержения вулкана Эль-Чичон удалось получить больше информации о влиянии вулканических извержений на климат, чем за все предыдущее время, поскольку никогда в прошлом не удавалось осуществить такой обширный комплекс наблюдений [9]. Так, например, впервые оказалось возможным осуществить мониторинг динамики глобальных полей концентрации таких малых газовых компонентов (МГК), как HCl и OH и обнаружить рост их концентрации после извержения. Последнее обусловило, по-видимому, уменьшение концентрации таких МГК, как O₃, NO и NO₂. Распространение выбросов сернистого газа во время извержения впервые удалось проследить по данным спутниковых наблюдений, а комплексные данные дистанционного зондирования и прямых измерений позволили детально проанализировать совокупность процессов газозофазных реакций трансформации SO₂ в капле серной кислоты.

Анализ результатов наблюдений позволяет считать, что необычный масштаб эруптивного аэрозольного облака определяется влиянием по крайней мере трех факторов: 1) большим содержанием серы в продуктах извержения; 2) шириной вулкана, 3) временем года, когда произошло это извержение, которое можно отнести к умеренно мощным. После завершающего извержения 4 апреля его газообразные продукты достигли высот более 25 км, а суммарное количество выбросов сернистого газа, по-видимому, превосходило наблюдавшееся когда-либо ранее за последние 100 лет [9]. По данным спутникового спектрометра TOMS, оно достигало 3,3 Мт.

Первоначальным продуктом первого извержения были частицы тефры, обогащенные кристаллическими компонентами и сопровождавшиеся выбросами больших количеств щелочных соединений кремния (по сравнению с пирокластическим веществом после второго и третьего извержений). Первоначальная тефра состояла главным образом из ювенильных веществ и литоидных фракций. Первые извержения характеризовались выбросами больших количеств пепла, умеренных количеств пемзы и малых количеств литоидных фрагментов. В период продолжавшейся до 2 апреля первой фазы извержения было выброшено большое количество светло-серого пепла, покрывшего обширные площади к северо-востоку от вулкана. Толщина слоя пепла достигала 0,5 м на расстоянии 15 км от вулкана и уменьшалась до 0,2 м на расстоянии 75 км. На территории г. Вилья-Эрмоса (штат Табаско) толщина слоя пепла составляла около 0,1 м.

Вторую фазу составили два мощных извержения (3 апреля в 19 ч 33 мин и 4 апреля в 05 ч 36 мин по местному времени), сопровождавшиеся выбросами серо-коричневого пепла с большой долей тефры, которая распространялась главным образом к востоку от вулкана. Скорость оседания пепла поблизости от Теапа 4 апреля достигла 0,33 г/(м²·с), что привело к погружению этой местности в почти полную темноту при видимости меньше 5 м. К 12 ч 30 мин скорость оседания пепла уменьшилась до 0,05 г/(м²·с). В эти дни вдоль склонов вулкана Эль-Чичон низвергались пирокластические потоки, состоящие из горячего пепла и крупных блоков пемзы. Толщина слоя тефры, измеренная 5 апреля поблизости от Паленку (города, расположенного в 125 км к востоку от вулкана), превышала 0,4 м.

Химический анализ 30 образцов тефры, собранных в различных точках в период с 3 по 7 апреля, дал следующие результаты:

1) в период с 28 марта по 2 апреля происходили выбросы светло-коричневого вещества с большим содержанием кремния, которое позднее (3–4 апреля) покрывалось тефрой с высоким содержанием литических компонентов;

2) обнаружена тефра с большой долей окислов железа, магния и кальция.

Как отметили Матсон и Робок [12], стратосферное эруптивное облако, образовавшееся после извержения Эль-Чичона, было наиболее мощным по сравнению с наблюдавшимися в течение предыдущего столетия. Формирование этого облака вызвало локальный спад приземной температуры воздуха, достигавший 5°C и более, причем ожидалось дальнейшее усиление похолодания примерно на 0,5°C в 1984–1985 гг.

Получение уникальных комплексных данных наземных, аэростатных, самолетных и спутниковых наблюдений после извержения вулкана Эль-Чичон сделало возможной верификацию моделей газозофазной трансформации эруптивного сернистого газа в стратосферный

сернокислотный аэрозоль, а также результатов моделирования переноса, гравитационного оседания и воздействия вулканического аэрозоля на радиационный режим и климат.

