

ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ АТМОСФЕРЫ И ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

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 2. ВЛАЖНЫЙ СЕЗОН

Выполнен анализ результатов натурных измерений интенсивности падающей ультрафиолетовой радиации, общей и аэрозольной оптической толщины атмосферы, содержания озона, сернистого газа и аэрозолей в приземном слое в течение влажного периода 1995 г. (июнь – октябрь). Исследовано вымывание аэрозолей тропическими дождями и их восстановление. Проведен элементный анализ проб аэрозолей и дождевых осадков. Проанализировано усиление эмиссии вулканического материала в конце августа – начале сентября.

I. Введение

Влияние вулкана и вулканических извержений на физико-химические процессы в нижней атмосфере во влажный период года, очевидно, должно проявляться в первую очередь в характере осадкообразования и в химическом составе выпавших осадков. Продукты вулканической деятельности в условиях повышенной влажности должны способствовать образованию дополнительных ядер конденсации и микрокапель: газообразные продукты типа сернистого газа и соляной кислоты будут адсорбироваться и абсорбироваться на облачных каплях и участвовать в реакциях внутри этих капель. Все это будет сказываться на изменении микроструктуры облачных образований и их стабильности. Можно предполагать, что это влияние аналогично воздействию промышленных центров на фазовые переходы воды и процессы осадкообразования в нижних слоях атмосферы [1, 2].

Наиболее интересным процессом с точки зрения климатологии в этих условиях является вымывание продуктов вулканической эмиссии тропическими дождями, так как в результате этого вымывания резко уменьшается концентрация аэрозольных частиц и сернистого газа в тропосфере, заметно меняются оптические свойства тропосферы, в частности, при отсутствии облачности уменьшаются поглощение и рассеяние радиации в ультрафиолетовой и видимой областях спектра, увеличивается прозрачность атмосферы.

Исследование процессов вымывания в окрестности вулкана позволяет более определенно оценить химический состав и интенсивность эмиссии аэрозольных частиц, непосредственно генерируемых вулканом и подстилающей поверхностью в тропосферу, а также интенсивность конверсии сернистого газа в серную кислоту и сульфаты. Обильное выпадение осадков, очевидно, может сказываться и на процессах в верхних слоях земной коры, в частности на интенсивности эмиссии вулканического материала,

а также на возможных подвижках поверхностного слоя земной коры.

II. Краткая характеристика метеоусловий во влажный период года

Влажный сезон в районе вулкана Фуэго де Колима начинается обычно в последней декаде мая в связи с приходом влажных воздушных масс с экваториальной и южной частей Тихого океана. Вторжение более холодного и влажного океанического воздуха вызывает вначале резкие локальные порывы ветра в приземном слое, сильное пыление высохшей почвы и заметное уменьшение прозрачности атмосферы. Первые ливневые дожди характеризуются высокой интенсивностью и кратковременностью выпадения осадков, большими размерами выпадающих капель. Визуальные наблюдения свидетельствуют о примерном диапазоне размеров капель в области 3–7 мм. После выпадения осадков, чаще в послеполуденное – вечернее и даже ночное время, на следующие сутки в утренне-дневной период устанавливается безоблачная погода, причем температура воздуха в приземном слое по сравнению с предшествующими днями существенно не понижается (в районе Центра атмосферных исследований температура в полдень $t = 30\text{--}35\text{ }^{\circ}\text{C}$).

В приземном слое наблюдается безветрие или слабый ветер с направлением $225^{\circ} \pm 40^{\circ}$. Суточные вариации направления ветра в приземном слое устанавливаются в конце июня.

Относительная влажность воздуха в дневное время (до 17 ч) в период до июля обычно не превышает 70 %, а в вечернее время наблюдается заметный рост относительной влажности до 85–90 %, более быстрый в низинах и ближе к побережью и несколько замедленный у подошвы вулкана. Затем над вершиной вулкана и вблизи тихоокеанского побережья начинают интенсивно развиваться кучевые облака, которые к 20–21 ч полностью закрывают небосвод.

Интенсивность и время выпадения осадков изменяются в зависимости от предшествующего цикла: чем более интенсивным и длительным было предшествующее выпадение осадков, тем позднее начинался последующий дождь. В отдельных случаях этот период длился до 3 дней. В середине июля наблюдалась наибольшая частота выпадения осадков: дожди шли ежедневно. Начиная с третьей декады июля характер выпадения осадков стал меняться. При заметном понижении температуры воздуха в приземном слое, особенно в ночное время (до +18 °С), резко упала интенсивность образования кучевой облачности, уменьшились интенсивность выпадения осадков и их частота. Средний размер капель заметно уменьшился. При некоторых дождях диаметр капель был примерно 1,5–3 мм. С конца августа дожди наблюдались сериями: несколько дней с осадками с перерывом до следующей серии в 3–5 сут. Снова началось постепенное нагревание воздуха до 30 °С и более (на окраине города) в дневное время. В ночное время температура воздуха в городе не опускалась ниже 22 °С. На ранчо Рефухио и еще ближе к подножию вулкана температура воздуха в ночное время была значительно ниже (до +15 °С). В конце августа визуально наблюдалось усиление активности вулкана. В отдельные дни регистрировались слабые кратковременные толчки (до 2–3 баллов по шкале Рихтера).

III. Наблюдения осадков

Осадки собирались на наклонную поверхность площадью 2500 см² со стоком в стеклянную бутылку емкостью 20 л в двух пунктах: на ранчо Рефухио и в Университетском центре атмосферных исследований, по методике, близкой к описанной в [3]. Основной массив данных был получен по пробам, взятым на ранчо Рефухио. Смена емкости производилась еженедельно по субботам примерно в 10–11 ч утра.

В первых сериях измерений в пробы попадало большое количество крупных твердых частиц (обломки растений, куски почвы, насекомые). Эти предметы удалялись с поверхности бумажного фильтра, через который пропусклась вся проба дождевой воды. Часть воды неделю отстаивалась, и отстоявшуюся воду без крупнодисперсной взвеси также прогоняли через бумажный фильтр. Бумажные фильтры взвешивались до и после экспонирования и высушивались. Разность между результатами взвешивания позволяла определять концентрацию нерастворимого вещества, захваченного падающими каплями, а также осадившегося на приемную площадку под действием силы тяжести. Эта доля, в основном, существенно меньше захваченного каплями вещества.

Часть воды после пропускания через бумажный фильтр выпаривалась в фарфоровых чашках для оценки растворимого в дождевой воде вещества. Основная доля этого компонента – серная кислота. Эта достаточно простая и надежная методика позволила оценить

количество взвешенного и вымываемого вещества из тропосферы (из облачного и подоблачного слоя).

Временной ход вымываемости взвешенного в тропосфере вещества (общая концентрация вещества в воде и концентрации растворимого и нерастворимого материала) представлен на рис. 1.

Данные по концентрациям отдельных элементов в пробах дождевой воды (общая нерастворимая взвесь, взвесь после недельного отстоя воды, вещество в пробирке после длительного хранения пробы дождевой воды) представлены в табл. 1 и 2. Соответствие между всеми данными временной зависимости вполне удовлетворительное. Отчетливо проявляются высокая степень вымываемости растворимых веществ в первые недели влажного сезона и довольно стабильная вымываемость нерастворимых веществ. В августе наблюдается определенное повышение количества вымываемого из тропосферы вещества, что может объясниться только увеличением эмиссии диспергированного в тропосферу материала.

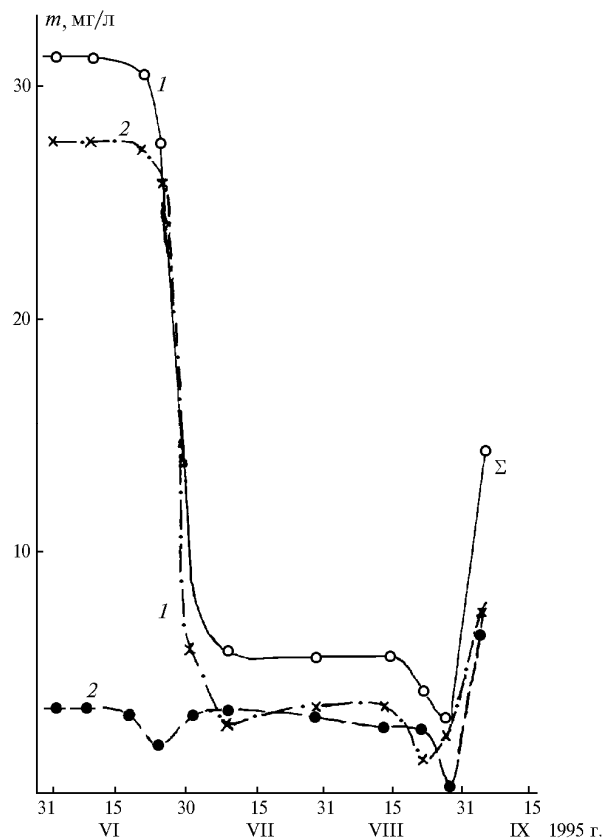


Рис. 1. Временной ход вымываемости аэрозолей из тропосферы (пробы дождевой воды): 1 – общее содержание взвешенных веществ в воде; 2 – растворимое вещество; 3 – нерастворимое вещество

В первые недели дождей количество растворимого вещества в осадках (в основном серной кислоты и сульфатов) достигло концентрации 400 мг/л. Это примерно соответствует концентрации в воздухе 400 мкг/м³ при влажности 1 г/м³. По

пробам, взятым на ранчо Рефухио, эти величины значительно меньше: 27 мг/л и 27 мкг/м³ соответственно. Причем такие значения количества захваченного дождевой водой растворимого вещества наблюдались для

осадков, выпавших даже через месяц после начала периода дождей. Очевидно, возможно некоторое завышение оценок вымываемости этих веществ за счет окисления сернистого газа в облачных каплях.

