

ОПТИКА АТМОСФЕРЫ И КЛИМАТ

УДК 551.09, 551.20

Л.С. Ивлев, В.И. Кудряшов, М.Е. Ариас, А.О. Варгас

КОМПЛЕКСНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИКО-МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ АТМОСФЕРЫ В ОКРЕСТНОСТИ ВУЛКАНА КОЛИМА (МЕКСИКА). ЧАСТЬ 1. СУХОЙ СЕЗОН

Представлены результаты комплексного эксперимента по определению оптико-метеорологических параметров нижних слоев атмосферы в условиях до, во время и после извержения вулканов Фуэго де Колима и Попокатепетль (Мексика) в 1994–1995 гг. в сухой сезон. Измерены аэрозольные оптические толщины атмосферы, коэффициенты прозрачности, суточный ход концентрации озона, а также аэрозольных частиц в диапазоне размеров от 0,4 до свыше 10 мкм. Определены элементный состав аэрозолей и его изменения во времени для различных точек наблюдения. Результаты проанализированы с учетом метеорологической обстановки.

I. Введение

Роль мощных вулканических извержений в глобальном изменении радиационных характеристик атмосферы и, соответственно, в изменении погоды и климата широко известна [1–5]. Но практически не обсуждаются вопросы влияния непрерывной эмиссии вулканического вещества слабой интенсивности на оптико-метеорологические параметры атмосферы в регионах, где есть активно действующие вулканы, в частности в Мексике. В тропосферу выбрасываются твердые частицы магматического и почвенного происхождения, сернистый газ и водяной пар, а также другие компоненты, не играющие такой существенной роли в изменении состава и физико-химических свойств тропосферы, как перечисленные.

Эти продукты вулканической деятельности ответственны за возникновение мелкодисперсных серно-кислотных и сульфатных аэрозольных частиц в тропосфере, а также в какой-то степени за процессы генерации и гибели молекул тропосферного озона. Повышенные концентрации сернистого газа приводят также к дополнительному поглощению в тропосфере ультрафиолетовой солнечной радиации.

Благодаря присутствию в тропосфере гигроскопических частиц вулканического происхождения более интенсивно идут процессы облакообразования и, возможно, выпадения осадков. Масштабы влияния вулканических процессов на оптико-метеорологические параметры нижних слоев атмосферы определяются как интенсивностью эмиссии вулканического вещества, так и местоположением действующего вулкана. С этой точки зрения Мексика представляет собой идеальный полигон для исследования влияния вулканической деятельности на состав и радиационные характеристики тропосферы.

II. Место проведения исследований и используемая аппаратура

Комплексные измерения атмосферных характеристик в окрестности вулкана Фуэго де Колима про-

водились в период с декабря 1994 по октябрь 1995 г. в сухой и влажный сезоны.

Использовались данные автоматических метеорологических станций в пункте Волкансито и Центре атмосферных исследований университета Колима. Первая станция находится в непосредственной близости от кратера вулкана Фуэго де Колима на высоте 3500 м от уровня моря, а вторая на северной окраине города Колима на высоте 500 м от уровня моря и примерно в 40 км от вулкана. Такое расположение станций позволяет детально наблюдать горнодолинную циркуляцию и вертикальную стратификацию полей температуры и влажности.

Наблюдения ультрафиолетовой радиации проводились в районе ранчо Рефухио на высоте 1500 м от уровня моря и в 15 км от вулкана Фуэго де Колима. Измерения глобальной и рассеянной радиации осуществлялись с помощью стандартной актинометрической аппаратуры – ультрафиолетовых радиометров Эппли, работающих в диапазоне длин волн 290–385 нм. По измерениям глобальной и рассеянной радиации по стандартной методике [6, 7] вычислялись общая и остаточная оптические толщины атмосферы τ_t и τ_a , а также коэффициент прозрачности q .

Общепринято считать остаточную оптическую толщину атмосферы аэрозольной, однако в ультрафиолетовой области спектра это не совсем корректно, так как в эту характеристику может вносить существенный вклад не учтенное ослабление радиации на молекулах водяного пара, озона и сернистого газа. Аэрозольная оптическая толщина атмосферы дает достаточно наглядное представление об общем содержании аэрозолей в атмосфере и при определенных априорных предположениях об их микроструктуре может быть пересчитана в характеристику массового содержания аэрозолей (г/м^2) во всей атмосферной толщине.

В приземном слое атмосферы проводились измерения концентрации и дисперсности аэрозолей с помощью фотоэлектрического счетчика частиц

A3-5M в диапазоне размеров частиц $0,4 \leq d < 20$ мкм, дисперсности и морфологической структуры аэрозолей в диапазоне размеров частиц $0,01 < d < 20$ мкм с помощью двухкаскадного импактора конструкции НИИФ ЛГУ-1982 [8], химического и элементного состава аэрозолей с помощью фильтрового заборника, снабженного одно- и трехкаскадными фильтрами из материала ФП [9], концентрации двуокиси серы и двуокиси азота, а также озона. Измерения указанных примесных газов проводились с помощью хемиллюминесцентных газоанализаторов, разработанных АО «Оптэк» [10].

Так как основной задачей исследований было изучение поведения аэрозолей вулканического происхождения в нижних слоях атмосферы, в частности взаимодействия метеорологических характеристик и концентраций реакционно-активных газов с аэрозолями, то наибольший интерес представляла оценка влияния эмиссии вулканического вещества вулкана Фуэго де Колима на изменение атмосферных характеристик в его окрестности. С этой точки зрения весь цикл исследований в сухой период года следует разделить на две части: декабрь 1994 г. до извержения вулкана Попокатепетль и январь–июнь 1995 г., когда в нижних слоях атмосферы заметно проявлялось влияние продуктов извержения этого вулкана.

III. Измерения в декабре 1994 г.

3.1. Метеорологические наблюдения

В декабре 1994 г. в окрестности вулкана Фуэго де Колима наблюдалась достаточно устойчивая циркуляция воздушных масс. В районе Волкансито направление воздушного потока было примерно $135^\circ \pm 45^\circ$ (рис. 1,а), причем сильные изменения направления ветра зафиксированы только в послеполуденное время. Заметные и упорядоченные изменения направления ветра в течение суток отмечались 10–11 декабря от 150° в ночное и утреннее время до 50° в вечерне-ночное время с возвращением к направлению 150° в полдень 11 декабря; аналогичная картина была 17–18 декабря; 19 декабря изменение направления ветра было от 100° в ночное-утреннее время до 320° в вечернее.

В районе Университетского центра ежесуточно отмечалось четкое изменение направления ветра от $30^\circ \pm 25^\circ$ в ночное-утреннее время на противоположное в период с 8 до 12 ч и последующее возвращение к прежнему направлению в период с 20 по 24 ч. Наибольшие вариации направления ветра зафиксированы в утренние часы: с 7 до 12 ч. При этом горизонтальные скорости воздушных потоков на пункте Волкансито изменялись от 1 до 8 м/с, несколько ослабевая до диапазона 1–5 м/с во второй половине дня с 12 до 20 ч.

В суточном ходе величины скорости ветра часто наблюдались двухвершинные и даже трехвершинные распределения: наиболее отчетливый максимум отмечался с 19 до 22 ч, а максимум с 0 до 12 ч часто

раздваивался на максимумы 1–4 и 9–12 ч (рис. 1,б). В приземном слое в г. Колима наблюдалась обратная картина: с 20 ч вечера до 11 ч дня скорость ветра практически не превышала 1 м/с и возрастала до 2–3 м/с в послеполуденное время с 12 до 19 ч. В ночное время, примерно с 02 до 04 ч, часто фиксировался второй слабый максимум скорости ветра – 1,5–2 м/с (рис. 1,в).

Суточный ход температуры в обоих пунктах наблюдений определялся режимом инсоляции и был достаточно устойчивым (рис. 2,а,в). Для Волкансито диапазон суточных изменений температуры в период с 10 до 25 декабря был от 4 до 11° , а в г. Колима от 20 до 32° . Разброс значений температуры в разные дни для пункта Волкансито был более существенным, особенно в дневное время суток, тогда как для города наблюдались почти идентичные картины суточного хода температуры: наиболее низкие значения температуры отмечались в 07 ч утра (19 – 21°) и наиболее высокие с 12 до 16 ч ($28,5$ – $32,5^\circ$). Несколько необычным был суточный ход температуры для пункта Волкансито 18 и 19 декабря, когда с 11 до 13 ч фиксировалось небольшое понижение температуры, обусловленное сильным увеличением облачности с последующим выпадением осадков.

Суточный ход величин относительной влажности для пункта Волкансито и г. Колима отличается очень сильно (рис. 2,б,г). В пункте Волкансито для верхней границы отмечаемых значений относительной влажности суточный ход практически отсутствует, относительная влажность близка к насыщению; для нижней границы существуют два максимума относительной влажности: с 02 до 09 ч и с 12 до 18 ч. Наиболее вероятные значения относительной влажности порядка $70\% \pm 10\%$, что благоприятствует конденсационному росту аэрозольных частиц, в первую очередь гигроскопических типа сульфатных и серноокислотных. А в полдень 18 декабря наблюдалось даже образование осадков, очевидно, вызванное присутствием в атмосфере большого количества гигроскопического вещества вулканического происхождения. В приземном слое городского воздуха отчетливо отмечается высокий уровень относительной влажности с 20 ч вечера до 08 ч утра: $85\% \pm 10\%$, и низкий уровень относительной влажности в дневное время с 10 до 16 ч – меньше 70% , что связано с конвективным подъемом увлажненного воздуха в более высокие слои атмосферы и заменой его более сухим воздухом из этих слоев.

Таким образом, можно сделать следующие выводы:

- 1) В декабре месяце сложилась достаточно стабильная метеорологическая обстановка в окрестности вулкана Колима.
- 2) В г. Колима осуществлялись условия, благоприятные для накопления атмосферных загрязнений в вечернее, ночное и утреннее время.
- 3) В ночное время происходил сток воздушных масс с вершины вулкана Колима в сторону города.

4) Осуществлялись условия для конденсационно-го укрупнения аэрозольных частиц: в тропосфере

практически в течение всех суток, а в приземном слое атмосферы с 20 ч вечера до 08 ч утра.