Эруптивное облако, образовавшееся после извержения, совершило первый полный оборот вокруг Земли за 21 сутки при средней скорости переноса, равной 22 м/с [12]. По данным лидарного зондирования на Гавайских островах, над которыми наиболее мощная по толщине часть облака прошла 9 апреля, относительный (по сравнению с рэлеевским) коэффициент обратного рассеяния превосходил 200, чего никогда не наблюдалось ранее, причем максимально интенсивное обратное рассеяние наблюдалось на высоте 26 км [13]. Вертикальная структура эруптивного облака характеризовалась слоистостью. Через два месяца после извержения установилось относительно однородное глобальное распределение вулканического аэрозоля на высоте 20 км, где наблюдалась его минимальная концентрация. Анализ данных одновременных наблюдений АОТ в таких удаленных пунктах, как Мехико и Ванкувер, позволил проанализировать эволюцию вулканического аэрозоля.

3. Определение аэрозольной оптической толщины

Значения АОТ, характеризующие обусловленное аэрозолем ослабление прямой солнечной радиации всей толщей атмосферы, рассчитаны по формуле [14–16]:

$$\tau_a = 1/\{m' \ln[I/(T_0 T_r - a_w) I_0]\}, \quad (1)$$

где τ_a – АОТ; m' – воздушная масса, рассчитанная с учетом поправки на наблюдаемое атмосферное давление; I – прямая солнечная радиация, мДж/(м²·ч); $T_0(T_r)$ – пропускание с учетом поглощения озоном (рэлеевского рассеяния); a_w – обусловленное водяным паром относительное поглощение; I_0 – внеатмосферная солнечная радиация.

Атмосферная масса вычислена по формуле Кастена [17]:

$$m = 1/[\cos\theta + 0,15(93,885 - \theta)^{-1,253}], \quad (2)$$

где θ – зенитный угол Солнца, град. Значение

$$m' = mp/101,3, \quad (3)$$

где p – атмосферное давление, кПа. Согласно [18] обусловленное озоном пропускание определяется формулой

$$T_0 = 1,0 - a_{vis} - a_{uv}, \quad (4)$$

$$a_{vis} = 0,002118x/(1,0 + 0,0042x + 0,00000323x^2), \quad (5)$$

$$a_{uv} = 0,1082x/(1,0 + 13,86x)^{0,805} + 0,00658x/[1,0 + (10,36x)^3]. \quad (6)$$

Общее содержание озона в вертикальном столбе атмосферы принято равным 3,5 «мм» [19]. Поэтому

$$x = 3,5 m'. \quad (7)$$

Согласно [18] относительное поглощение водяным паром

$$a_w = 2,9w'/[(1,0 + 141,5w')^{0,635} + 5,925w'], \quad (8)$$

где

$$w' = mw(p/1013,25)^{0,75}. \quad (9)$$

В соответствии с [20] толщина слоя осажденной воды

$$w = 0,1 \exp(2,2572 + 0,05454 T_d), \quad (10)$$

где T_d – температура точки росы, определяемая эмпирическим соотношением [21]

$$T_d = 1,0/[T - \lg(RH - 2,0)/2352,6], \quad (11)$$

где T – температура воздуха; RH – относительная влажность, %.

Поскольку наблюдаемые в течение года вариации атмосферного давления малы, можно использовать следующие приближенные соотношения:

$$a_{vis} = 0,0020279x + 0,00023211, \quad (12)$$

$$a_{uv} = 0,00070438x + 0,0141164. \quad (13)$$

Для величины осажденной воды можно использовать соотношение [22]

$$w = 0,493RH/[T_d \exp(26,23 - 5416/T_d)]. \quad (14)$$

Наконец, для пропускания, обусловленного рэлеевским рассеянием, имеем [14]

$$T_r = 0,98552 - 0,10345m' + 0,0173m'^2 + 0,00198m'^3 + 0,00011m'^4 - 0,000002m'^5. \quad (15)$$

Что касается функциональной зависимости, то $\tau_a = \tau_a(I, m, p, T_d)$. Оценки показали, что по сравнению с методикой [16] погрешности вычислений не превышают 0,74%.