Таблица 1

Концентрации химических элементов в пробах дождевой воды, пропущенной через фильтры (Мексика, лето – 95), мкг/л

Номер пробы	Дата отбора	Объем пробы, мл	Концентрация C + ΔC (нижняя цифра)						
			Al	Si	P	S	Cl	K	Ca
1	27.05.–17.06	3,5	2000	23800	<5000	26900	2820	920	30600
			1100	4400		2400	120	100	700
2	17.06–24.06	3,5	5500	17700	<4000	11700	1840	790	32000
			1300	1700		1700	200	230	6000
3	24.06–1.07	23	2500	<1000	<2000	340200	–	130	37500
			700			1600		60	500
4	1.07–8.07	21,5	360	30900	<800	13300	730	130	5120
			220	800		500	40	40	80
5	8.07–15.07	23	630	31700	<900	14500	1260	270	8480
			260	800		500	40	40	90
6	15.07–22.07	22	810	7900	<1000	31200	1020	140	12370
			370	600		600	40	50	110
7	22.07–29.07	23	780	20500	<700	12900	740	320	5310
			260	700		400	40	50	80
8	29.07–5.08	22,5	500	17400	<1000	18200	9320	510	13070
			380	800		600	80	50	110

Окончание табл. 1

Номер пробы	Концентрация C + ΔC (нижняя цифра)														
	Ti	Cr	Mn	Fe	Ni	Cu	Zn	Ga	Se	Br	Rb	Sr	Y	Zr	Pb
1	<70	43	40	89	25	<10	730	<8	22	20	23	63	–	38	<10
		15	9	17	7		130		5	11	6	9		19	
2	<100	51	<20	90	19	<10	600	<8	7	21	29	49	–	<30	<20
		17		60	4		80		4	10	10	20			
3	<20	11	24	56	6	<3	3230	–	3	3	4	35	46	<5	17
		3	5	3	1		210		1	2	2	2	5		2
4	<20	<5	8	<6	5	<3	28	<1	4	4	<6	18	20	<6	3
			2		1		2		1	1		3	3		2
5	<20	<5	9	4	5	2	71	<1	2	2	12	13	11	<6	<3
			2	3	1	1	2		1	1	2	3	3		
6	<20	<6	6	<5	2	<3	25	<2	<2	2	6	13	6	<6	<3
			2		1		2		1	1	2	3	3		
7	<20	7	7	6	4	<3	12	<2	<2	3	3	10	9	4	2
		3	2	3	1		2		1	2	2	2	3	3	2
8	<20	8	8	16	6	4	217	<2	<2	18	<3	23	12	<5	<3
		2	2	3	1	2	3		2	2	2	2	2		

Таблица 2

Концентрации химических элементов в пробах дождевой воды, взятых в Мексике в мае – октябре 1995 г. (данные анализа осадков на фильтрах)

Номер	Дата отбора	Объем пробы, л	Масса осадка, мг/л	Фракция	Концентрация элементов в воде, мкг/л							
					Al	Si	P	S	Cl	K	Ca	Ti
1	г. Колима 27.05 – 17.06	20		осадок	214	5600	<30	164	<1	72,5	140	42,6
				взвесь	9	11	8	<10	0,9	1,1	1,8	0,8
2	17.06 – 24.06	20	19	осадок	26	253	11	21	3,7	4,4	6,6	1,2
				взвесь	31	46	17	<10	2,5	5,8	3,5	<0,8
3	24.06 – 1.07	20	1	осадок	26	423	<10	11	2,0	5,5	9,8	1,5
				взвесь	76	700	24	31	13,5	17	18,8	3,6
4	1.07 – 8.07	5,5	2	осадок	29	125	<10	<10	3,2	5,4	1,3	1,0
				взвесь	50	1060	<10	27	<1	10,9	38	8,0
5	8.07 – 15.07	19	3,3	осадок	29	<20	<10	<10	1,3	1,4	2,3	<0,8
				взвесь	390	730	120	410	43	55	290	13
6	15.07 – 22.07	1,15	18	осадок	22	114	9	24	<1	2,1	40,5	4,2
				взвесь	18	14	9	11	1,6	2,4	0,7	0,6
7	22.07 – 29.07	20,28		осадок	102	1451	<10	18	2,0	19,4	23,7	9,2
				взвесь	350	<100	120	<100	<20	19	269	<10
8	29.07 – 5.08	17,61		осадок	310	1820	<100	<200	82	34	360	17
				взвесь	240	5240	<70	340	<8	42	347	48
9	3.09	1,17	13,7	осадок	1010	10880	<100	<100	<10	132	2278	190
				взвесь	160	6040	<70	183	<4	78	395	57
10	5.09	1,18	19,3	осадок								
				взвесь								
11	18.08 – 22.09	2,77	31,6	осадок								
				взвесь								
12	25.09	1,45	64,4	осадок								
				взвесь								
13	2.10 – 3.10	4,79	19,1	осадок								
				взвесь								

Номер пробы	Концентрация элементов в воде, мкг/л												
	Cr	Mn	Fe	Ni	Cu	Zn	Ga	Se	Br	Rb	Sr	Zr	Pb
1	1,1	5,8	353,4	0,47	0,86	2,41	0,11	0,12	0,28	0,52	4,83	1,26	1,52
	1,0	0,8	2,3	0,71	0,22	0,08	0,21	0,32	0,25	0,16	<0,2	<0,2	0,61
2	0,3	<0,1	14,1	0,08	<0,08	2,24	0,05	0,11	0,06	0,09	0,26	0,27	0,23
	0,3	<0,2	2,0	0,26	<0,1	0,79	0,12	0,06	0,14	0,23	0,35	0,68	<0,1
3	0,2	0,3	16,6	0,16	0,08	1,02	0,07	0,08	0,10	0,28	<0,1	0,48	0,52
	1,6	0,5	38,4	0,83	0,89	0,91	0,41	0,48	1,04	1,30	0,39	<0,7	1,72
4	0,3	0,7	4,8	0,39	0,15	0,33	0,15	0,25	0,16	0,26	0,45	0,23	0,8
	0,3	1,1	58,6	0,09	0,21	0,72	0,12	0,14	0,08	0,59	0,50	0,38	0,43
5	0,4	0,2	0,7	0,13	0,22	0,38	0,19	0,14	0,22	0,14	0,27	<0,2	0,15
	3,9	2,9	56	4,4	1,7	3,1	1,8	2,4	4,6	3,2	5,1	<3	3,6
7	0,7	1,4	33,4	0,58	1,01	1,70	<0,1	0,30	0,15	0,09	0,17	0,26	1,30
	0,2	<0,1	0,7	0,10	0,11	0,36	0,05	0,07	<0,08	0,36	0,31	1,64	0,14
8	0,4	0,8	67,6	0,27	0,08	0,81	0,09	0,11	0,27	0,24	0,50	0,17	0,66
	<4	2,5	<4	1,0	<2	0,9	<1	<1	1,2	<2	5,5	<3	<2
10	6,0	4,0	47,5	<2	2,8	5,3	2,9	3,5	<2	3,2	2,9	<3	10,1
	3,8	1,9	326,9	0,72	0,95	5,14	1,33	0,65	1,5	1,7	7,8	<1	3,2
12	16,5	20,1	1227	4,7	5,6	12,0	4,5	3,4	<2	2,2	24,1	<3	7,7
	1,4	5,2	414,4	0,42	0,88	1,40	0,62	0,99	1,07	1,07	6,4	1,3	1,4

Нерастворимое аэрозольное вещество наиболее интенсивно вымывалось в первые две недели сезона дождей. Концентрация вымываемого за первую неделю твердого вещества в тропосфере достигала 100 мкг/м^3 , а для самых крупных частиц ($d > 20 \text{ мкм}$) даже 500 мкг/м^3 при условии, что геометрическая толщина вымываемого слоя 2 км. Через две недели после начала дождей количество нерастворимого вещества, вымываемого осадками, резко уменьшилось на порядок и более и затем оставалось практически постоянным ($\approx 3,5 \text{ мг/л}$) до конца августа.