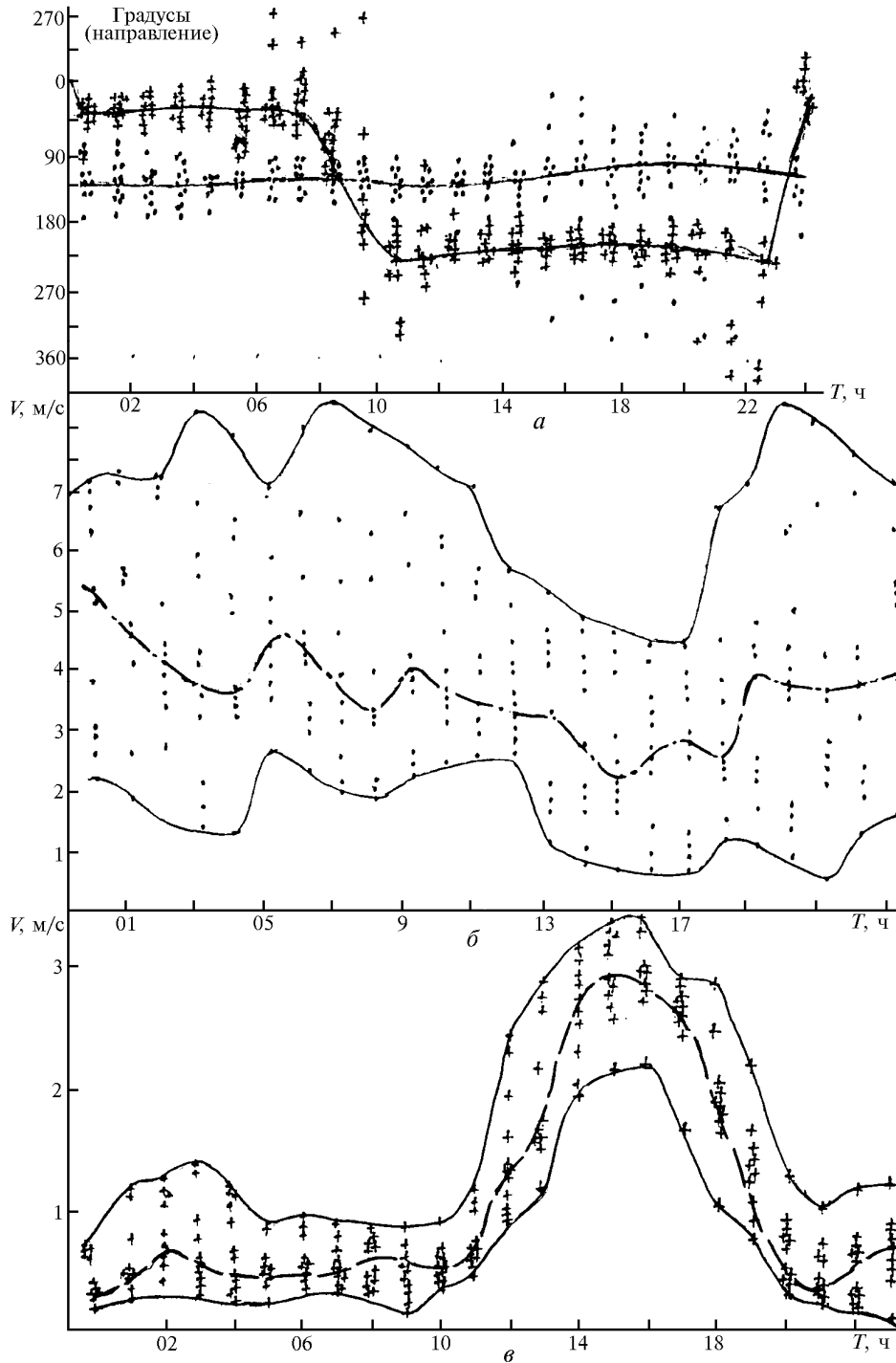


Рис. 1. Среднесуточный ход направления (а) и скорости ветра (б) для двух пунктов наблюдения: крестики – окраина г. Колима (Университетский центр атмосферных исследований), точки – Волкансито, вершина 3500 м в непосредственной близости от кратера вулкана Фуэго де Колима. Период наблюдений – 10–20 декабря 1994 г.; в – изменение скорости ветра в приземном слое г. Колима

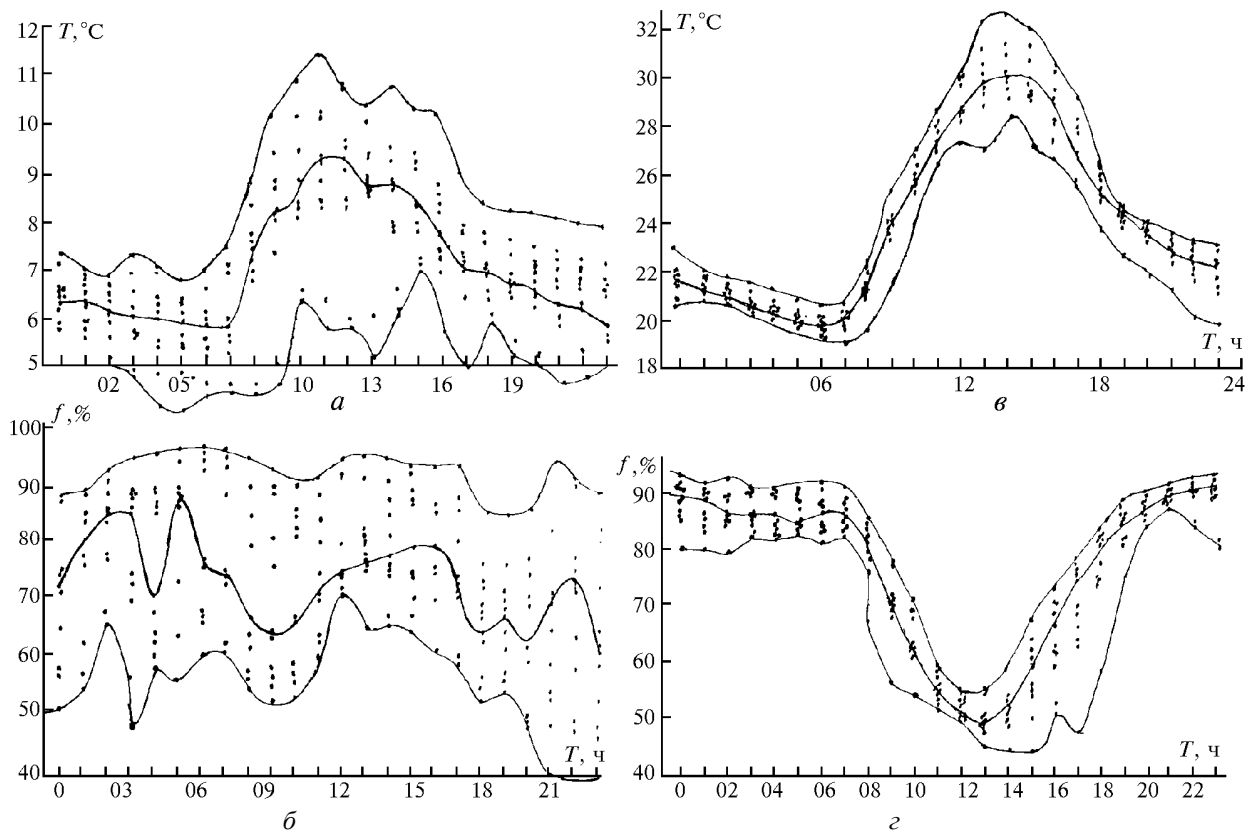


Рис. 2. Суточный ход температуры (а, в) и относительной влажности (б, г) в двух пунктах наблюдений: Волканито (а, б) и Университетский центр (в, г)

3.2. Аэрозольные наблюдения в приземном слое атмосферы

Основной цикл измерений с помощью фотоэлектрического счетчика был проведен в центре г. Колима. В табл. 1 представлен средний суточный ход функции dN/dr по данным измерений с 10 по 20 декабря 1994 г. Более наглядную информацию о поведении аэрозольного вещества в течение суток в приземном слое г. Колима дает пересчет данных на значения dV/dr или dM/dr . Величины массовой концентрации аэрозолей значительно превосходят предельно допустимые, особенно в утренние часы. Электронно-микроскопический анализ импакторных проб свидетельствует о том, что значительную долю аэрозольных частиц с размерами $d \leq 0,8$ мкм представляют сульфатные и в некоторых случаях сернокислотные частицы. Причем в большинстве случаев наблюдается наличие твердого ядра. Был проведен элементный анализ аэрозольных проб на фильтрах Петрянова. Результаты элементного анализа представлены в табл. 2. Наблюдается хорошее соответствие данных элементного анализа данным фотоэлектрического счетчика по массовой концентрации.

По данным элементного анализа был выполнен расчет факторов обогащения для разных элементов относительно состава земной коры. Суточный ход факторов обогащения (рис. 3) позволяет утверждать, что существуют, по крайней мере, три группы элементов разной природы: а) S, Hg, Se, Cu, Ni, Rb, Ga, Cr; б) Br, Y, Cl; в) P, Pb, Al, Zn, Fe, K, Ti, Ca, Mn, Sr.

Первая группа элементов, очевидно, относится к веществу, эмитируемому вулканом Фуэго де Колима; вторая группа, вероятно, тоже вулканического происхождения, но ее источник не идентичен первому и, возможно, находится в другом месте вулкана. Менее вероятно, что для первой и второй групп элементов процессы аэрозолеобразования резко различаются. Третья группа элементов имеет несколько источников эмиссии, возможно почву, вулкан, промышленность и транспорт г. Колима. Для P, Pb, Al, Zn, Fe вулканический источник эмиссии отчетливо проявляется в наличии утреннего максимума. Элемент K, очевидно, присутствует в составе второй группы элементов. Простейшие оценки показывают, что подавляющая доля аэрозольного вещества (>80%) даже в центре г. Колима вулканического происхождения.

Таблица 1

Средний суточный ход функции dN/dr , $\text{см}^{-3} \cdot \text{мкм}^{-1}$, по измерениям 10.12–20.12 1994 г. (центр г. Колима, ул. Леандро Вайе, 113)

Время измерения, ч	Средний размер частиц \bar{d} , мкм											
	12,5	8,5	5,5	3,0	1,75	1,25	0,95	0,85	0,75	0,65	0,55	0,45
01	8,88E-3	1,83E-2	7,55E-2	7,02E-1	1,35E+0	9,26E+0	5,24E+1	6,59E+1	2,18E+2	6,85E+2	9,94E+2	5,66E+2
02	9,11E-3	1,48E-2	7,72E-2	6,01E-1	1,74E+0	4,27E+0	4,21E+1	7,06E+1	2,81E+2	6,66E+2	1,02E+3	6,47E+2
03	7,63E-3	1,68E-2	7,87E-2	6,23E-1	2,65E+0	8,17E+0	4,52E+1	8,76E+1	2,48E+2	6,77E+2	1,12E+3	7,30E+2
04	7,73E-3	1,48E-2	7,66E-2	1,04E+1	1,76E+0	3,92E+0	5,46E+1	7,80E+1	2,35E+2	6,66E+2	1,10E+3	8,17E+2
05	7,33E-3	1,51E-2	7,24E-2	7,42E-1	1,97E+0	4,26E+0	3,94E+1	1,02E+2	2,17E+2	6,01E+2	1,06E+3	8,53E+2
06	8,58E-3	1,81E-2	7,93E-2	7,66E-1	2,34E+0	2,46E+1	3,34E+1	6,86E+1	1,99E+2	5,44E+2	1,14E+3	1,10E+3
07	1,78E-2	3,48E-2	1,49E-1	9,60E-1	2,70E+0	9,67E+0	3,99E+1	9,26E+1	2,93E+2	6,82E+2	1,15E+3	7,47E+2
08	2,83E-2	5,78E-2	2,15E-1	1,30E+0	4,90E+0	1,89E+1	3,75E+1	1,34E+2	3,03E+2	7,14E+2	9,54E+2	5,80E+2
09	3,57E-2	6,83E-2	3,51E-1	1,56E+0	4,88E+0	1,67E+1	1,02E+2	1,78E+2	3,38E+2	9,05E+2	8,73E+2	3,81E+2
10	3,30E-2	3,97E-2	2,30E-1	2,35E+0	2,39E+0	1,67E+1	1,24E+2	2,11E+2	5,36E+2	8,37E+2	8,02E+2	3,63E+2
11	2,35E-2	3,93E-2	1,96E-1	8,60E-1	2,34E+0	1,34E+1	5,01E+1	1,80E+2	4,50E+2	7,32E+2	8,57E+2	6,87E+2
12	2,23E-2	3,10E-2	1,45E-1	7,43E-1	1,89E+0	1,57E+1	4,31E+1	9,98E+1	3,58E+2	8,74E+2	8,70E+2	4,59E+2
13	1,41E-2	4,10E-2	1,47E-1	6,11E-1	1,69E+0	5,80E+0	5,76E+1	2,00E+2	4,76E+2	7,25E+2	6,50E+2	3,04E+2
14	1,30E-2	2,76E-2	1,23E-1	6,05E-1	1,28E+0	6,19E+0	9,46E+1	2,13E+2	5,36E+2	7,54E+2	6,20E+2	2,41E+2
15	9,77E-3	2,69E-2	2,06E-1	8,64E-1	1,56E+0	7,51E+0	8,00E+1	2,25E+2	5,68E+2	8,00E+2	6,94E+2	3,24E+2
16	1,14E-2	2,38E-2	9,16E-2	6,72E-1	1,80E+0	9,35E+0	8,11E+1	2,40E+2	3,40E+2	8,55E+2	8,60E+2	4,88E+2
17	1,36E-2	2,13E-2	1,16E-1	7,52E-1	1,55E+0	4,89E+0	4,40E+1	1,02E+2	3,00E+2	8,53E+2	8,35E+2	4,96E+2
18	1,35E-2	2,67E-2	1,25E-1	9,24E-1	2,46E+0	7,57E+0	4,65E+1	9,48E+1	3,18E+2	7,47E+2	1,08E+3	5,01E+2
19	1,04E-2	2,75E-2	1,59E-1	7,37E-1	1,79E+0	6,05E+0	5,89E+1	1,29E+2	3,76E+2	8,10E+2	8,45E+2	3,84E+2
20	1,00E-2	4,76E-2	1,35E-1	1,09E+0	1,91E+0	9,04E+0	6,53E+1	9,98E+1	2,24E+2	7,22E+2	1,00E+3	9,38E+2
21	8,77E-3	2,06E-2	1,98E-1	9,42E-1	3,17E+0	7,87E+0	5,20E+1	1,03E+2	3,05E+2	9,13E+2	1,30E+3	8,89E+2
22	1,51E-2	2,13E-2	1,55E-1	1,04E+0	3,21E+0	8,68E+0	4,29E+1	1,05E+2	2,73E+2	7,56E+2	1,07E+3	7,84E+2
23	1,56E-2	3,23E-2	1,18E-1	1,05E+0	2,65E+0	8,81E+0	3,95E+1	1,08E+2	3,10E+2	7,40E+2	1,18E+3	6,49E+2
24	9,86E-3	2,24E-2	8,88E-2	1,24E+0	1,87E+0	1,18E+1	3,58E+1	8,68E+1	2,52E+2	6,67E+2	1,05E+3	7,81E+2