4. Данные наблюдений

Ежечасные значения прямой солнечной радиации получены по данным наблюдений с 10 до 14 ч при помощи актиометра Линке–Фойснера на актиометрической обсерватории Национального университета в Мехико, где подобные наблюдения велись с 1957 г.

Данные рис. 1 (кривая 2) характеризуют усредненный за пять лет, предшествовавших извержению вулкана Эль-Чичон (1977–1981 гг.), годовой ход фоновых значений АОТ (треугольниками и кружками отмечены минимальные и максимальные значения АОТ). Наблюдаемые в феврале – марте и апреле – мае экстремальные значения АОТ определяются главным образом влиянием метеорологических условий [12].

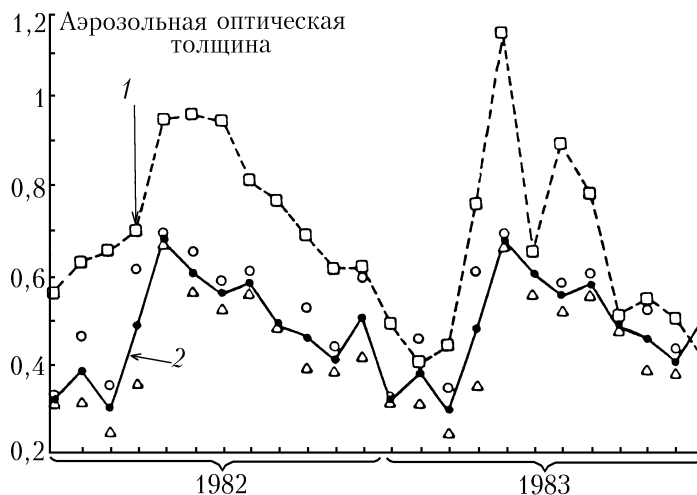


Рис. 1. Изменение аэрозольной оптической толщины по данным наблюдений в г. Мехико за 1982 – 1983 гг. (кривая 1) и средние месячные значения АОТ за пятилетний период, предшествовавший извержению вулкана Эль-Чичон (кривая 2)

Увеличение АОТ в 1982–1983 гг. (рис. 1, кривая 2) могло быть обусловлено влиянием извержений двух вулканов: 1) вулкана Ньямурагира в Заире (1,25° ю.ш.; 29,12° в.д.), который мог оказаться источником «загадочного» вулканического облака [9], вызвавшего рост АОТ в январе – марте 1982 г.; 2) вулкана Эль-Чичон (несколько извержений) в период с 28 марта по 4 апреля 1982 г. Последние обусловили рост АОТ, наблюдавшийся на всем Северном полуша-

рии. Максимальные значения АОТ имели место в апреле – июле 1982 г., после чего произошло постепенное уменьшение АОТ до минимальных значений в феврале 1983 г.

По данным наблюдений Хэя и Дарби [16], в Ванкувере существенный вулканический рост АОТ (рис. 2) начался в апреле 1982 г. при достижении максимальных значений в мае – июне с последующим спадом, продолжавшимся до сентября, после чего произошел рост АОТ до мая 1983 г. (Только к концу года был достигнут фоновый уровень АОТ).

Как видно из данных наблюдений, как в Мехико, так и в Ванкувере наблюдалось быстрое и сравнительно кратковременное возрастание АОТ после извержения, которое можно объяснить влиянием крупных частиц, главным образом пепла и пемзы [23], но не эруптивного стратосферного сернокислотного аэрозоля. Вторичные максимумы АОТ в двух рассматриваемых пунктах оказались неодинаковыми: вторичный максимум в Ванкувере был более длительным. В обоих случаях формирование вторичных максимумов следует приписать влиянию сформировавшегося позднее стратосферного эруптивного аэрозоля. Этот вывод подтверждается данными наблюдений после извержений вулканов Колима и Фуэго [24, 25], которые обнаружили корреляцию роста фактора мутности с интенсификацией сумеречных явлений.