Из данных элементного рентгенофлуоресцентного анализа следует, что бумажный фильтр задерживал лишь самую грубодисперсную нерастворимую фракцию аэрозольных частиц. Основная доля аэрозольного вещества оставалась в воде. Вымывание мелкодисперсных частиц, содержащих Al, Si, Ca, Zn, Mn, Cr, Fe, заметно уменьшилось лишь в июле, т.е. уменьшилась их концентрация в воздухе. Практически только железо и в какой-то степени свинец эффективно задерживались бумажными фильтрами, т.е. находились в основном в грубодисперсной фракции нерастворимых аэрозольных частиц. Следует отметить резкое возрастание их концентрации в сентябрьских пробах осадков.

Очень низки значения концентраций S, Cl, Se, Br, по данным анализа бумажных фильтров, практически для всего периода измерений, тогда как из элементного анализа непосредственно проб дождевой воды концентрация серы, например, на два порядка выше. Причем наблюдаются неоднократные резкие возрастания концентрации серы, вероятно, вызванные спорадическими выбросами серы вулканом Фуэго де Колима.

Временная зависимость $C(t)$ концентрации серы в водных пробах существенно отлична от зависимостей $C(t)$ для других элементов. При этом уменьшение концентрации серы в пробах сопровождается увеличением концентрации кремния. Следует также отметить очень высокие концентрации кальция в пробах, сравнимые с концентрациями серы и крем-

ния. Это не совсем соответствует общепринятым представлениям, что кальций содержится в основном в наиболее грубодисперсных частицах почвенного происхождения [4, 5].

IV. Аэрозольные измерения

Измерения счетной концентрации и дисперсности частиц производились фотоэлектрическим счетчиком АЗ-5М несколькими сериями в мае – июне, июле, августе – сентябре в среднем по 10 сут на крыше здания Центра атмосферных исследований под брезентовым тентом на высоте 120 см от уровня поверхности крыши и около 5 м от поверхности земли.

Неоднократно измерения проводились во время дождя, и в зависимости от характера осадков наблюдались различные типы вымывания аэрозольных частиц в приземном слое. Вымывание носило селективный характер, сходный с отмеченным в [6]. Наиболее эффективно вымывались частицы размерами $d \geq 4 \text{ мкм}$. Однако, что было неожиданно, восстановление их концентрации до определенной величины также происходило очень быстро. Единственной причиной этого могла быть активная деятельность вулкана Колима. Возможно, часть аэрозольного вулканического вещества попадала в атмосферу выше уровня облаков и при их отсутствии диффундировала, а также оседала в нижние слои.

Разнообразие условий вымывания и восстановления спектра размеров аэрозольных частиц не позволяет сделать по экспериментальным данным определенные выводы об эффективности вымывания частиц разных размеров. Поэтому были просто усреднены данные по спектрам размеров частиц для трех серий измерений: 1 – май – июнь (192 спектра), 2 – июль – август (264 спектра), 3 – август – сентябрь (216 спектров). Из этого анализа были исключены данные по явно аномальным спектрам размеров частиц.

В табл. 3 и на рис. 2 приведены данные по объемному распределению частиц по размерам $\Delta V/\Delta r$, $\text{мкм}^2/\text{м}^3$. Неожиданным выглядит возрастание кон-

центрации частиц в области $0,6 \leq d \leq 1,0$ мкм для третьей серии измерений (август – сентябрь), что определенно подтверждает увеличение интенсивности эмиссии вулканического материала в августе – сентябре. С 28 августа фотоэлектрическим счетчиком регистрировались резкие увеличения счетной концентрации

аэрозольных частиц в диапазоне размеров $0,6 \leq d \leq 7,0$ мкм. Эти флуктуации концентрации частиц продолжались по несколько часов, после чего распределения частиц по размерам возвращались к распределениям, близким к исходным.

Таблица 3

Суточный ход объемной плотности распределения аэрозольных частиц по размерам $\Delta V/\Delta r$, мкм²/м³, в приземном слое для трех серий измерений (г. Колима, Центр атмосферных исследований)

d, мкм	Время, ч											
	01–02	03–04	05–06	07–08	09–10	11–12	13–14	15–16	17–18	19–20	21–22	23–24
10–15	6,24	5,10	8,03	11,0	9,68	10,4	11,9	9,57	9,13	4,62	3,99	4,72
	2,64	1,54	1,19	2,20	2,33	1,86	1,46	1,92	1,81	1,74	2,82	1,76
	0,22	0,044	0,15	0,53	0,92	1,34	0,93	0,77	0,64	0,55	0,46	0,37
7–10	4,60	2,68	3,64	5,16	6,84	7,15	7,09	8,52	6,27	9,14	22,0	16,9
	0,88	0,85	0,83	1,40	1,74	1,24	1,09	1,29	1,20	1,76	3,20	2,84
	0,28	0,15	0,22	0,44	0,74	0,69	0,90	0,95	0,78	0,37	0,56	0,47
4–7	4,10	3,56	5,17	8,16	7,76	9,84	10,1	8,34	5,43	6,72	11,6	10,1
	2,02	1,84	1,77	4,08	2,53	2,18	1,73	1,98	1,72	1,45	5,03	2,72
	0,65	0,31	0,31	0,57	1,13	1,05	0,94	0,91	0,76	0,82	0,92	0,84
2–4	4,10	3,54	28,4	40,4	7,47	6,48	6,30	7,26	5,42	6,04	5,76	4,63
	2,19	2,10	1,38	2,68	3,03	2,86	2,45	2,20	2,10	2,24	2,97	3,19
	0,72	0,60	0,58	0,85	1,84	1,51	1,79	1,36	0,91	1,03	0,90	0,81
1,5–2	2,01	1,83	1,05	2,08	2,96	3,32	9,88	5,62	4,72	2,88	5,19	5,46
	0,54	0,32	0,56	1,45	0,86	0,60	0,79	0,66	0,71	0,73	1,14	0,84
	0,34	0,23	0,22	0,47	1,07	0,65	0,81	0,58	0,49	0,47	0,43	0,42
1,0–1,5	0,86	0,70	0,55	0,68	0,98	8,82	24,7	7,03	2,48	1,86	0,83	0,56
	0,40	0,40	0,42	0,57	0,46	0,49	0,43	0,41	0,34	0,35	0,93	0,39
	0,92	0,77	0,66	0,29	0,35	0,59	3,32	2,66	0,98	0,93	1,25	1,10
0,9–1,0	1,83	2,19	3,78	3,74	6,04	46,2	164	129	19,0	10,6	16,6	9,97
	0,64	0,28	0,32	0,70	0,80	1,65	1,82	1,28	1,29	1,33	1,01	2,07
	7,18	9,66	10,8	6,58	1,38	3,68	6,62	9,20	9,35	1,74	4,14	5,48
0,8–0,9	3,35	3,60	9,79	5,95	10,7	45,8	141	106	30,4	10,4	2,78	37,9
	0,83	0,70	1,10	0,99	7,96	10,2	13,7	5,18	1,60	1,47	1,74	4,12
	11,2	12,5	13,7	13,6	12,8	33,8	91,6	60,8	26,2	2,58	7,68	9,90
0,7–0,8	6,66	9,12	17,0	38,6	10,7	45,8	157	170	67,0	0,48	1,96	36,7
	1,98	2,11	2,24	2,53	28,6	56,2	45,0	26,1	39,0	28,8	49,8	5,55
	84,9	70,4	59,4	40,0	49,3	74,0	87,4	88,6	90,0	95,9	112	97,7
0,6–0,7	18,6	40,6	37,6	55,0	43,6	59,0	109	62,8	30,4	6,18	5,94	37,8
	5,12	7,89	24,1	18,0	61,8	52,8	57,0	65,2	55,4	53,4	44,6	19,5
	72,3	70,8	72,0	66,8	74,4	66,4	55,0	57,6	62,2	67,2	75,3	73,8
0,5–0,6	51,2	39,9	32,9	38,2	53,5	63,6	27,6	11,8	12,0	21,2	27,6	37,8
	23,2	34,2	47,4	73,4	49,0	41,8	49,4	58,5	46,5	45,3	73,8	67,6
	37,8	43,0	45,2	52,1	27,4	25,8	24,4	43,2	54,2	31,5	30,2	33,5
0,4–0,5	50,2	37,0	27,5	19,6	62,6	58,5	0,05	12,9	62,0	92,6	83,0	56,2
	78,0	78,4	79,0	60,2	17,4	23,9	27,8	24,2	32,7	47,8	33,7	59,0
	7,70	8,75	10,4	11,8	16,0	5,10	4,80	7,75	11,0	3,80	4,50	6,05

Примечание: 1-я строка – средние значения из серии измерений в мае – июне 1995 г.; 2-я – июль – начало августа; 3-я – конец августа – сентябрь.