Таблица 2

Результаты элементного анализа аэрозольных проб в центре г. Колима в декабре 1994 г.

Элемент	Концентрация, $\text{нг}/\text{м}^3$												Погрешность, %	
	13–14.	14.12	14–15.	15.12	15–16.	16–17.	17–18.	18.12	18–19.	19.12	19–20.	22.12		23.12
Al	4900	25900	1900	10100	9500	10900	8200	12900	6500	34800	9100	30400	10200	15
Si	59000	180000	17000	149000	58000	105000	113000	159000	60000	416000	115000	234000	28000	3
P	< 700	2400	< 600	2900	< 1000	700	700	< 2000	< 1000	3500	900	1500	3400	50
S	83000	120000	14000	92000	10100	148000	89000	183000	171000	181000	166000	91000	44000	20
Cl	< 70	2520	270	620	500	< 70	< 50	2120	< 100	3740	< 80	2820	3970	5
K	620	800	< 60	1040	160	1000	1070	800	230	1250	850	1550	< 200	6
Ca	2460	6410	670	5840	2030	3710	4860	5920	1570	10020	3900	7250	610	2
Ti	116	302	22	285	33	183	281	231	91	407	163	355	36	8
Cr	17	45	8	14	18	10	16	44	15	33	24	35	34	25
Mn	33	64	11	38	15	23	40	44	19	84	31	74	12	20
Fe	1130	2030	340	2130	610	1290	2200	2820	910	3430	1500	2950	300	2
Ni	7	21	4	11	10	10	9	26	14	16	13	11	20	20
Cu	17	25	3	7	24	14	19	21	26	32	19	71	86	10
Zn	28	47	4	26	26	24	32	23	13	53	33	41	24	7
Ga	1	< 3	< 1	3	2	1	< 1	8	2	4	1	3	4	40
Se	3	7	2	3	2	1	< 1	7	4	10	5	7	10	40
Br	4	11	3	5	5	5	7	10	20	13	8	11	< 6	25
Rb	5	34	3	6	14	7	2	16	< 9	23	4	7	17	30
Sr	16	19	7	18	7	14	26	37	40	53	15	37	9	25
Zr	9	26	18	15	13	10	8	21	29	19	16	18	17	30
W	< 4	< 10	< 4	5	< 6	3	4	21	42	24	5	13	29	40
Hg	< 2	< 6	< 2	6	< 4	< 2	< 1	< 6	< 6	12	4	< 4	24	15
Pb	26	61	10	42	28	33	36	48	34	58	29	46	34	10

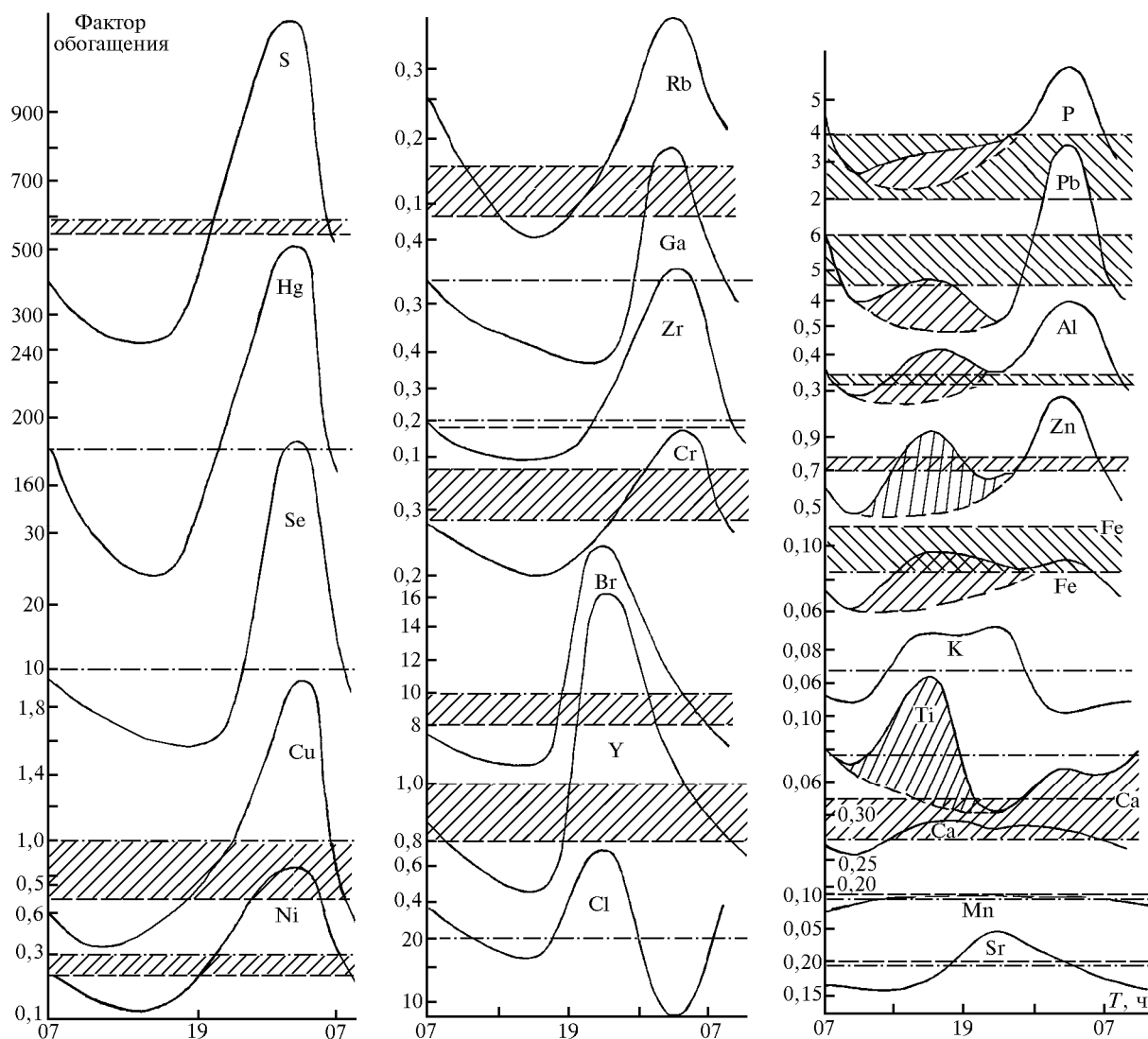


Рис. 3. Суточный ход факторов обогащения различных элементов по аэрозольным пробам, взятым в центре г. Колима (ул. Леандро Вайе) с 10 по 20 декабря 1994 г.: штрихпунктирная линия – средние значения факторов обогащения; пунктирная линия – средние значения факторов обогащения по аэрозольным пробам, взятым в Университетском центре в январе 1995 г.

3.3. Радиационные наблюдения оптических толщин атмосферы

Радиационные наблюдения оптических толщин атмосферы в районе ранчо Рефухио также свидетельствуют о возрастании оптической толщины атмосферы в период с 10 декабря. Однако увеличение оптической толщины атмосферы происходило достаточно медленно с накоплением в тропосфере аэрозольного вещества вулканического происхождения. В 09 ч утра 10 декабря $\tau_a \approx 0$ и возрастает до 0,2–0,23 в послеполуденное время, после чего небосвод был закрыт облаками. 11 декабря остаточная оптическая толщина была уже порядка 1,0–1,2 и резко возросла с появлением облачных структур. Последнее, возможно, привело к сильному очищению атмосферы, так как 12–13 декабря произошло заметное уменьшение остаточной оптической толщины до $\tau_a = 0,25$ и даже до $\tau_a = 0,15$ (для 11 ч 13 декабря).

В последующие дни происходило устойчивое возрастание оптической толщины атмосферы, достигшее наибольших значений к 18 декабря, когда аэрозольная оптическая толщина имела значения, равные $\tau_a = 1,60 \div 1,80$. В последующие дни снова шло уменьшение остаточной оптической толщины атмосферы до значений $\tau_a < 0,1$. В эти дни для измеренных оптических толщин наблюдались сильные одиночные выбросы τ_a до значений $\tau_a = 1,3 \div 5,0$ и относительно размытые увеличения τ_a , длящиеся 20–40 мин (рис. 4). Последние наблюдались при появлении перистых облаков.

В первом случае визуально идентифицировать облака не удавалось. Вероятно, такого типа случаи относятся к появлению в атмосфере облачных структур с очень мелкими частицами ($d \leq 0,3$ мкм), возможно, не только рассеивающими, но и поглощающими радиацию в ультрафиолетовой области спектра.

3.4. Обсуждение результатов измерений в декабре 1994 г.

Прямое сопоставление результатов микроскопических и оптических измерений не дает полного соответствия, хотя общая тенденция накопления аэрозольного вещества и последующего очищения атмосферы наблюдается как в одном, так и в другом виде измерений. Объяснение недостаточного соответствия данных тем, что в случае микрофизических измерений получа-

ем данные о содержании аэрозолей в приземном слое, а в случае оптических – во всей толще атмосферы, не является убедительным, так как основная масса аэрозольного вещества должна находиться в приземном слое, а кроме того, в течение суток происходит перемешивание примеси в приземном и более высоких слоях атмосферы. Вероятно, объяснение следует искать в изменчивости функции распределения аэрозольных частиц по размерам, которая, в свою очередь, сильно влияет на изменчивость ее оптических свойств.