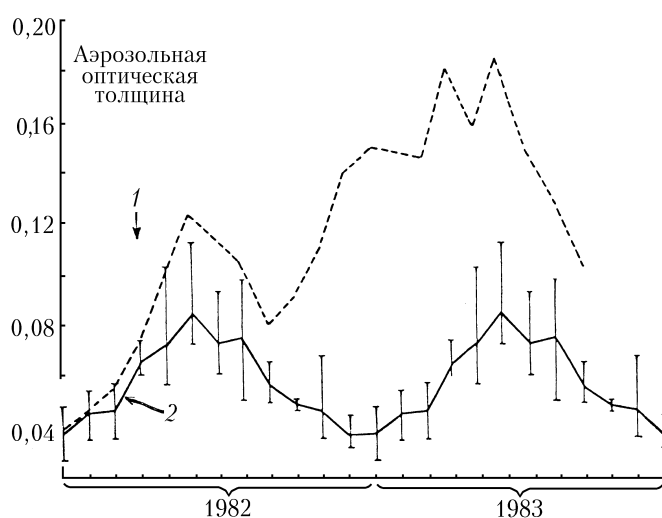


Рис. 2. Изменение аэрозольной оптической толщины по данным наблюдений в г. Ванкувере (кривая 1) и средние месячные значения АОТ за пятилетний период, предшествовавший извержению вулкана Эль-Чичон (кривая 2), по данным [16]

Вулканически обусловленный спад прямой солнечной радиации достигал в Мехико 30%, в Ванкувере 33%. Подобный сильный спад был зарегистрирован даже в Фербенксе (Аляска), особенно зимой 1982–1983 гг. (примерно через 9 месяцев после извержения). Отсюда можно сделать вывод, что оптические свойства эруптивного облака характеризовались сильным обратным рассеянием.

5. Выводы

Рассмотренные результаты позволяют сделать следующие главные выводы:

1. В период с апреля по июль 1982 г. в Мехико и Ванкувере наблюдался значительный рост оптической толщины атмосферы, обусловленный извержением вулкана Эль-Чичон, причем в этот период главный вклад в увеличение АОТ определялся короткоживущими частицами вулканического пепла. Последовавший за этим спад АОТ продолжался до сентября 1982 г. (Ванкувер) и февраля 1983 г. (Мехико).

2. Вторичные максимумы АОТ наблюдались с октября 1982 г. по сентябрь 1983 г. (Ванкувер) и в апреле – июле 1983 г. (Мехико), а их главной причиной было формирование эруптивного стратосферного сернокислотного аэрозоля, что подтверждается интенсификацией типичных постэруптивных сумеречных явлений.

3. Годовой ход АОТ в Мехико в значительной мере определялся влиянием квазидвухлетней осцилляции ветра в стратосфере, проявлявшейся в наличии максимума восточного ветра в полосе широт 10° ю.ш. – 10° с.ш.

4. Слой стратосферного аэрозоля, возникший после извержения вулкана Эль-Чичон, оказал существенное влияние на величину прямой солнечной радиации на уровне подстилающей поверхности, которая уменьшилась (примерно через 9 месяцев после извержения, когда вулканическое воздействие было максимальным) на 38% (Аляска), 33% (Ванкувер) и 30% (Мехико). Как видно, влияние извержения на поступление прямой солнечной радиации усиливалось с широтой.