Анализ подобных флуктуаций позволил сделать вывод, что они обладают некоторыми общими чертами развития. За начало таких явлений было принято явное превышение значений концентраций частиц в диапазоне $0,6 \leq d \leq 1,0$ мкм над средними значениями. После этого результаты по 7 отчетливо наблюдавшимся случаям в период с 28 августа по 3 сентября были усреднены $[\Delta V(r) - \Delta \bar{V}(r)]$, мкм³/м³, и была рассмотрена временная эволюция этих спектров, начиная с 2 ч до начала флуктуационной вспышки и до 6 ч после ее начала (табл. 4).

Из табл. 4 видно, что явное увеличение концентраций частиц для размеров $0,9 \leq d \leq 1,0$ мкм и

$2,0 \leq d \leq 0,4$ мкм наблюдается уже за 2 ч до начала вспышки. После начала вспышки наиболее заметно увеличение концентрации частиц $\bar{d} \leq 1,0$ мкм, а затем для частиц с $d > (1,5-2,0)$ мкм уменьшение концентраций до средних и даже ниже происходит через 4 ч после ее начала. При этом для каждой индивидуальной вспышки картина может существенно отличаться от средней, особенно в зависимости от мощности вспышки, однако общая картина соответствует представленной в табл. 4. На рис. 3 для наглядности приведены спектры $\Delta V(r)$, мкм³/м³, для $t = 0, +1$ и $3 \div 4$ ч.

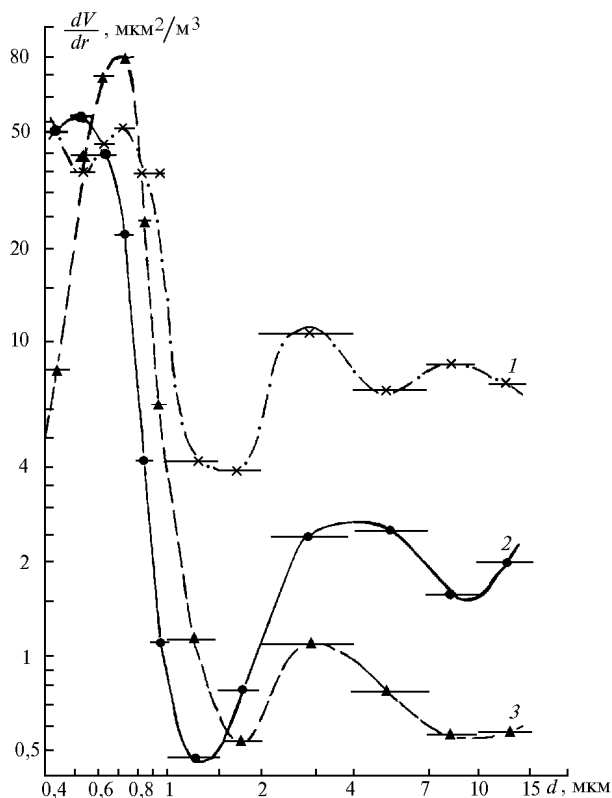


Рис. 2. Усредненные объемные распределения частиц по размерам $\Delta V/\Delta r$, $\text{мкм}^2/\text{м}^3$ для трех серий измерений в 1995 г.: 1 – май – июнь (20.05 – 24.06); 2 – июль – август (3.07 – 14.08); 3 – конец августа – начало сентября (26.08 – 7.09)

Наиболее сильные изменения спектра наблюдаются в диапазоне $1,0 \leq d \leq 3,0$ мкм. Эта деформация спектра, очевидно, может достаточно надежно регистрироваться как с помощью фотоэлектрического счетчика, так и другими оптическими методами, например,

по спектральному аэрозольному рассеянию и ослаблению в ближнем ИК-диапазоне ($\lambda = 1,0 - 3,0$ мкм).

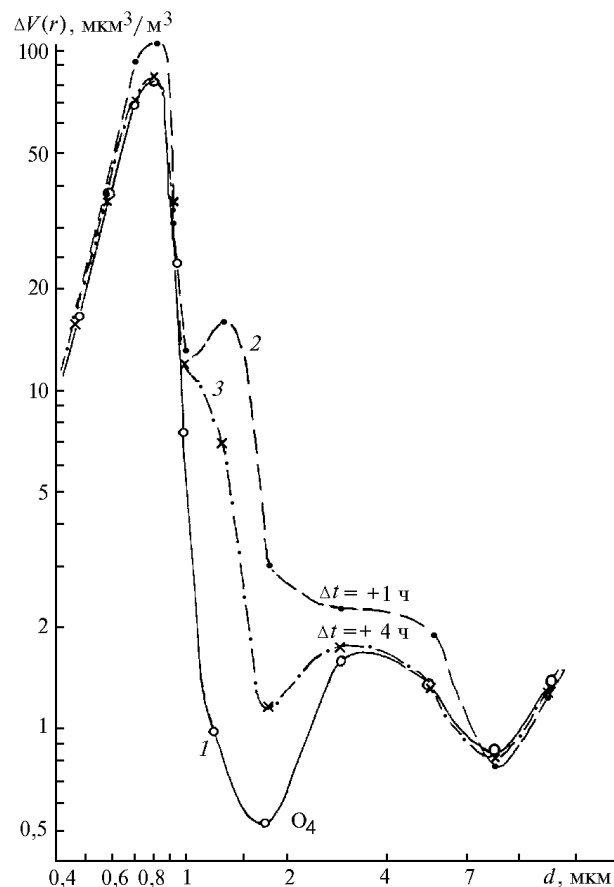


Рис. 3. Усредненные спектры объемных концентраций аэрозолей $\Delta V(r)$, $\text{мкм}^3/\text{м}^3$, во время вспышки эмиссии вулканического материала: 1 – начальный момент ($t=0$); 2 – через 1 ч ($t=+1$ ч); 3 – через 3–4 ч ($t=3-4$ ч)

Таблица 4

Вариации объемных концентраций аэрозольных частиц разных размеров $\Delta V(r) - \bar{\Delta V}(r)$ в периоды флуктуационных вспышек (усреднение по семи случаям), $\text{мкм}^3/\text{м}^3$

Диапазон размеров, Δd , мкм	Время от начала Δt , ч									
	-2	-1	0	+1	+2	+3	+4	+5	+6	
0,4–0,5	+0,12	+0,04	-0,10	-0,16	-0,30	-0,20	-0,32	-0,30	-0,28	
0,5–0,6	+0,75	+0,06	-0,43	-1,0	-1,4	-1,0	-1,5	-1,1	-0,38	
0,6–0,7	-0,70	0	+1,0	0	+44	+0,34	0	+1,7	+1,0	
0,7–0,8	-0,80	0	+1,2	0	+52	+0,40	0	+0,8	+1,2	
0,8–0,9	-0,50	-0,50	+0,12	+6,0	+7,5	+7,2	+14	+11	+6,5	
0,9–1,0	+0,65	+0,48	+1,3	+14	+8,5	+2,0	+1,8	+6,5	+5,4	
1,0–1,5	-0,18	-0,22	-0,14	+20	+27	+3,0	+2,0	+10	-0,15	
1,5–2,0	+0,08	-0,02	0	+1,4	+4,5	+0,80	+0,06	+1,2	-0,08	
2,0–4,0	+0,43	0	+0,54	+0,43	+0,43	+1,0	+0,11	+0,11	-0,43	
4,0–7,0	+0,20	0	+0,25	+0,20	+0,20	+0,47	+0,06	-0,03	-0,18	
7,0–10,0	+0,18	+0,04	+0,08	+0,10	-0,15	-0,03	-0,06	-0,03	-0,18	
>10	+0,11	+0,07	+0,04	-0,03	-0,16	-0,03	-0,14	-0,13	-0,12	

Данные элементного анализа аэрозольных проб во влажный период (табл. 5, 6) свидетельствуют об относительно стабильном элементном составе аэрозольных частиц. По степени корреляции поведения

во времени общего содержания элементов в аэрозольном состоянии можно выделить отдельные группы элементов: I – Si, Al, Cl, K, Ca, Ti, V, Cr, Mn, Ni, Zn, Rb, Sr, S; II – Fe, Cu, Zr. Близки по временным

вариациям Pb, Br и W, особняком (в частности, из-за высоких погрешностей определения) находятся элементы Ga, Se, P.

Вычисления коэффициентов корреляции для зависимостей концентраций отдельных элементов и между элементами для всего массива данных по сухому и влажному сезонам года с декабря 1994 по октябрь 1995 г. как для аэрозольных проб, так и для проб осадков свидетельствуют о том, что практически все элементы, содержащиеся в аэрозольных частицах, имеют в основном вулканическое происхождение. Причем элементный состав аэрозолей, образовавшихся при эмиссии из вулкана Попокатепетль, несколько отличается от состава частиц, образовавшихся при эмиссии вещества из вулкана Колима де Фуэго. Наиболее хорошее соответствие между элементным составом дождевых и аэрозольных проб наблюдалось в начальный период тропических дождей, что свидетельствует о хорошей вымываемости аэрозольного вещества вулканического происхождения.