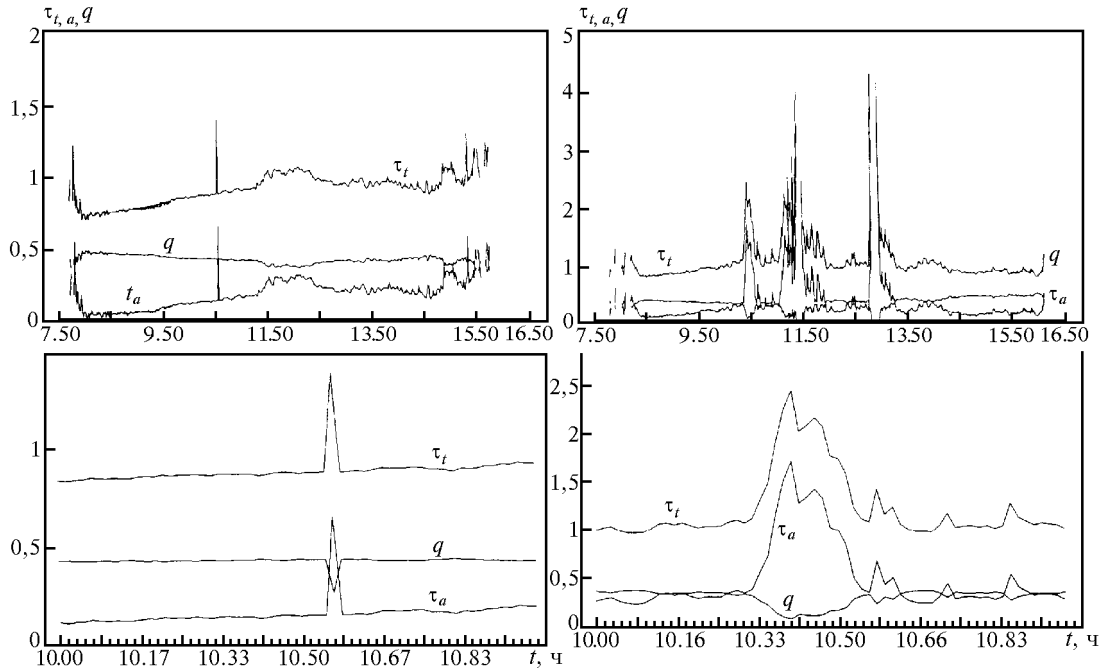


Рис. 4. Два типа флуктуаций оптических характеристик атмосферы (τ_t , τ_a , q). Слева – 13 декабря, справа – 19 декабря. Внизу дана временная развертка τ_t , τ_a , q в другом масштабе

Поскольку в начальный период исследований было недостаточно данных для корректных расчетов оптических характеристик аэрозолей, то по данным фотоэлектрического счетчика вычислялась только удельная поверхность аэрозольных частиц.

На рис. 5 представлены данные вычислений временного хода массовой концентрации аэрозольных частиц m_a с удельной поверхностью аэрозольных частиц S_a в диапазоне размеров $0,5 \leq d \leq 0,7$ мкм и τ_a для измерений в 11–12 ч дня, когда наблюдается заметное вертикальное перемешивание атмосферных слоев. Отчетливо проявляются антикорреляционная зависимость между m_a и τ_a и весьма удовлетворительное сходство поведения τ_a и S_a ($0,5 \leq d \leq 0,7$).

Это свидетельствует о малом вкладе гигантских частиц в ослаблении солнечной радиации при преимущественном присутствии гигантских частиц в приземном слое атмосферы, а также об отчетливо различающемся поведении гигантских и мелких частиц: увеличение концентрации гигантских частиц сопровождается уменьшением концентрации частиц в диапазоне $0,5 \leq d \leq 0,7$ мкм, и наоборот. Столь

своеобразное поведение частиц разных размеров, возможно, свидетельствует об определенных особенностях эмиссии вулканического вещества и существовании процессов образования аэрозольных частиц из вулканических газов.

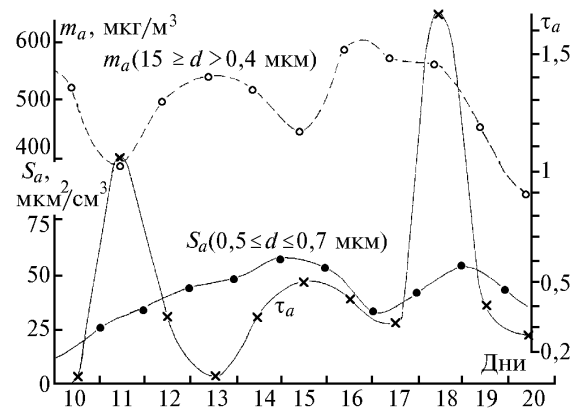


Рис. 5. Временной ход различных аэрозольных характеристик с 10 по 20 декабря 1994 г.: τ_a – аэрозольная толщина атмосферы в ультрафиолетовой области спектра (пункт – ранчо Рефухио)

Частицы, образованные из вулканического вещества, служат ядрами конденсации для формирования облачных структур, что подтверждается заметным увеличением облачности при увеличении эмиссии вулканического вещества. Кроме того, 18 декабря вблизи вулкана Фуэго де Колима наблюдалось выпадение осадков. Облачные системы, очевидно, способствуют, в свою очередь, более быстрому очищению тропосферы от вулканического материала, что и наблюдалось после 18 декабря.

IV. Экспериментальные исследования в январе–июне 1995 г.

4.1. Совместные измерения аэрозольных характеристик и концентраций приземного озона и сернистого газа

В сухой период с января по июнь 1995 г. проводились совместные измерения аэрозольных характеристик и концентраций озона и сернистого газа в приземном слое атмосферы на территории Университетского центра атмосферных исследований. По измерениям фотоэлектрическим счетчиком обнаруживаются очень высокая нестабильность измеряемых аэрозольных характеристик, высокое содержание в приземном слое атмосферы аэрозольных частиц $d > 2,0$ мкм и большое число случаев, когда наблюдались функции распределения частиц по размерам с

очень резко выраженными максимумами. В таких случаях часто более 50% частиц находились в одном-двух каналах измерения, т.е. в диапазоне размеров шириной $\Delta d = 0,1-0,2$ мкм.

Средний суточный ход величины dV/dr для периодов январь–февраль, апрель–май представлен в табл. 3, 4. Характерным для измерений в январе–феврале являлось наличие трех отчетливо выраженных максимумов концентрации частиц в течение суток:

а) утреннего с 06 до 08 ч для диапазона размеров $d \geq 0,7$ мкм,

б) дневного с 11 до 15 ч для диапазона размеров $d \geq 1,0$ мкм,

в) вечернего с 21 до 23 ч для диапазона размеров $10 > d > 2,0$ мкм и $d < 0,7$ мкм.

В остальных диапазонах размеров максимумы концентраций либо отсутствовали, либо были смещены по времени. Для измерений в мае наблюдается значительное уменьшение концентрации частиц по сравнению с январем–февралем в диапазоне размеров $4 \geq d > 0,6$ мкм и заметное увеличение в диапазоне размеров $d \leq 0,6$ мкм. Суточный ход концентрации также претерпевает некоторые изменения: отмечается определенное увеличение концентрации в послеполуденное время для частиц в диапазонах $0,6 \leq d \leq 2,0$ мкм и $d > 10$ мкм.

Таблица 3

Суточный ход функции dV/dr на окраине г. Колима для января–февраля 1995 г. (CUICA)

\bar{d} , мкм	Время, ч											
	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12
12,5	14,6	13,2	11,8	11,3	10,8	12,6	14,3	14,1	13,9	11,2	8,61	8,88
8,5	5,90	5,62	5,34	6,39	7,42	9,91	12,4	11,5	10,7	8,82	6,98	7,28
5,5	4,95	5,31	5,67	13,4	21,2	18,3	15,4	15,1	14,8	11,3	7,75	6,91
3,0	8,22	10,2	12,2	14,0	15,7	19,4	23,2	20,6	18,0	13,2	8,46	8,08
1,75	4,07	4,02	3,97	5,76	7,56	10,7	13,9	12,6	11,4	6,64	1,92	3,10
1,25	4,91	6,80	8,70	10,7	12,7	15,2	17,7	17,2	16,7	8,98	1,23	1,79
0,95	9,78	17,4	25,0	42,4	59,8	71,8	83,7	80,9	78,2	43,3	8,48	14,4
0,85	23,1	37,4	51,7	62,4	73,0	92,8	112,6	113,3	114,0	73,6	33,2	38,3
0,75	34,2	46,6	59,0	79,5	90,0	95,9	101,8	98,0	94,2	73,2	52,3	64,8
0,65	47,5	43,6	39,8	40,6	41,5	38,4	35,2	35,3	35,4	48,9	62,4	68,9
0,55	53,6	42,7	31,8	24,5	17,2	13,2	9,12	22,3	35,4	48,9	62,4	68,9
0,47	2,10	1,80	1,50	1,95	2,40	2,95	3,50	2,92	2,35	7,74	13,14	11,35

\bar{d} , мкм	Время, ч											
	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
12,5	9,14	9,56	9,97	9,82	9,67	8,54	7,42	7,80	7,96	7,62	7,29	10,9
8,5	7,59	8,60	9,62	9,50	9,37	7,08	4,79	17,2	22,4	21,0	19,6	12,6
5,5	6,07	9,30	12,5	9,80	7,07	8,00	8,93	11,1	13,3	12,2	11,0	7,98
3,0	7,70	9,06	10,4	8,76	7,11	6,92	6,73	8,05	9,24	9,54	9,84	9,03
1,75	4,28	5,20	6,13	4,72	3,30	2,56	1,82	3,20	4,42	5,51	6,60	5,34
1,25	2,36	5,34	8,22	7,52	6,71	4,00	1,28	1,12	0,46	0,58	0,70	2,80
0,95	20,3	27,7	35,0	46,3	47,5	25,3	3,18	9,20	14,9	12,8	10,8	10,28
0,85	43,3	61,9	80,5	101,7	122,9	68,9	15,0	11,5	7,90	13,7	19,4	31,4
0,75	77,2	66,1	55,5	83,9	112,7	69,8	26,8	22,4	18,0	28,4	38,9	57,2
0,65	75,5	77,5	79,4	68,2	57,0	50,1	43,2	44,4	45,6	53,8	62,0	68,7
0,55	75,5	54,1	32,7	21,5	10,3	26,8	43,3	44,0	43,9	46,7	49,5	62,5
0,47	9,56	8,12	6,67	4,60	2,53	13,1	23,7	16,2	56,0	30,5	0,50	5,03

Таблица 4

Суточный ход функции dV/dr для апреля–июня 1995 г. в Университетском центре (CUICA)

\bar{d} , мкм	Время, ч											
	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12
12,5	6,60	5,89	5,18	5,01	4,84	11,2	11,1	11,0	9,68	9,68	9,68	11,2
8,5	5,18	4,01	2,84	2,53	2,22	5,06	5,12	5,18	6,66	7,03	7,40	6,90
5,5	4,25	3,96	3,67	3,45	3,23	7,11	7,81	8,51	7,11	8,40	9,68	10,0
3,0	4,31	3,90	3,50	3,58	3,65	53,2	44,7	36,2	7,79	7,15	6,51	6,46
1,75	2,04	1,98	1,92	1,74	1,56	0,54	1,57	2,60	3,72	2,19	0,66	5,98
1,25	0,911	0,808	0,704	0,704	0,704	0,400	0,652	0,704	0,726	1,23	1,74	15,9
0,95	1,78	1,88	1,98	2,40	2,83	3,73	3,74	3,79	5,75	6,32	6,90	85,4
0,85	3,26	3,44	3,61	3,60	3,58	16,0	9,30	2,60	9,92	11,4	12,9	78,6
0,75	6,51	6,82	7,1	11,1	15,0	18,9	32,1	45,3	9,92	11,4	12,9	78,6
0,65	18,2	18,9	39,8	42,4	46,0	29,2	46,4	63,6	45,3	41,8	38,2	79,9
0,55	53,6	48,7	43,8	36,0	30,2	35,6	37,3	39,1	46,8	60,2	73,5	53,6
0,47	54,2	46,2	38,3	35,6	33,0	22,0	20,4	18,3	57,4	77,4	78,0	39,0