1. Аэрозоль и климат / Под ред. К.Я. Кондратьева. Л.: Гидрометеиздат, 1991. 542 с.
2. Кондратьев К. Я. Вулканы и климат // Итоги науки и техники. Метеорол. и климатол. Т. 13. М.: ВИНТИ, 1985. 204 с.
3. Кондратьев К. Я. Глобальный климат. СПб: Наука, 1992. 359 с.
4. Кондратьев К. Я., Ивлев Л. С. О воздействии антропогенного аэрозоля на климат // Доклады РАН. 1995. Т. 340. N 1. С. 98–99.
5. Kondratyev K. Ya. Climate Shocks: Natural and Anthropogenic. New York: John Wiley & Sons. 1988. 296 p.
6. Galindo I. Cambios climaticos regionales como componentes del cambio climatico global. Ciencia. 1992. V. 45. P. 21–27.
7. Jennings S. G. (Ed.). Aerosol Effects on Climate. The Univ. of Arizona Press. Tucson and London. 1993. 304 p.
8. Kondratyev K. Ya., Cracknell A. P. Observing Global Climate Change. London e.a. Taylor & Francis. 1996 (in press).
9. Kondratyev K. Ya., Galindo I. Volcanic Activity and Climate. A. Deepak Publ., Hampton, Va. 1996 (in press).
10. Newell R. E. Volcanism and Climate. 1985 Yearbook of Science and Technology. 1984. McGraw Hill: New York. P. 206–225.
11. Langner J., Rodhe M. A global three-dimensional model of the thropospheric sulfur cycle// J. Atmos. Chem. 1991. V. 13. P. 225–263.
12. Matson M., Robock A. Satellite detection of the 1982 El Chichon eruptions and stratospheric dust cloud. Geofis. Int. 1984. V. 23. P. 117–127.
13. DeLuisi J.J., Dutton E.G., Coulson K.L., Defoor T.E., Mendonca B.G. On some radiative effects of the El Chichon volcanic stratospheric dust cloud and a cloud of unknown origin at Mauna Loa // J. Geophys. Res. 1983. V. C88. P. 6769–6772.
14. Davis J. A., Hay J. E. Calculation of the solar radiation incident on a horizontal surface// Proc. First Canadian Solar Radiation Data Workshop. Toronto, 1978. J.E. Hay and T.K. Won, Eds. 1980. Canadian Atmos. Environm. Service, Downsview, Ont. P. 32–58.
15. Freund J. Aerosol optical depth in the Canadian Arctic// Atmosphere–Ocean. 1983. V. 21. P. 158–167.
16. Hay J. E., Darby R. El Chichon – influence on aerosol optical depth and direct, diffuse and total solar irradiances at Vancouver, B.C. // Atmosphere–Ocean. 1984. V. 22. N 3. P. 354–368.
17. Kasten F. A new table and approximation formula for the relative optical air mass// Arch. Meteorol. Geophys. Bioklimatol. 1966. V. B14. P. 206–233.
18. Lacis A. A., Hansen J. E. A parameterization for the absorption of solar radiation in the Earth's atmosphere // J. Atmos. Sci. 1974. V. 31. P. 118–133.
19. MacClatchey R. A., Selby J. E., Garing J. S., Fenn R. W., Volz F. E. Optical Properties of the Atmosphere. Environm. Res. Pap. N 354. Air Force Cambridge Lab. 1971. 85 p.
20. Won T. K. The simulation of hourly global radiation from hourly reported meteorological parameters // Canadian Prairie Area Third Conf., Canadian Solar Energy Soc., Inc. Edmonton, ALTA. 1977. 23 p.
21. Estrada A., Arroyo J. Personal Communication. 1988.
22. Iqbal M. Introduction to Solar Radiation. Academic Press: Toronto. 1983. 390 p.
23. Patterson E. M., Pollard C. O., Galindo I. Optical properties of the ash from El Chichon volcano// Geophys. Res. Lett. 1983. V. 10. P. 317 – 320.
24. Galindo I. Anthropogenic aerosols and their regional scale climatic effects // Aerosols and their Climatic Effects. Eds.: H.E. Gerber, A. Deepak. 1984. A. Deepak Publ. Hampton, Va. P. 245 –259.
25. Galindo I. Presence of volcanic ash in the atmosphere of Mexico City after the January 28, 1913 eruption of Volcan de Fuego de Colima, Mexico. 1995. Geofis. Int. (in press).

Центр наук о Земле университета Колима, Мексика,
Центр экологической безопасности РАН, Санкт-Петербург

Поступила в редакцию
6 апреля 1995 г.

I. Galindo, K. Ya. Kondratyev, G. Zenteno. Atmospheric Aerosol Optical Thickness after The El Chichon Volcanic Eruption on the Basis of Observations in Mexico City and Vancouver.

Direct solar radiation observations data were used to determine the aerosol optical thickness (AOT) increase associated with the presence in the atmosphere of eruptive aerosol and large volcanic ash particles originating from the 28 March to 4 April, 1982 El Chichon eruptions (17.5°N, 93.3°W; Mexico) in Mexico City's polluted atmosphere. These results are compared with those obtained at Vancouver (Canada) revealing that initial AOT increases occurred in both locations during April – July, 1982. However, the Mexico City AOT growth was more substantial. AOT values decreased to the usual background level by February, 1983. Secondary AOT maxima were recorded in Mexico City from April to July, 1983, while in Vancouver a single secondary maximum was observed during the time period from October, 1982 to September, 1983. The results obtained suggest that the initial AOT increases in April – July, 1982, both in Vancouver and Mexico City, are due chiefly to short lifetime volcanic ash particles being located near the surface. However, the secondary AOT increases correspond to stratospheric volcanic aerosols.