Таблица 5

Концентрация элементов в атмосферных пробах приземных аэрозолей во влажный сезон, $\text{нг}/\text{м}^3$ (г. Колима, Университетский центр атмосферных исследований, август – октябрь 1995 г.)

Элемент	Дата отбора пробы						
	28–29.08	29–30.08	30.08	31.08–1.09	1.09	2–3.09	12–13.10
Al	1200	2300	3800	2600	300	1900	8200
Si	9800	9700	25500	6300	15500	1400	100300
P	200	<400	800	2200	1200	700	<600
S	40800	21500	38400	14800	18900	4400	70600
Cl	200	400	1200	1100	3100	800	4600
K	680	1660	1940	1690	1920	860	2610
Ca	1270	1720	3680	920	3440	230	8690
Ti	98	124	167	227	380	72	590
V	45	50	117	45	112	26	72
Cr	4	9	<20	23	37	13	31
Mn	26	20	<10	8	30	6	69
Fe	930	6470	2310	1210	1970	260	4780
Ni	5	3	14	9	27	8	15
Cu	6	8	<8	<5	<9	27	62
Zn	18	29	47	28	29	8	58
Ga	1	<2	<4	<2	<5	2	5
Se	<2	<2	3	<3	<7	<2	6
Br	14	19	8	22	14	2	48
Rb	70	9	54	5	24	14	37
Sr	21	15	42	5	62	17	90
Zr	24	51	70	27	294	81	54
W	<7	<3	–	<10	<20	14	<7
Pb	66	104	41	41	981	237	88

Примечание. Статистическая погрешность измерения для разных элементов в среднем составляет от 5 до 50%.

По содержанию анализируемых элементов в частицах разных размеров элементы можно разделить на следующие группы: 1 – содержащиеся, в основном, в наиболее крупных аэрозольных частицах (первый слой каскадного фильтра) – Si, Al, Cl, K, Ca, Fe, Zn, Ga, Sr, Zr; 2 – относительно равномерно распределенные по частицам разных размеров – S, Ti, V, Ni, Br, Pb; 3 – содержащиеся, в основном, в наиболее мелких частицах – Cu, Rb, W и 4 – содержащиеся в частицах, в

основном, среднего диапазона размеров ($0,8 \leq d \leq 2,5$ мкм) – P, Cr, Mn, Se. Можно также выделить элементы, распределенные с провалом в среднем диапазоне размеров – Al, Cl, K, Fe, Cu, Zn, Ga.

Таблица 6

Средние распределения содержания элементов в разных слоях каскадного фильтра для влажного сезона, % (район г. Колима)

Элемент	Слой		
	1-й	2-й	2-й
Si	85	4	11
Ca	82	6	12
Fe	81	4	15
Ga	86	–	14
Cl	78	7	15
Al	68	10	22
Zn	53	13	34
K	52	18	30
Sr	66	21	13
Zr	68	25	7
Ti	48	27	25
Br	45	40	15
S	36	18	46
Pb	36	34	30
V	29	26	45
Ni	25	42	33
Cu	26	13	61
Rb	9	47	44
W	–	60	40
Se	–	71	29
P	23	60	17
Cr	11	59	30
Mn	21	47	32

Сравнение групп элементов по временной изменчивости их содержания с группами по распределению их в частицах разных размеров свидетельствует о различиях в процессах перехода элементов в аэрозольное состояние. Почти все элементы, содержащиеся в основном в крупных частицах – Si, Al, Cl, K, Ca, Zn, Sr, входят в 1-ю группу, кроме Fe, Ga, Zr, которые в своем поведении образуют общую группу элементов с Cu, обнаруженной, главным образом, в мелких частицах. В 1-ю группу входят также следующие элементы: 1) содержащиеся, в основном, в мелких частицах – W; 2) относительно равномерно распределенные – S, V, Ti, Ni; 3) находящиеся в частицах среднего диапазона размеров – Cr, Mn и 4) с провалом в среднем диапазоне размеров – Al, Cl, K, Zn.

Анализ данных по содержанию элементов в частицах разных диапазонов в период вспышек эмиссии вулканического материала в конце августа – начале сентября и после землетрясения позволяет выявить некоторые особенности процесса перехода разных элементов в аэрозольное состояние. В начальной стадии усиления эмиссии вулканического материала идет возрастание содержания в более крупных частицах (укрупнение аэрозольных частиц) элементов S, Ti, Ni, Se, Zn, Pb и возрастание доли мелких частиц для элементов Si, Mn, Fe, Rb, а также Cu, Se, K. Для элементов Ca, Br, P, Pb при усилении эмиссии на-

блюдается увеличение долей и крупных, и мелких частиц (*U*-образное распределение).

После длительного усиления эмиссии вулканического вещества наблюдается возрастание доли мелких частиц, содержащих элементы Al, Cl, Cr, Mn, Cu, Br, Sr. Увеличение содержания крупных частиц, в состав которых входят элементы K, Ca, Ti, Cr, Mn, Fe, Se, Rb, Sr, Pb, очевидно, связано с сильными смещениями поверхностного слоя зем-

ной коры (землетрясения и толчки, вызванные вулканическими взрывами).

По поведению изменения спектра размеров частиц, содержащих определенные элементы, можно выделить четыре группы элементов: 1) Si, Ti, Cr, Ni, Zn, Sr, 2) Al, Cl, V, Ga, 3) Fe, Cu, Zr, 4) K, Ca, Mn. На рис. 4 приведены типичные кривые временной трансформации содержания этих групп элементов в частицах разных размеров при эмиссии вулканического материала.

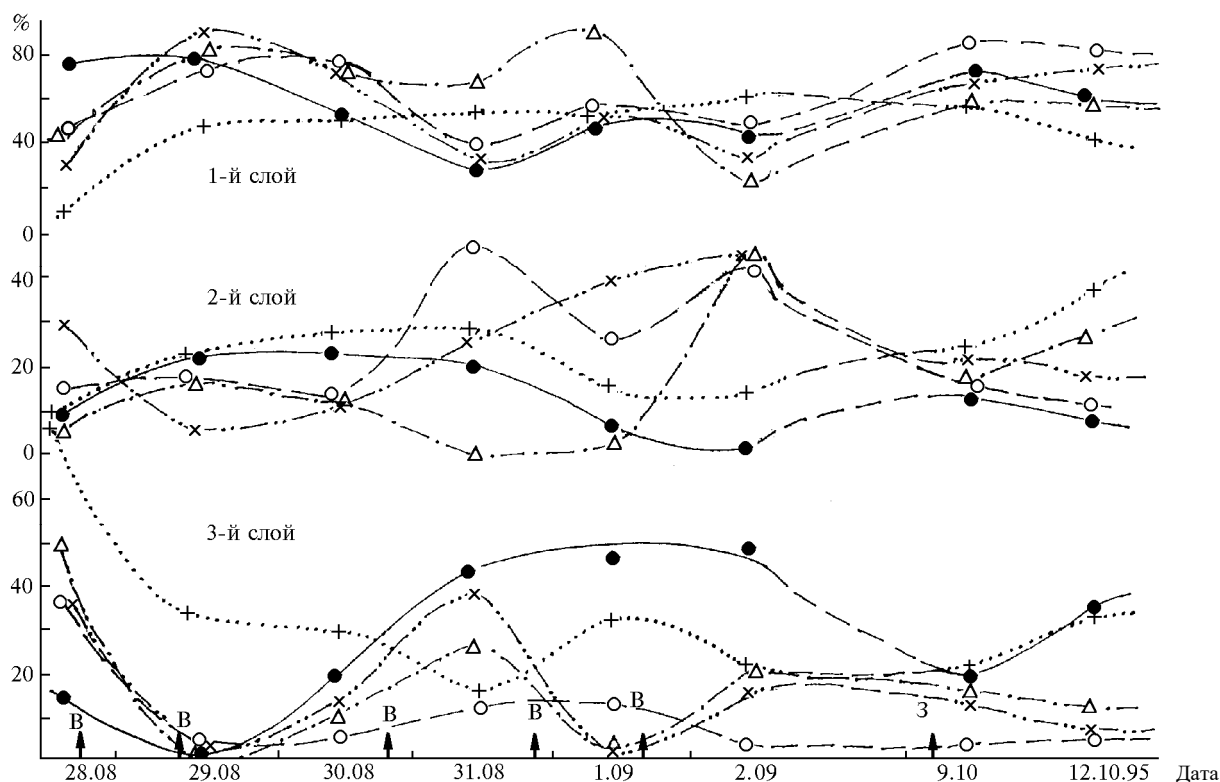


Рис. 4. Кривые временной трансформации содержания некоторых групп элементов в частицах разных размеров в период усиления эмиссии вулканического материала

Для более глубокой интерпретации этих результатов, очевидно, необходимы дополнительные наблюдения, желательно на более близких расстояниях к кратеру вулкана, а также в разных слоях атмосферы.