\bar{d} , мкм	Время, ч											
	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
12,5	13,8	11,0	9,24	9,90	10,6	7,70	4,84	4,40	3,96	4,02	4,09	5,34
8,5	6,41	7,77	9,13	7,90	6,66	5,62	4,69	13,6	22,4	21,6	20,8	13,0
5,5	10,4	9,86	9,31	7,37	5,43	5,43	5,43	8,40	11,4	11,7	12,0	8,14
3,0	6,42	7,19	7,96	6,56	5,17	5,66	6,14	5,95	5,76	5,75	4,74	4,52
1,75	11,3	8,46	5,64	5,59	5,54	3,90	2,26	3,49	4,72	5,66	6,60	4,42
1,25	30,1	19,3	8,51	5,55	2,59	2,38	2,16	1,56	0,955	0,698	0,440	0,676
0,95	164,0	164,0	164,0	93,2	22,7	15,4	8,10	13,0	17,8	15,3	12,7	7,24
0,85	144,0	137,0	130,0	83,0	36,2	24,5	12,9	7,88	2,90	2,66	2,43	73,4
0,75	144,0	170,0	197,0	143,0	89,2	41,2	0,163	0,810	1,45	2,48	3,52	73,9
0,65	122,0	96,6	71,1	54,5	37,9	22,8	6,69	5,87	4,65	7,23	9,81	65,7
0,55	32,7	22,6	12,6	10,9	9,23	14,8	20,3	32,1	23,9	31,2	39,5	36,1
0,47	0,00	0,10	0,20	25,6	51,1	73,0	95,0	90,3	85,6	80,3	75,6	37,5

Таблица 5

Результаты элементного анализа аэрозольных проб в Университетском центре г. Колима (январь–май 1995 г.)

Элемент	Концентрация, нг/м ³							Погрешность, %
	23.01	31.01	1.02	3.02	3.02	19–20.05	20.05	
Al	13900	14400	14100	13100	18600	1420	3940	15
Si	115000	185000	129000	180000	179000	20600	65800	3
P	< 1000	< 1000	1900	< 1000	< 1000	< 200	< 400	50
S	45000	28000	24000	38000	48000	2390	10860	20
Cl	2800	3900	2400	2600	1500	750	160	5
K	760	740	890	1160	1590	30	330	6
Ca	4010	5740	5720	6950	6480	990	3840	2
Ti	172	371	301	341	366	107	248	8
Cr	< 10	22	31	17	35	16	29	25
Mn	39	55	33	53	56	20	36	20
Fe	1540	2710	2360	2600	2780	456	1632	2
Ni	11	7	7	12	15	8	9	20
Cu	21	24	63	26	34	7	8	10
Zn	20	14	19	18	14	2	10	7
Ga	4	2	2	4	2	5	4	40
Se	6	3	2	< 2	4	3	9	40
Br	7	3	5	7	4	8	10	25
Rb	18	9	20	18	11	5	7	30
Sr	17	44	44	48	18	17	33	25
Zr	15	16	18	38	56	16	47	30
W	11	15	9	21	12	21	20	40
Hg	< 5	< 4	< 4	< 4	< 4	5	3	15
Pb	26	18	24	27	21	7	68	10
Th	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	6	5	20

Был произведен также элементный анализ аэрозольных фильтровых проб, в том числе полученных с помощью трехслойных фильтров. Данные элементного анализа представлены в табл. 5, 6. От-

мечаются значительно более низкие концентрации большинства элементов, чем в декабре 1994 г., что хорошо соответствует данным фотоэлектрического счетчика. Вместе с тем следует отметить сильную

изменчивость концентраций ряда элементов, в частности S, Cl, K, Pb, Fe.

Данные, полученные с помощью трехслойных фильтров, позволяют сделать вывод о селективном распределении по размерам частиц некоторых элементов: K, Ca, Si, Fe, Zn практически полностью осадилась в первом слое; Al, Cl, Zn, S, Se, Rb имеют двухмодовую структуру; наиболее мелкодисперсные частицы содержат Th, W, Rb, Se, Cu, S; во втором фильтровом слое осадилась элементы Cr, Ni, Ga, Br, Hg, Pb, очевидно, почти не содержащиеся в гигантских частицах.

Измерения суточных ходов озона и сернистого газа показали, что наблюдаются повышенные концентрации как одного, так и другого газа, причем изменчивость содержания сернистого газа в приземном слое чрезвычайно высока. Последнее свидетельствует о близости мощного источника сернистого газа, вероятно, сильно пульсирующего во времени. Суточный ход концентрации сернистого газа не всегда отчетливо выражен, часто наблюдаются высокие концентрации в утренние и предутренние часы, особенно при наличии приземных инверсий.

Для озона характерно быстрое нарастание концентрации с восходом солнца. Максимум концентрации обычно наступает в 13–14 ч дня, а в отдельных случаях и раньше. Концентрация озона после захода солнца резко падает до нуля к 22–23 ч, а затем часто (с вероятностью ~30%) появляется вторичный слабый максимум концентрации озона порядка 10 мкг/м³ в ночное время примерно в 03–04 ч. Характерные кривые суточного хода концентраций этих газов в приземном слое представлены на рис. 6.

Таблица 6
Распределение элементов по трем слоям пакета дисперсионных фильтров (% по массе) для измерений в Университетском центре г. Колима

Элемент	19–20.05			20.05		
	I	II	III	I	II	III
Al	86	–	14	76	8	16
Si	97	3	–	91	8	1
S	57	24	19	42	18	40
Cl	43	–	57	100	–	–
K	100	–	–	100	–	–
Ca	86	8	6	89	10	1
Ti	67	27	6	71	27	2
Cr	23	63	14	40	60	–
Mn	45	55	–	76	24	–
Fe	91	6	3	89	9	2
Ni	22	73	5	31	60	9
Cu	–	41	59	36	23	41
Zn	100	–	–	86	–	14
Ga	32	18	50	33	67	–
Se	79	–	21	39	23	38
Br	58	42	–	39	44	17
Rb	47	–	53	52	–	48
Sr	49	21	30	64	25	11
Zr	29	32	39	36	32	32
W	36	34	30	22	40	38
Hg	61	39	–	–	100	–
Pb	59	41	–	14	81	33
Th	59	41	–	28	5	67

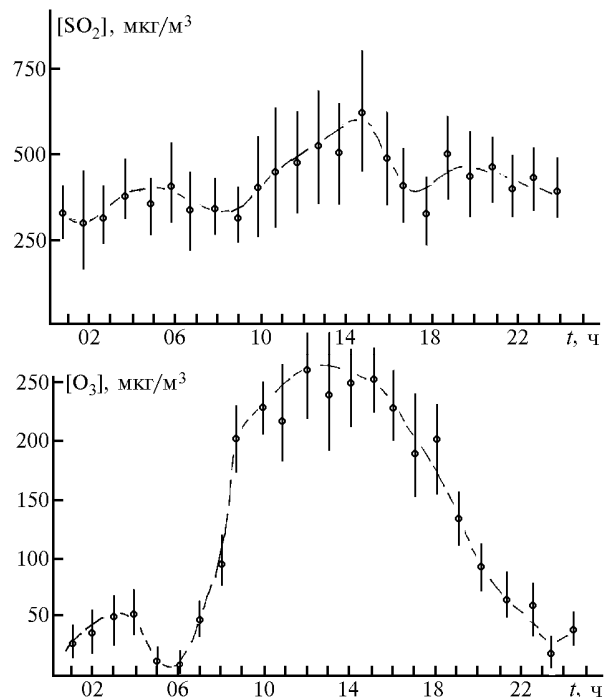


Рис. 6. Характерные кривые суточного хода концентраций сернистого газа [SO₂], мкг/м³, и озона [O₃], мкг/м³, в приземном слое атмосферы в Университетском центре для сухого периода (февраль 1995 г.)

4.2. Радиационные измерения

С начала января 1995 г. наблюдались повышенные значения остаточной оптической толщины атмосферы. Величина τ_a практически не опускалась ниже значения $\tau_a = 0,25$. В ряде случаев наблюдалась линейчатая структура τ_t и τ_a , что, очевидно, обусловлено появлением облачных структур фумарольного типа либо перистых облаков. Наибольший интерес представляют случаи резкого изменения величины и временной структуры τ_t и τ_a . Эти резкие изменения в большинстве случаев происходят в предполуденное, а иногда послеполуденное время и связаны с резкими изменениями направления ветра, что подтверждается данными автоматических метеорологических станций (табл. 7).

В качестве примера на рис. 7 представлены данные измерений радиационных потоков J_{gl} , J_{dif} и J_{div} и результаты вычислений τ_b , τ_a и q для 5 марта 1995 г. Отчетливо выявляется изменение характера поведения этих характеристик с $t = 10$ ч 01 мин. Визуально отмечалось появление облачной структуры, возникшей в результате подъема и диффузионного расплывания фумарольной струи. Данные метеорологических наблюдений подтверждают, что причина появления этой облачной структуры – эмиссия вулканического вещества.

На рис. 8 представлены данные по направлению ветра в районах Волкансито и Университетского центра за 4–5 марта. Отчетливо проявляется

картина резкого поворота направления ветра в утренние часы в обоих пунктах. В вечерние часы в районе г. Колима происходит поворот ветра к прежнему (с точностью $\pm 20^\circ$) направлению, а утром 5 марта процесс поворота ветра повторяется. В пункте Волкансито этого не происходит: днем 5 марта направление ветра в тропосфере изменилось на $70-80^\circ$. Все это вызвало разрыв фумарольной

струи на отдельные куски, в которых происходила конверсия SO_2 в серную кислоту и сульфаты с последующим укрупнением образовавшихся частиц в ночное время (см. рис. 8). Для сравнения приведем также данные оптических характеристик атмосферы 10 марта (рис. 9), где в предшествующий наблюдениям день в районе Волкансито не было направленного воздушного потока.

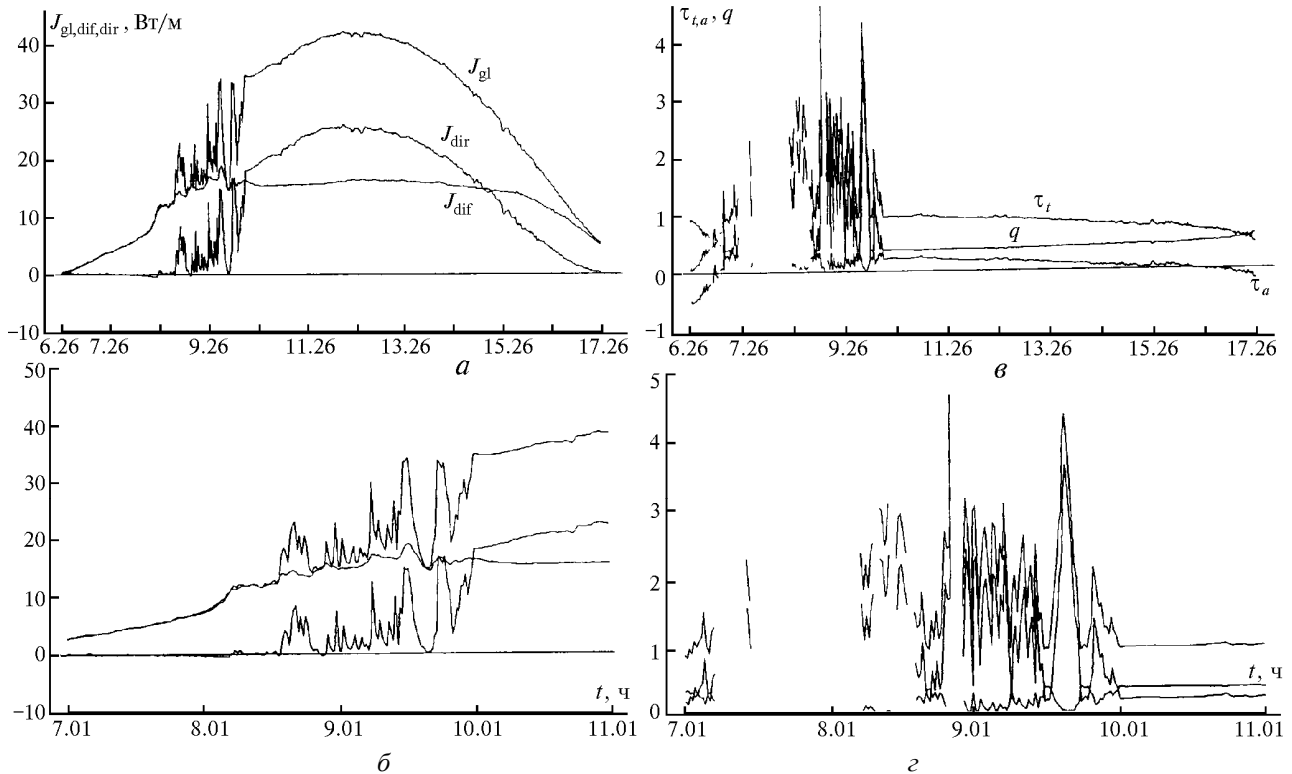


Рис. 7. Характерный дневной ход интенсивностей солнечной радиации (а, б): J_{gl} – глобальной, J_{dif} – рассеянной, J_{dir} – прямой; оптических толщин (в, г): τ_t – общей, τ_a – остаточной (аэрозольной), q – прозрачности (5 марта 1995 г). Нижние рисунки – временные развертки величин J_{gl} , J_{dif} , J_{dir} , τ_t , τ_a , q в другом масштабе

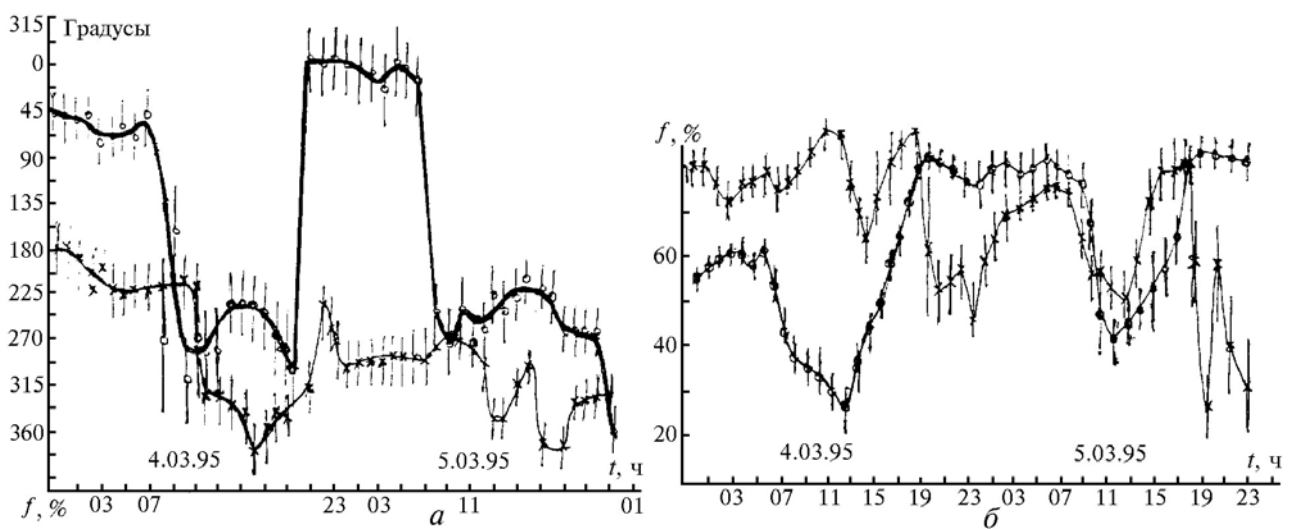


Рис. 8. Направление ветра (а) и величины относительной влажности (б) в двух пунктах: крестики – Волкансито, светлые кружки – Университетский центр за 4–5 марта 1995 г.

Отмечался слабый ветер переменного направления, что препятствовало возникновению фумарольной струи или облачной структуры другого типа (см. табл. 7). На рис. 9 наблюдается слабое увеличение общей и остаточной оптической толщины атмосферы с 10 ч 15 мин до 10 ч 55 мин в момент прохождения вулканического материала над пунктом ранчо Рефухио. Конденсационного укрупнения частиц в облаке не происходило из-за низкой относительной влажности тропосферного воздуха.

4.3. Комплексные эксперименты в мае 1995 г.

Для оценки влияния вулкана на атмосферные процессы большой интерес представляют одновременные измерения атмосферных характеристик в нескольких точках вблизи вулкана. Так как технически это было неосуществимо, то измерения были проведены последовательно в трех точках на разном удалении от кратера в сжатые сроки. Первая серия измерений проводилась в районе долины Плайон между вулканами Фуэго де Колима и Невада де Колима вблизи Волкансито с 9 по 11 мая, вторая серия в ранчо Рефухио с 17 по 20 мая и третья с 20 мая в Университетском центре атмосферных исследований.

4.3.1. Измерения в долине Плайон

Наблюдения аэрозольных характеристик, взятые аэрозольных проб с последующим элементным

анализом, измерение концентрации озона и взятие сухого осадка на полиэтиленовую подложку производились в труднодоступном районе на высоте 3200 м, вдали от населенных пунктов, непосредственно под кратером вулкана Фуэго де Колима. В пункте проведения измерений отсутствовали какие-либо источники искусственных загрязнений: на расстоянии около километра не разводилось костров и не подъезжали машины, и можно считать, что в полученных результатах отсутствует влияние деятельности человека.

Средний суточный ход аэрозольных характеристик по измерениям фотоэлектрическим счетчиком представлен в табл. 8. Два измерения распределения частиц по размерам 10 мая в 12 и 13 ч были проведены непосредственно вблизи пункта Волкансито на высоте 3400 м. Полученные функции распределения частиц по размерам dV/dr существенно отличаются от результатов измерений в более низкой точке Плайон большими значениями объемных концентраций почти во всем измеряемом диапазоне размеров частиц, кроме $d > 7$ и $d < 0,5$ мкм и особенно сильно в диапазоне $2 \geq d \geq 0,5$ мкм. В ночное время наблюдались самые низкие значения концентраций гигантских частиц. Для отдельных серий измерений первые три канала счетчика показывали отсутствие частиц измеряемых размеров ($d \geq 4$ мкм).

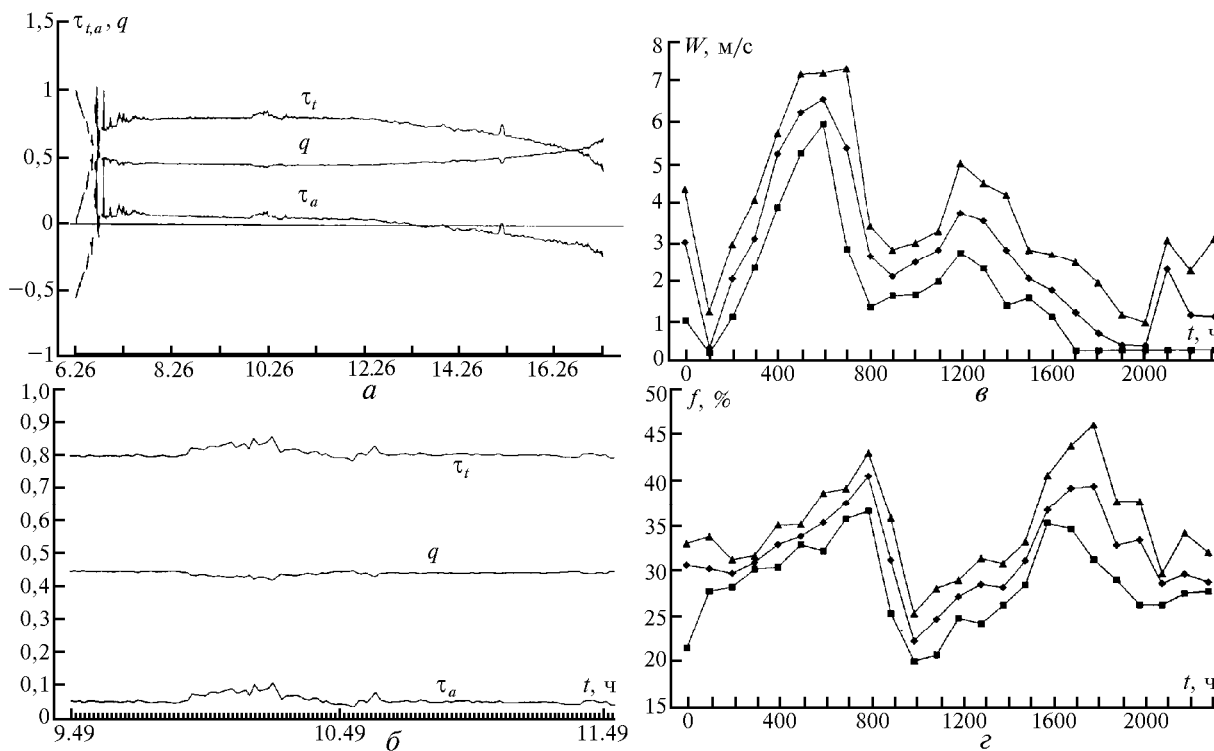


Рис. 9. Дневной ход оптических параметров атмосферы (а, б) τ_t, q (пункт – ранчо Рефухио), величин скорости ветра (в) и относительной влажности в пункте Волкансито 9 марта 1995 г.

dV/dr по измерениям 9–11 мая 1995 г. в районе Плайон

\bar{d} , мкм	Мини мум	Время, ч											
		01	03	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14
12,5	0	0,748	0,308	0,01	0	0,442	0,879	1,01	2,21	2,64	1,32	1,85	2,21
8,5	0	1,31	0,567	0,173	0	0,275	1,10	1,33	0,247	0,987	1,97	2,86	1,73
5,5	0	2,13	0,257	0,0612	0	1,68	1,39	1,42	2,49	1,39	4,11	2,17	2,49
3,0	0,101	2,66	0,770	0,101	0,129	0,330	1,47	1,98	2,64	0,572	4,03	3,30	4,64
1,75	0,016	1,38	0,498	0,048	0,0160	0,408	2,62	1,24	0,600	1,02	1,20	1,62	0,456
1,25	0,016	0,664	0,388	0,016	0,0480	0,504	2,24	1,45	1,19	1,01	1,10	1,67	0,770
0,95	0,040	2,09	0,227	0,040	0,227	1,60	5,97	2,76	2,76	4,41	0,733	1,20	2,57
0,85	0,0133	3,01	1,08	2,59	0,0133	5,28	30,3	2,69	9,09	10,2	2,31	3,45	5,44
0,75	0,0533	15,6	15,6	13,7	0,0533	12,5	46,2	17,3	19,8	8,13	9,45	2,29	12,3
0,65	10,0	39,1	26,4	37,7	10,0	44,1	99,9	41,4	84,9	146,0	37,5	15,9	25,8
0,55	29,0	52,2	43,7	44,1	41,6	64,4	86,4	79,2	77,4	48,6	43,2	39,6	57,6
0,47	0	61,8	47,6	54,8	48,0	31,0	24,0	112,0	2,0	0	46,0	52,0	42,0