V. Измерения концентрации озона и сернистого газа

Систематические измерения озона в течение июня – сентября 1995 г. проводились на крыше Центра атмосферных исследований. Суточные ходы его концентрации в приземном слое для всех месяцев были достаточно сходны (рис. 5). В июне–июле утреннее возрастание концентрации озона наблюдалось в более ранние часы, чем в последующие месяцы, а наиболее высокие значения концентрации озона, превосходящие 350–400 мкг/м³, в послеобеденное время отмечались в

июле. Некоторые флуктуации концентрации озона обычно совпадают с появлением облачности и ливневыми осадками. Часто отмечается небольшой вторичный максимум концентрации озона в предутренние часы (3 – 5 ч).

Зависимости концентрации озона от концентрации аэрозолей, подобной обнаруженной в [7], выявить не удалось. Однако в отдельные дни наблюдались заметные отклонения от стандартных кривых суточного хода концентрации озона, в первую очередь в конце августа. Возможно, они обусловлены усилением деятельности вулкана Фузго де Колима. Так, 28 августа наблюдалось резкое уменьшение концентрации приземного озона в дневное время. В меньшей степени это уменьшение наблюдалось и 29 августа. Значения концентрации озона опускались до 30–60 мкг/м³ вместо характерных значений 250–300 мкг/м³.

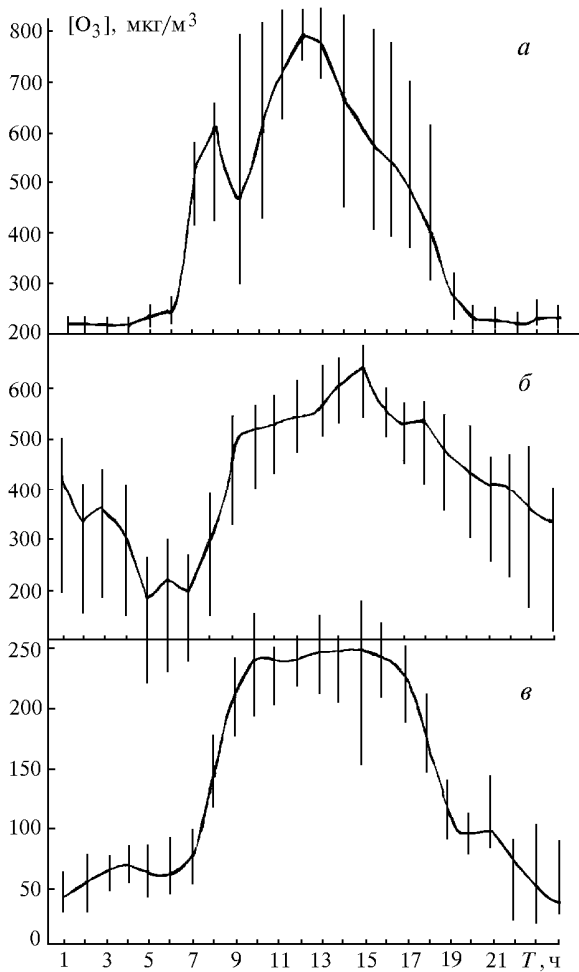


Рис. 5. Характерные и усредненные суточные ходы концентрации озона в приземном слое: *а* – июль, *б* – август, *в* – сентябрь 1995 г

Для сернистого газа в приземном слое отчетливого суточного хода концентрации не наблюдалось (рис. 6). Однако некоторые характерные особенности поведения сернистого газа отметить можно:

1) почти всегда наблюдается относительное увеличение концентрации сернистого газа в приземном слое в утренние (6–8 ч) и вечерние часы (18–20 ч);

2) в сентябре почти во все дни, когда проводилось наблюдение, регистрировалось также повышение концентрации сернистого газа в послеполуденное время (13–16 ч);

3) для нескольких дней в июле (22–24 июля) наблюдались кривые суточного хода, подобные кривым для озона;

4) отдельные anomalно высокие выбросы значений концентрации сернистого газа отмечались в конце августа – начале сентября, причем не наблюдалась временная зависимость их появления.

Были сделаны попытки найти взаимозависимость поведения озона и сернистого газа. Для отдельных дней она наблюдалась достаточно отчетливо (рис. 7). Повышение концентрации сернистого газа в светлое время обычно сопровождалось

уменьшением концентрации приземного озона. В ночное время поведение озона и сернистого газа подобно. Скорее всего это объясняется взаимодействием двух процессов: 1 – фотохимического процесса образования и разрушения озона и 2 – процесса вертикального массообмена (конвекция и турбулентная диффузия).

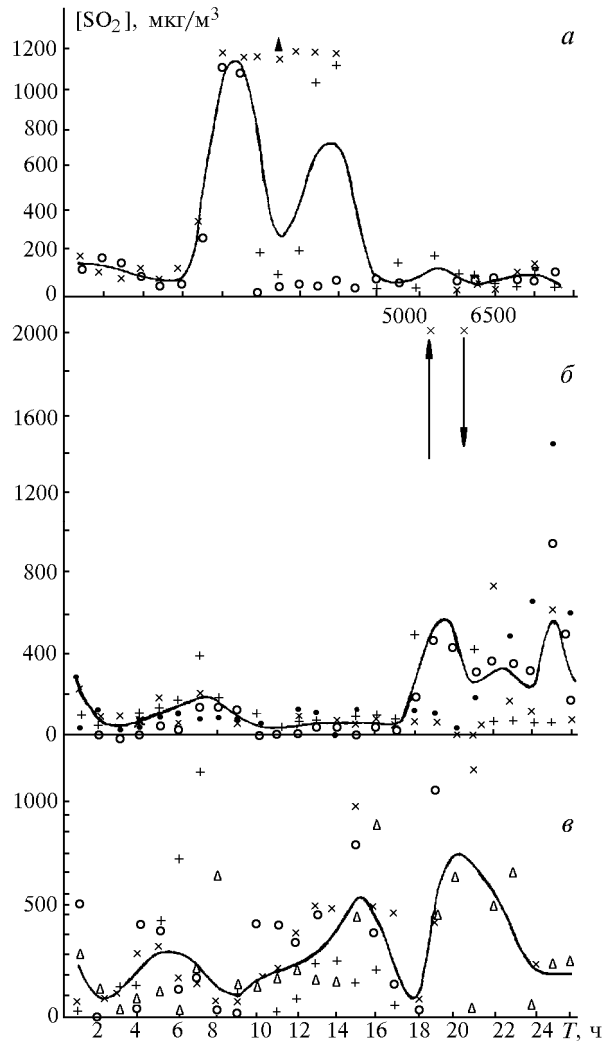


Рис. 6. Усредненные суточные ходы концентрации сернистого газа в приземном слое: *а* – июль, *б* – август, *в* – сентябрь 1995 г.

Анализ взаимозависимости приземных концентраций сернистого газа и аэрозолей не выявил отчетливой картины. По крайней мере, увеличение концентрации одного компонента не сопровождается ростом концентрации другого компонента в это же время. Однако в течение суток, т.е. с запазданием на несколько часов, этот эффект наблюдается почти всегда. Разность во времени между увеличением концентрации одного компонента и последующим ростом концентрации другого может достигать 6–7 ч. Причем, что представляется весьма интересным для интерпретации этой зависимости, обычно увеличение концентрации аэрозолей

предшествует увеличению концентрации сернистого газа. Особенно отчетливо это проявилось для случаев резкого возрастания эмиссии вулканического вещества в конце августа – начале сентября. Первоначально возрастает концентрация частиц в диапазоне размеров $1,5 \leq d \leq 4,0$ мкм, затем более мелких $0,6 \leq d \leq 1,5$ мкм, еще позже – в широком диапазоне размеров $0,6 \leq d \leq 7$ мкм, и только после этого наблюдается резкое возрастание сернистого газа. Так как все измерения проводились на расстоянии около 40 км от вулкана, то определенная интерпретация наблюдаемого явления в настоящее время затруднена.

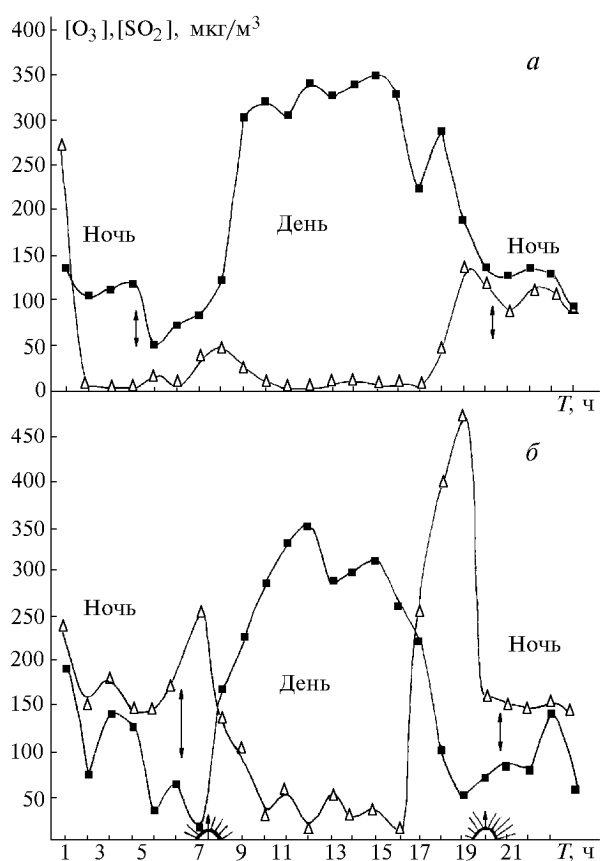


Рис. 7. Сравнение временных ходов концентраций озона и сернистого газа в приземном слое (характерные случаи): а – 30 августа, б – 31 августа 1995 г.

VI. Оптические измерения

В период дождей измерения ультрафиолетовой солнечной радиации пиранометром Эппли и определение оптической толщины атмосферы были весьма затруднены. Очевидно, что сами измерения могут быть, в частности, искажены попаданием дождевых капель на поверхность полусферы. Появляются и дополнительные ошибки в расчетах самих оптических толщин из-за неточного учета молекулярной и аэрозольной составляющих, т.е. неучета реальных вертикальных профилей плотности газов и температуры, влияния многократности рассеяния на облачных элементах и особенности

геометрии луча при прохождении несплошной кучевой облачности [8]. При этом вычисленная остаточная (аэрозольная) оптическая толщина атмосферы может принимать отрицательные значения, а измеренная интенсивность глобальной радиации превосходить модельные значения, полученные для безоблачных дней. В отдельных случаях значения оптических характеристик даже не удастся вычислить. Для примера приведем значения интенсивностей и оптических толщин, полученные 1 и 11 августа (рис. 8, 9). Следует отметить, что в начале сезона дождей оптические характеристики были относительно более стабильны (рис. 10).

Результаты, представленные на этих рисунках, а также полученные для других дней с относительно устойчивыми условиями, свидетельствуют, что произошло достаточно сильное вымывание аэрозолей из атмосферы по сравнению с периодом май – середина июня.

В то же время, очевидно, следует предположить, что значительная часть вулканического материала, в частности сернистый газ и мелкодисперсные аэрозоли, попадают в слои атмосферы выше облачного слоя и слабо вымываются облачными элементами и осадками. Это соответствует и данным микрофизических измерений, в которых не отмечается уменьшения концентрации аэрозольных частиц $d \leq 0,8$ мкм, а в конце августа – начале сентября даже наблюдается их заметное увеличение.

Определенный интерес представляет существенная разница во временном ходе оптических характеристик атмосферы при несплошной и сплошной облачности. В случае несплошной облачности размах наблюдаемых колебаний интенсивности УФ-излучения и соответственно оптических толщин чрезвычайно велик в сторону как больших, так и малых значений. Очевидно, причину этого не совсем обычного явления нужно исследовать отдельно.

При синхронных измерениях УФ-излучения и концентрации приземного озона наблюдалась жесткая связь вариаций этих характеристик: уменьшение интенсивности УФ-излучения практически мгновенно вызывало уменьшение концентрации озона и, соответственно, увеличение интенсивности УФ-излучения приводило к увеличению концентрации приземного озона (рис. 11). Однако эта зависимость не носила линейного характера.

Для однозначной интерпретации этой зависимости необходимы измерения УФ-радиации с хорошим спектральным разрешением. При этом возникает вопрос о природе вариаций интенсивности УФ-радиации. В частности, возможно, они вызваны пространственной неоднородностью поля стратосферного озона. Тогда совершенно очевидно, что прохождение минимумов стратосферного озона – озоновых дыр – над соответствующим участком земной поверхности, будет стимулировать усиленную генерацию приземного озона.

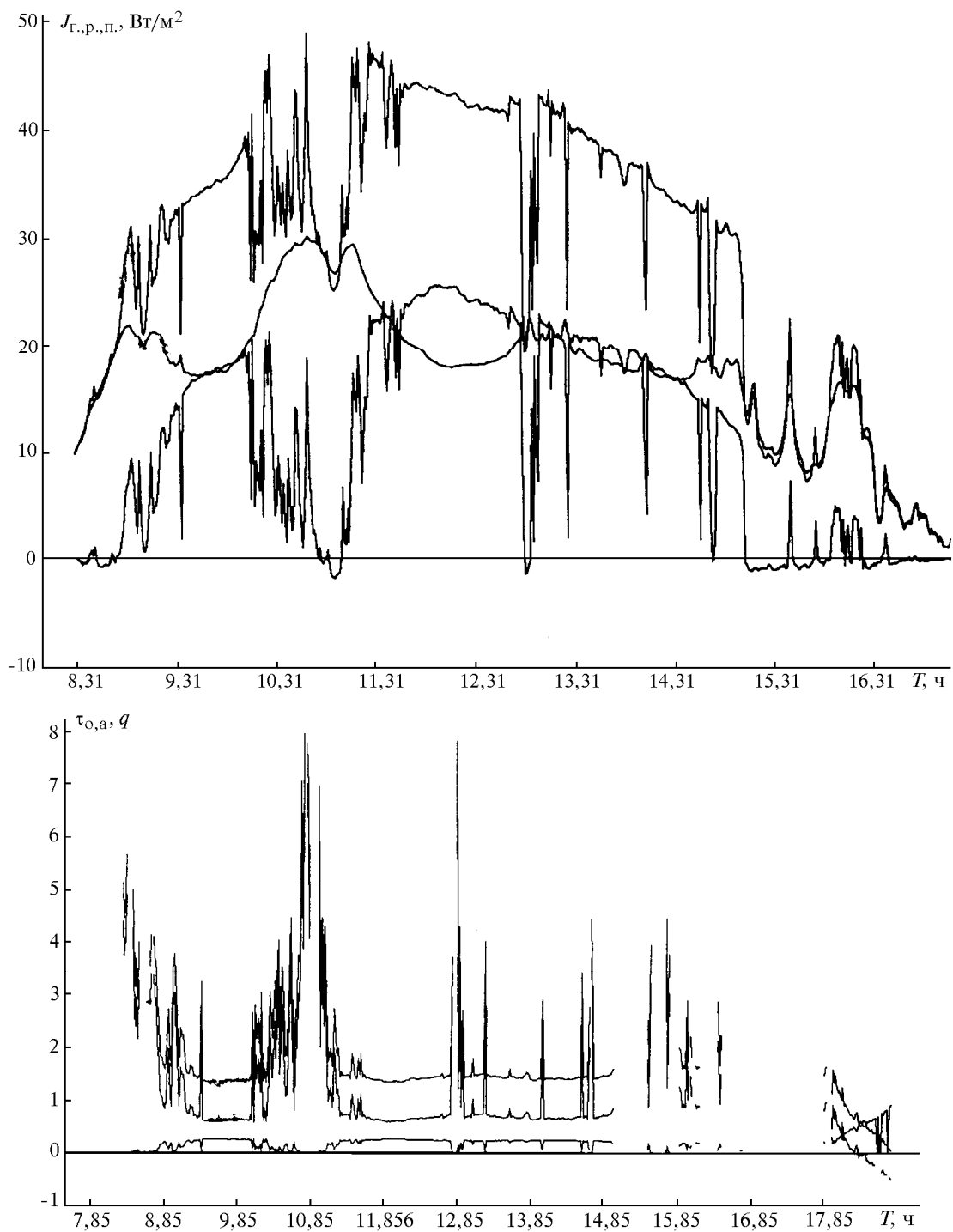


Рис. 8. Дневной ход интенсивностей солнечной радиации: $J_{\text{глоб}}$ – глобальной, $J_{\text{рас}}$ – рассеянной, $J_{\text{прям}}$ – прямой; оптических толщин: τ_o – общей, τ_a – аэрозольной, q – прозрачности (1 августа 1995 г.)

Другой возможной причиной этих вариаций интенсивности падающего УФ-излучения могут быть прохождения в тропосфере облаков сернистого газа, имеющих полосы поглощения в регистрируемой об-

ласти спектра. Хотя этот вариант представляется менее реальным, но он хорошо объясняет явление визуально невидимых облачных образований, имеющих резко очерченные границы (типа струй).