\bar{d} , мкм	Время, ч										Среднее	Волкансито	
	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24		12	13
12,5	3,53	4,84	2,21	1,32	1,76	0,880	0,767	1,54	2,51	1,54	1,47	1,45	2,42
8,5	2,71	2,22	2,22	1,60	0,814	0,863	0,740	1,11	1,31	1,36	1,23	3,21	13,4
5,5	3,37	2,20	3,74	3,34	2,25	1,58	1,76	1,91	1,41	1,91	1,86	5,04	7,33
3,0	4,58	7,48	5,28	3,85	3,23	2,38	2,20	1,89	2,88	2,66	2,60	4,07	6,38
1,75	1,94	0,840	0,660	0,780	1,14	1,14	1,04	0,960	1,08	1,26	0,996	4,56	2,40
1,25	1,08	2,29	1,28	0,968	1,05	0,880	0,770	0,836	0,880	0,814	0,954	1,54	0,44
0,95	1,47	2,39	1,29	1,71	1,47	2,21	1,47	1,65	1,75	1,88	1,84	2,30	6,72
0,85	6,15	2,95	2,43	2,08	2,95	2,75	4,80	4,67	4,80	3,81	4,99	12,5	5,25
0,75	83,6	9,24	4,53	2,53	7,35	8,36	12,8	1,72	22,4	18,0	16,8	27,7	15,4
0,65	72,3	17,1	13,2	13,2	22,8	20,1	44,4	43,8	42,6	40,2	42,9	94,5	27,6
0,55	43,4	52,6	31,2	47,7	49,3	29,0	79,2	75,6	73,8	69,9	55,3	69,3	64,2
0,47	28,0	74,6	80,0	74,0	62,6	70,3	35	46,0	53,6	52,0	50,7	14,0	65,0

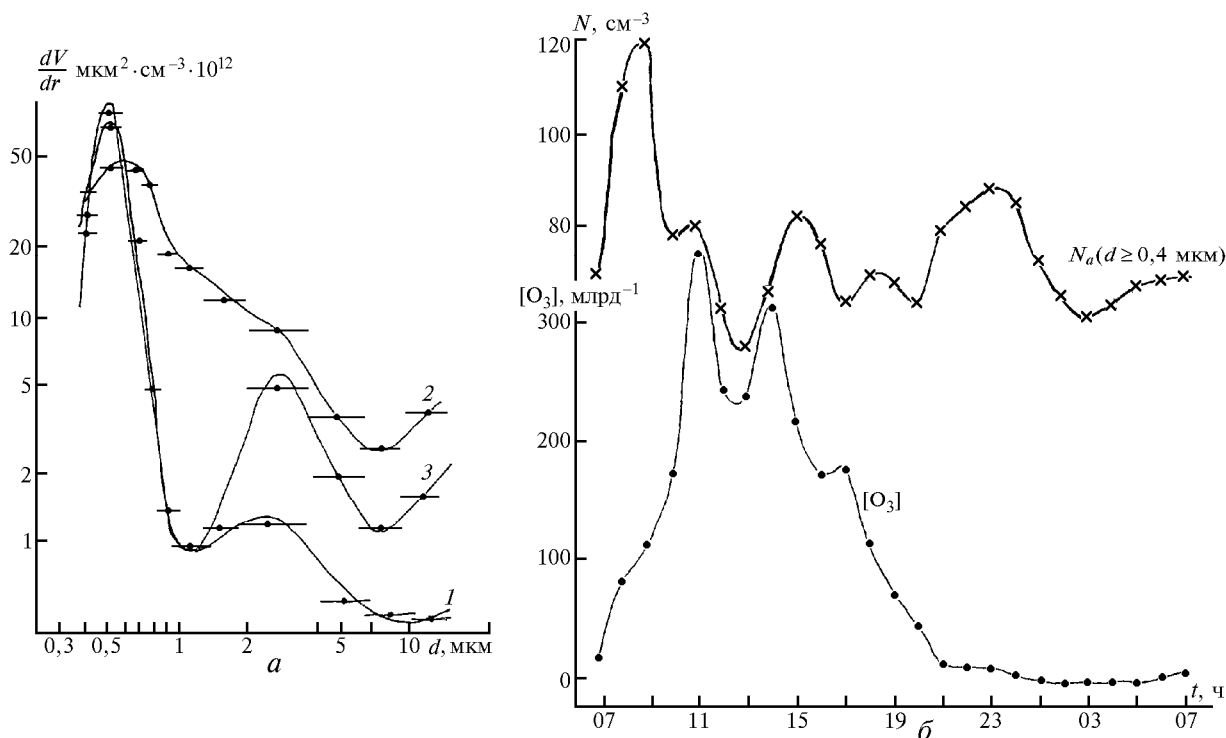


Рис. 10. Усредненные распределения объемной плотности аэрозолей dV/dr по размерам для разного времени суток: 1 – 07–09 ч, 2 – 10–12 ч, 3 – 14–15 ч, а также счетной концентрации аэрозольных частиц N_a с $d > 0,4$ мкм и концентрации озона $[O_3]$, млрд⁻¹, для периода 9–11 мая 1995 г. в пункте Плайон

На рис. 10 приведены усредненные функции объемных распределений для разного времени суток. Наблюдается закономерная эволюция спектра разме-

ров частиц в течение суток: видны три моды аэрозольных частиц, соотношение между которыми меняется в первую очередь в зависимости от скорости

приземного ветра, нагрева почвы и воздуха. В после-полуденное время вследствие перечисленных причин замыкается сильный минимум в распределении от 0,9 до 2 мкм. В ночное время исчезает максимум в распределении для $d > 7$ мкм.

Влияние изменения процессов турбулентного обмена и конвективных движений атмосферных масс отчетливо проявляется в суточном ходе концентраций аэрозолей и озона (рис. 10,б). Минимумы концентрации N_a и $[O_3]$ в 12–13 ч и в 15.30–17.00, очевидно, вызваны этими процессами, а максимум N_a в 23 ч оседанием частиц при отсутствии турбулентности. По радиационным измерениям в ранчо Рефухио в период проведения эксперимента наблюдалось заметное увеличение содержания аэрозольного вещества во всей атмосферной толщине. Остаточная аэрозольная толщина τ_a изменялась от единицы 9 мая до $1,8 \div 2$ 11 мая. Однако 9 мая, вероятно, произошел наиболее сильный выброс вулканического вещества, когда τ_a в промежутке между 14 и 15 ч возросло до 3,5–4,0.

Таблица 9

Результаты элементного анализа аэрозольных проб и сухого осадка в районе Плайон (9–11 мая 1995 г.)

Элемент	Аэрозольные пробы, нг/м ³			Пленка, нг/м ²	
	9.05	9–10.05	10–11.05		
	10.00–19.00	20.00–6.30	19.00–7.15		
Al	1660	< 800	< 700	1400+	1–400
Si	44300	3500	5900	34800	800
P	< 300	210	< 200	< 400	
S	3040	7190	11220	1400	300
Cl	550	< 200	< 100	< 200	
K	260	< 60	50	530	20
Ca	1020	150	150	2200	400
Ti	119	11	8	230	50
Cr	21	20	12	40	16
Mn	44	20	19	104	16
Fe	985	50	93	3000	300
Ni	4,3	1,2	2	14	5
Cu	< 10	< 10	6,4	8	6
Zn	< 2	12,3	< 2	67	6
Ga	< 1	< 1	< 1	4	2
Se	3,2	0,6	0,6	9	2
Br	5,8	5	4,9	6	3
Rb	3,1	3,7	5,9	10	4
Sr	20	7	4	72	5
Zr	12	11	18	22	6
Hg	–	6	3	–	–
Pb	1,1	0,3	< 5	< 40	–
Th	8	14	16	–	–

Результаты элементного анализа аэрозольных проб и сухого осадка на полиэтиленовой пленке представлены в табл. 9. Из этих данных следует, что наибольшая концентрация аэрозольного вещества, эмитированного вулканом, была 9 мая, что

совпадает с максимумом τ_a , наблюдавшимся на ранчо Рефухио в послеполуденное время. Причем аэрозольные частицы были более крупными, чем в последующие дни, и содержали в первую очередь террогенные элементы Si, Al, Ca, Fe, K. В ночь с 10 на 11 мая наблюдалось резкое возрастание концентрации частиц, содержащих серу: наиболее вероятно предположить конверсию сернистого газа в аэрозоли. Это также совпадает с наблюдениями возрастания остаточной оптической толщины τ_a 11–12 мая.

4.3.2. Наблюдения на ранчо Рефухио

Измерения аэрозольных и радиационных характеристик, а также концентрации приземного озона были проведены в течение трех суток с 17 по 19 мая. Средние значения $\Delta N_a(d_i - d_{i-1})$ 1/см³ и $[O_3]$ мкг/м³ за этот промежуток времени представлены в табл. 10. Здесь не наблюдалось столь четкой корреляции между изменениями N_a и $[O_3]$ в дневное время, как для района Плайон, что объясняется большим влиянием на эти характеристики адвективных движений воздушных масс. Можно отметить, что концентрация озона в ночное время хотя и очень сильно уменьшается, но не достигает нулевых значений (рис. 11).

Концентрация аэрозолей в районе ранчо Рефухио значительно ниже, чем в г. Колима, а вариации концентрации частиц выражены более слабо, чем в районе Плайон. Суточный ход спектра размеров частиц имеет закономерный характер, объяснимый процессами циркуляции воздушных масс, хотя нерегулярный характер эмиссии вулканического материала вносит нерегулярные изменения в вид спектра.

Аналогичная картина наблюдается и для остаточной оптической толщины атмосферы. Если для большинства случаев отмечаются почти постоянные значения τ_a в течение дня с небольшим увеличением в послеполуденное время, то для отдельных дней происходят внезапные изменения величины τ_a . В течение 17–19 мая наблюдалась высокая замутненность атмосферы. Оптическая толщина τ_a практически все время превышала 1, а 19 мая происходило резкое увеличение замутненности уже с 7 ч утра. Следует отметить, что это достаточно хорошо согласуется с данными фотоэлектрического счетчика и результатами элементного анализа аэрозольных проб (табл. 11). Для большинства элементов концентрации существенно ниже наблюдаемых в г. Колима, однако для Hg, Cr, Ni, Th, Se – обратная картина. Возможно, это связано с особенностями эмиссии этих элементов в атмосферу и эволюции частиц, содержащих эти элементы.

Суточный ход счетной концентрации частиц $\Delta N_a(d_i - d_{i-1})$, 1/л, и озона $[O_3]$, мкг/м³, на ранчо Рефухио в мае 1995 г.