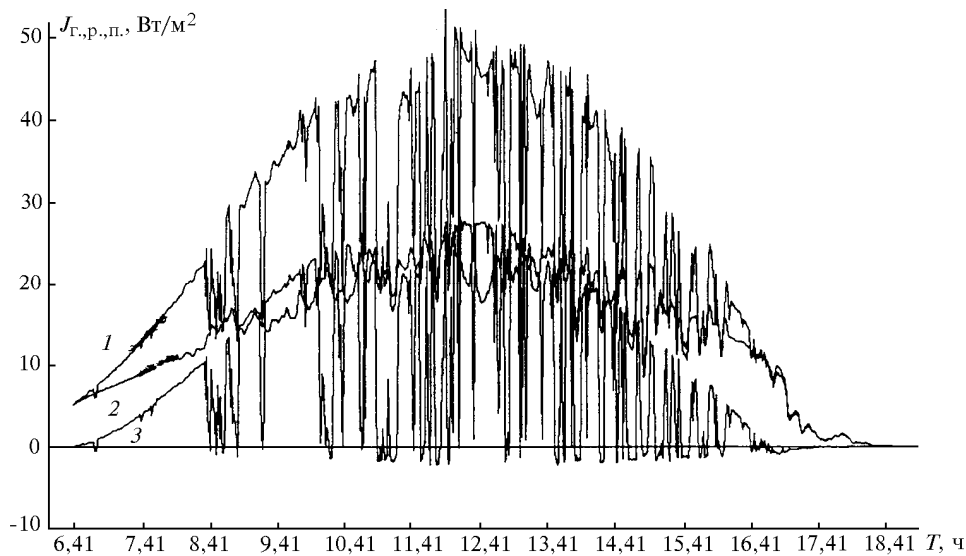


Рис. 9. То же, что и на рис. 8, для 11 августа 1995 г.

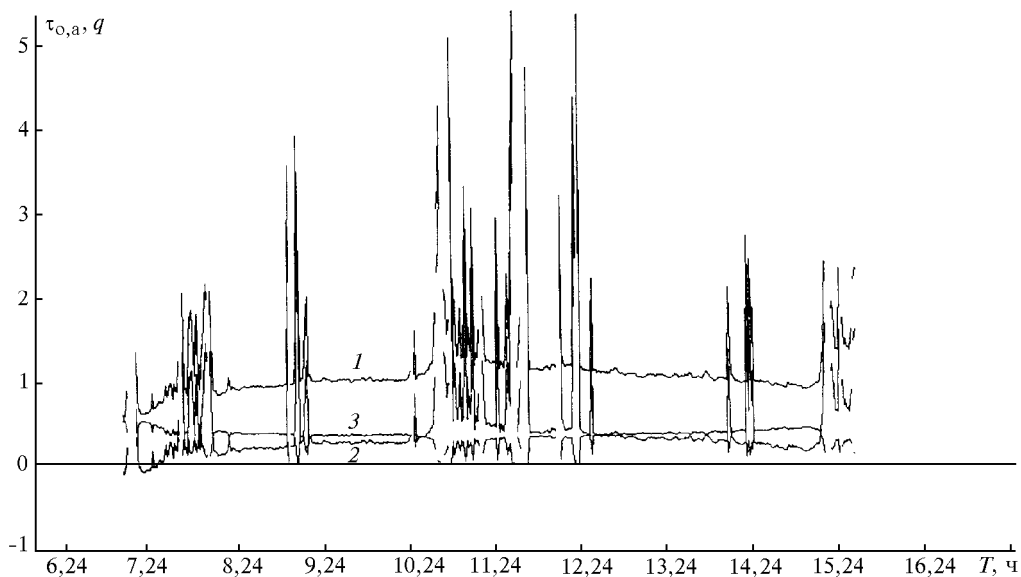


Рис. 10. Дневной ход оптических параметров атмосферы τ_o , τ_a , q (3 июля 1995 г.)

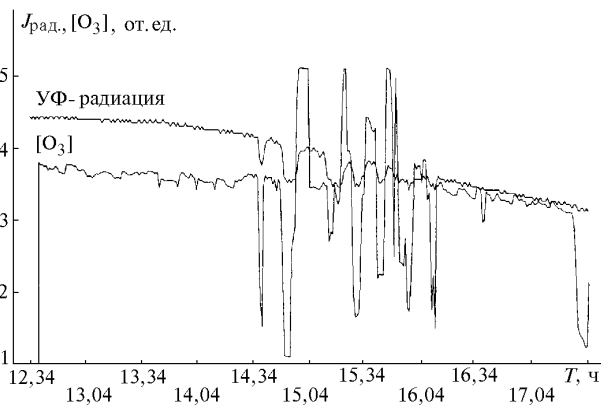


Рис. 11. Взаимная зависимость концентрации озона и интенсивности УФ-излучения в приземном слое (синхронные измерения)

VII. Заключение

Анализ полученных как в сухой, так и в дождливый сезоны результатов свидетельствует об определяющей роли вулкана Фуэго де Колима в существовании необычных оптико-метеорологических явлений в нижних слоях атмосферы в его окрестности. Ряд из них связан со значительной эмиссией вулканического материала в атмосферу, в первую очередь сернистого газа и аэрозолей. В дождливый сезон эти компоненты активно участвуют в физико-химических процессах в тропосфере. Этому способствуют наличие в аэрозольном веществе химических соединений, активно участвующих в фотокаталитических реакциях, а также повышенная по сравнению со средними широтами интенсивность ультрафиолетовой солнечной радиации.

Неоднородности подстилающей поверхности и их разные альбедо в видимой области спектра способствуют активному воздухообмену в вертикальном направлении, в частности образованию мощной кучевой облачности.

Значительная часть химических процессов трансформации вулканического газообразного и аэрозольного вещества проходит в облаках. Об этом свидетельствуют и высокие концентрации различных веществ в осадках, в первую очередь раствори-мых: серной кислоты, сульфатов и хлоридов.

Несмотря на весьма высокую эффективность вымывания примесей из нижних слоев атмосферы облачностью и осадками, этот эффект заметно нивелируется увеличением интенсивности эмиссии вулканического вещества во второй половине дождливого сезона. При этом часть вулканического вещества попадает в атмосферные слои, расположенные выше уровня облачности, и, очевидно, распространяется на значительную территорию, влияя на оптические свойства атмосферы, возможно, в региональном масштабе. По крайней мере, это влияние является определяющим для всей территории штата Колима.

Следовательно, можно сделать вывод о необходимости учета в климатологических оценках и прогнозах влияния деятельности перманентно действующих вулканов, таких как Фуэго де Колима и Попокатепетль. Необходимы более тщательные и де-

тальные исследования этого влияния, в частности, в непосредственной близости от кратера с измерением вертикальных профилей метеорологических и микрофизических структурных характеристик тропосферы.

Настоящая работа выполнялась на базе Колимского университета Республики Мексика сотрудниками этого университета и Санкт-Петербургского государственного университета при финансировании работ Министерством науки Республики Мексика и Российским фондом фундаментальных исследований (код проекта 96-05-64612).

Авторы приносят глубокую благодарность руководству Колимского университета за оказанную при проведении этих исследований помощь и интерес к их результатам.

1. Слейбо У., Персонс Т. Общая химия. М.: Мир, 1979. 550 с.
2. Ландсберг Г.Е. Климат города. Л.: Гидрометеоздат, 1983. 248 с.
3. Руководство по контролю загрязнения атмосферы. М.: Гидрометеоздат, 1991. С. 424–439.
4. Ивлев Л.С. Химический состав и структура атмосферных аэрозолей. Л.: Изд-во ЛГУ, 1982. 468 с.
5. Аэрозоль и климат / Под ред. К.Я. Кондратьева. Л.: Гидрометеоздат, 1991. 541 с.
6. Ивлев Л.С., Ионин В.А., Семова А.Ю., Спажакина Н.К. // Труды ГГО. 1972. Вып. 293. С. 161–172.
7. Ивлев Л.С. // Атмосферный озон. Л.: Гидрометеоздат, 1987. С. 41–63.
8. Радиация в облачной атмосфере / Под ред. Е.М. Фейгельсон. Л.: Гидрометеоздат, 1981. 280 с.

НИИ физики Санкт-Петербургского государственного университета,
Центр атмосферных исследований Колимского университета (Мексика)

Поступила в редакцию
5 мая 1997 г.

L.S. Ivlev, V.I. Kudryashov, M.E. Arias, A.O. Vargas. Complex Investigation of Optical and Meteorological Parameters of Atmosphere in the Area of Volcano Colima (Mexico). Part II. Wet Season.

The results of field measurements of incoming UV radiation intensity, full and aerosol optical depth of atmosphere, ozone concentration, sulfur gas and aerosol content in the underlying layer of atmosphere during the wet season of year 1995 (June – October) are presented. Washing-out of aerosols by tropical rains and their regeneration is studied. An elemental analysis of aerosol and rain-fall sediments is carried out. The increasing of volcanic emission in the end of August – beginning of September is analyzed.