Δd , мкм	Время, ч											
	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12
> 10	3	1,5	1,5	1	1,7	1,5	8	8,5	8	10	9	10
10-7	1	3,5	4,5	4,8	2	3	14	17	14	13	22	8
7-4	6	9	4	1,2	15	8	3	33,5	28	30	95	32
4-2	32	34	28	26	44	70,5	85	100	188	187	225	190
2-1,5	12	27	16	34	54	39	74	90	71	84	88	110
1,5-1,0	30	24	41	113	180	126	300	176	177	167	212	254
1,0-0,9	50	116	38	50	113	212	636	515	100	323	443	172
0,9-0,8	90	485	917	570	190	1240	1500	1000	294	220	575	567
0,8-0,7	1530	4100	7650	4600	1800	10100	10080	4360	670	1170	2000	1030
0,7-0,6	10050	10400	10200	8800	6500	10600	8000	17200	2950	3200	5480	2940
0,6-0,5	32000	28400	24200	25900	29800	22100	24500	30000	15300	22500	18400	22000
0,5-0,4	20600	19500	18700	24500	30200	18100	43000	29200	41300	44700	42400	48400
Σ	64400	63100	61800	64600	68900	62500	88200	81700	61100	72600	69600	75700
O_3	8	8	7	5	8	15	28	58	92	115	174	176
Δd , мкм	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
> 10	9	11	13	9	8	8	10	17	4	1,8	1,2	2
10-7	11	16	15	16	15	12	4	0	1	1	0,4	1
7-4	48	62	61	66	69	52	38	38	29	9,2	7,4	7
4-2	109	115	129	137	106	132	76	62	34	27	25	28
2-1,5	151	103	117	104	76	103	92	108	20	18	35	23
1,5-1,0	163	172	78	194	141	130	175	92	68	50	46	38
1,0-0,9	97	173	253	106	119	48	165	383	37	85	80	65
0,9-0,8	312	310	240	131	180	134	695	750	232	1110	2170	616
0,8-0,7	830	1050	560	777	320	556	2380	2260	1340	3700	5820	2870
0,7-0,6	2870	3750	3700	3100	3410	1255	10065	19590	14485	12700	10500	10150
0,6-0,5	21200	19400	15300	17860	16630	8220	24300	20750	17900	20300	23000	27500
0,5-0,4	35800	42700	47600	44600	40900	38650	27700	29850	39350	19800	14500	19500
Σ	61600	67800	68200	67100	62000	49300	65700	73900	73500	57900	58100	60800
O_3	194	211	200	169	131	92	44	38	22	20	18	11

Таблица 11

Элементный состав аэрозольных проб на ранчо Рефухио

Элемент	Концентрация, нг/м ³					Погрешность, %
	23.12.94 10-14	17.05.95 10.30-19	17-18.05 19-7.30	18-19.05 16-9	19.05 9-16	
Al	10200	2330	610	1120	2620	15
Si	28000	18400	6050	5300	26800	3
P	3400	310	210	340	< 400	50
S	44000	5000	2660	2190	7760	20
Cl	3970	< 200	240	110	< 200	5
K	< 200	160	110	150	205	6
Ca	610	470	170	490	610	2
Ti	36	44	44	63	161	8
Cr	34	10	11	24	30	25
Mn	12	25	6	7	53	20
Fe	300	316	108	124	113	2
Ni	20	7,6	3,2	2,5	9	20
Cu	86	15,6	< 9	< 6	< 20	10
Zn	24	4,1	1,1	1,3	< 4	7
Ga	4	3	3	2	2	40
Se	10	1,4	2,1	4,6	4,6	40
Br	< 6	2,1	1,2	1,2	4,6	25
Rb	17	8	6,6	6,6	9,4	30
Sr	9	12	17	11	22	25
Zr	17	18	17	13	20	30
W	29	13	12	9	18	40
Hg	24	6	6	6	10	15
Pb	34	18	19	35	21	10
Th	< 5	9	12	7	22	20

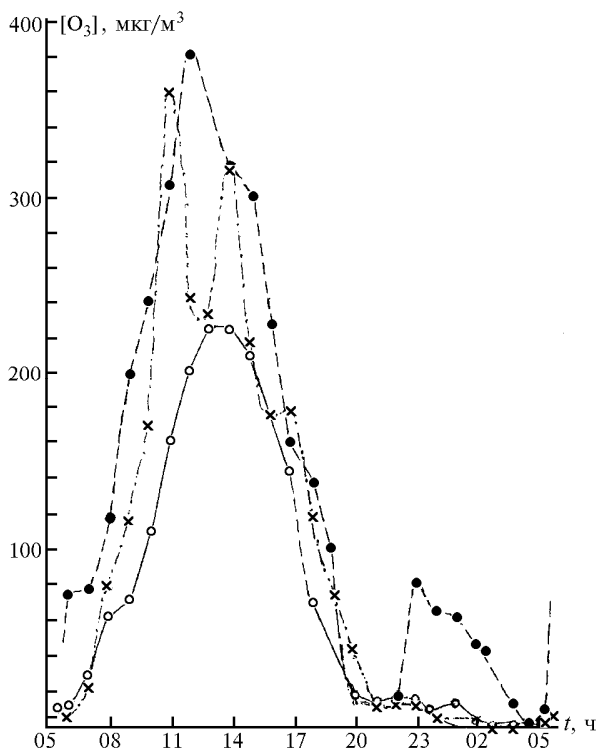


Рис. 11. Усредненный суточный ход концентраций приземного озона в мае 1995 г. в трех пунктах: темные точки, пунктир – Университетский центр; светлые точки, сплошная кривая – ранчо Рефухио; крестики, штрих-пунктир – Плайон

4.3.3. Измерения в Университетском центре исследований атмосферы

Наблюдения метеорологических атмосферных характеристик в Университетском центре атмосферных исследований систематически ведутся с помощью автоматической метеорологической станции с конца 1993 г. Аэрозольные измерения начаты в декабре 1994 г., а систематические измерения озона и сернистого газа в мае 1995 г. Измерения этих характеристик были проведены непосредственно после измерений на ранчо Рефухио с 19 по 21 мая и затем в июне.

Следует отметить, что в течение мая не произошло существенных изменений метеорологических условий и усредненные данные во всех трех наблюдениях можно считать достаточно репрезентативными для этого периода, характеризующегося сухой солнечной погодой, отсутствием мощных упорядоченных воздушных движений в приземном слое атмосферы и тропосферы. Для вулкана Фуэго де Колима наблюдалась слабая активность эмиссии аэрозолей и газов, меньшая, чем в декабре, как минимум на порядок. В то же время из-за отсутствия мощной облачности и выпадения осадков происходило накопление аэрозолей в атмосфере. Данные по концентрации и дисперсности аэрозольных частиц, представленные в табл. 4, и элементному составу (см. табл. 5, 6) можно считать представительными не только как усредненные за период апрель–июнь, но и как характерные для периода проведения эксперимента во всех трех пунктах.

V. Заключение

Проведенный цикл измерений ряда параметров атмосферы в окрестности вулкана Фуэго де Колима в сухой сезон года свидетельствует о существенном влиянии вулкана и эмиссии газов и аэрозолей на эти параметры, хотя и наблюдалась весьма устойчивая картина общего состояния нижних слоев атмосферы.

Существует отчетливо выраженный суточный ход большинства метеопараметров, определяющийся устойчивой циркуляцией воздушных масс в окрестности вулкана.

В нижних слоях атмосферы накапливаются атмосферные загрязнения, в первую очередь сернистый газ и аэрозоли.

Очищение тропосферы в сухой сезон было довольно слабым. В атмосфере инструментально наблюдались слабо размывающиеся струи ослабляющей коротковолновую солнечную радиацию субстанции.

Актинометрические измерения свидетельствуют о сильных вариациях оптической толщины атмосферы в УФ-области спектра от $\tau_a < 0,1$ до $\tau_a \cong 1,5-5,0$.

В приземном слое наблюдались очень высокие значения концентраций озона, сернистого газа и аэрозолей.

Все перечисленные компоненты имели отчетливо выраженный суточный ход содержания, определяющийся как интенсивностью эмиссии этих компонентов вулкана Фуэго де Колима, так и местонахождением пункта наблюдения.

Аэрозольные измерения позволили выявить три максимума концентрации аэрозолей в течение суток: утренний с 06 до 08 ч для частиц с $d \geq 0,7$ мкм, дневной с 11 до 15 ч для частиц с $d \geq 1,0$ мкм, вечерний с 21 до 23 ч для диапазонов размером $10 > d > 2,0$ мкм и $d < 0,7$ мкм.

Элементный анализ проб показал, что существует селективное распределение элементов по размерам частиц и, видимо, есть несколько источников аэрозольного вещества, причем, очевидно, вулкан Фуэго де Колима является главным источником аэрозолей в приземном слое, намного превышая по интенсивности поверхностное пыление почв и транспортные выбросы.

Результаты многочисленных аэрозольных измерений позволяют утверждать, что аэрозоли вулканического происхождения имеют определенные особенности по спектру размеров [11], в частности заметные превышения концентраций частиц по сравнению с модельными спектрами для глобальных фоновых, континентальных и почвенных аэрозолей в диапазонах размеров частиц $0,7 \leq d \leq 1,0$ мкм и $2,0 \leq d \leq 4,0$ мкм.

В период после извержения вулкана Попocateпетль продукты его эмиссии стали определяющими в тропосфере над Мексикой даже в ее восточной части, об этом, в частности, свидетельствует сходство элементного состава и дисперсности аэрозольных частиц в районах вулканов Фуэго де Колима и Попocateпетль [12].

1. *Аэрозоль и климат* / Под ред. К.Я. Кондратьева. Л.: Гидрометеоздат, 1991. 541 с.
2. *Вулканы, стратосферный аэрозоль и климат Земли* / Под ред. С.С. Хмелевцова. Л.: Гидрометеоздат, 1986. 256 с.
3. Ivlev L.S., Galindo J., Kudrjashov V.I. // Volcan Popocatepetl estudios reabilizados durante la crisis de 1994-1995. Con. Cient. Asesor CENARDED-UNAM. 1995. P. 257-284.
4. Pollack J.B., Ackerman T.P. // Geophys. Res. Lett. 1983. V. 10. No 11. P. 1057-1060.
5. Бурлаков В.Д., Ельников Ф.В., Зуев В.В. и др. // Оптика атмосферы и океана. 1993. Т. 6. № 10. С. 1224-1233.
6. *Руководство гидрометеорологическим станциям по актинометрическим наблюдениям*. Л.: Гидрометеоздат, 1971. 223 с.
7. Евневич Т.В., Савинова Л.Н. // Метеорология и гидрология. 1989. С. 106-109.
8. Ивлев Л.С., Жуков В.М., Кудряшов В.И., Михайлов Е.Ф. // Оптика атмосферы и океана. 1993. Т. 6. № 10. С. 1249-1267.
9. Кудряшов В.И., Гундорина С.Ф., Фронтьева М.В. Химический состав фильтров, используемых для отбора проб атмосферного воздуха. Дубна, 1991. 20 с. (Сообщение/ОИЯИ, № 18-91-443).
10. *Аналитические приборы экологического назначения: Каталог* / Научн. ред В.П. Челибанов. СПб., 1994. 78 с.
11. Ивлев Л.С. // Аэрозоли Сибири. (Тезисы докл.). Томск: Изд. ИОА СО РАН, 1995. С. 20.
12. Ivlev L.S., Vargas A.O., Chavez E.A. et al. // Proceed. Geophys. Congress (Mexico, 19 oct., 1995, Vallarta). 1995. P. 23-25.

L.S. Ivlev, V.I. Kudryashov, M.E. Arias, A.O. Vargas. **The Complex Investigation of Optical-Meteorological Parameters of Atmosphere near Volcano Colima (Mexico). Part I. The Dry Season.**

We presented the results of complex experiment for the determination of optical-meteorological parameters of the lower atmospheric layers before, during and after the eruption of volcanos Fuego de Colima and Popocatepetl (Mexico) in dry season of 1994–95. The aerosol optical thicknesses of the atmosphere, the transparency coefficients, the day dependences of ozone concentration and aerosol particles concentration (for particle size from 0.4 to 10 μm) were measured. The element composition of aerosols and time changes for the different observation points were determined taking into consideration the meteorological conditions.