

## ОПТИКА АТМОСФЕРЫ И КЛИМАТ

УДК 551.521.3

Е.В. Горбаренко, И.Д. Еремина

### РОЛЬ ОСАДКОВ В ПРОЦЕССЕ ОЧИЩЕНИЯ АТМОСФЕРЫ ОТ АЭРОЗОЛЯ

На основе многолетних наблюдений (1981 – 1996 гг), проводимых Метеорологической обсерваторией МГУ на территории г. Москва, дан анализ очищения атмосферы осадками в условиях города.

В процессе очищения атмосферы от аэрозолей важная роль принадлежит осадкам. Влияние вымывающего действия осадков на оптические свойства дымка отмечается в ряде работ [1, 4, 6], но к настоящему времени это влияние исследовано недостаточно. Имеющиеся данные не всегда согласуются между собой. Наиболее сложен анализ очищения атмосферы осадками в условиях города. Осадки приводят к снижению концентраций примесей, однако эффект вымывания наблюдается лишь вне зоны прямого воздействия источников антропогенного аэрозоля. Даже при значительной интенсивности и большом количестве осадков атмосфера остается сильно загрязненной при переносе воздуха от ближних источников, и уровень концентрации восстанавливается почти сразу же после прекращения осадков.

Метеорологическая обсерватория МГУ (МОМГУ) расположена на территории ботанического сада МГУ, в «чистом» юго-западном районе Москвы, в значительном удалении от крупных промышленных предприятий столицы. Поэтому выводы, полученные на основе анализа данных многолетних наблюдений МОМГУ, отражают общие закономерности процесса вымывания аэрозоля осадками.

В качестве характеристики аэрозольного загрязнения атмосферы в работе используется аэрозольная оптическая толщина атмосферы  $\tau_a$  для эффективной длины волны солнечного спектра  $\lambda_0 = 550$  нм ( $\tau_{a, \lambda_0}$ ), рассчитанная по данным измерений прямой интегральной солнечной радиации [9]. Поскольку основные процессы очищения атмосферы от аэрозоля связаны с выпадением осадков, то химический состав атмосферных осадков и общая их минерализация также могут служить показателями уровня загрязнения воздушного бассейна. Это позволяет провести совместный анализ данных величин по наблюдениям в МОМГУ за период с 1981 по 1991 г.

В МОМГУ наблюдения за химическим составом атмосферных осадков ведутся с 1982 г. В каждой пробе отдельного выпадения дождя или снега, согласно программе Всемирной метеорологической организации, определяются содержание элементов:

гидрокарбоната ( $\text{HCO}_3^-$ ), сульфата ( $\text{SO}_4^{2-}$ ), хлорида ( $\text{Cl}^-$ ), кальция ( $\text{Ca}^{2+}$ ), магния ( $\text{Mg}^{2+}$ ), натрия ( $\text{Na}^+$ ), калия ( $\text{K}^+$ ), аммония ( $\text{NH}_4^+$ ), а также показатель кислотности осадков – рН-отрицательный логарифм концентрации ионов водорода в растворе [2, 3].

За рассматриваемый период кислотность осадков менялась в очень широких пределах: минимальное значение рН равно 3,20 (июль 1987 г.), а максимальное – 9,65 (ноябрь 1983 г.). Средние годовые значения рН изменялись в пределах 4,6 – 5,2, эти значения ниже фоновых значений для незагрязненных осадков (рН = 5,6). Кислотность проб зависит от агрегатного состояния выпадающих осадков. Наибольшее количество проб дождей имеет рН в интервале 4 – 6, а снега 6 – 8. Доля проб с рН  $\leq 5,0$  (кислые дожди) в разные годы составила от 25 до 64% всех дождей за сезон, из них очень кислые дожди (рН  $\leq 4,0$ ) наблюдались в 2 – 6% случаев за исключением 1987 г., когда выпало 25% таких дождей [5].

Концентрация ионов  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  в течение года меняется незначительно, а для общей минерализации осадков и ионов  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ , магния  $\text{Mg}^{2+}$  отмечены весенне-летние максимумы. По многолетним наблюдениям МОМГУ в эти же месяцы отмечаются максимальные значения аэрозольной оптической толщины атмосферы. На рис. 1 представлен годовой ход концентраций (в микрограмм-эквивалентах) некоторых химических элементов и величин аэрозольной оптической толщины, усредненных за этот период наблюдения. Годовые изменения усредненных значений концентраций всех рассматриваемых элементов, исключая  $\text{H}^+$ , с максимальными значениями в апреле, хорошо согласуются с годовым ходом  $\tau_{a, \lambda_0}$ . Высокие значения минерализации осадков и  $\tau_{a, \lambda_0}$  в апреле связаны с увеличением в атмосфере аэрозоля естественного происхождения: после исчезновения снежного покрова с повышением температуры воздуха начинает развиваться конвекция и незакрепленные растительным покровом частицы почвы в большом количестве поступают в атмосферу. Летний максимум связан с преобладанием в этот сезон южных воздушных масс, обогащенных естественным аэрозолем.

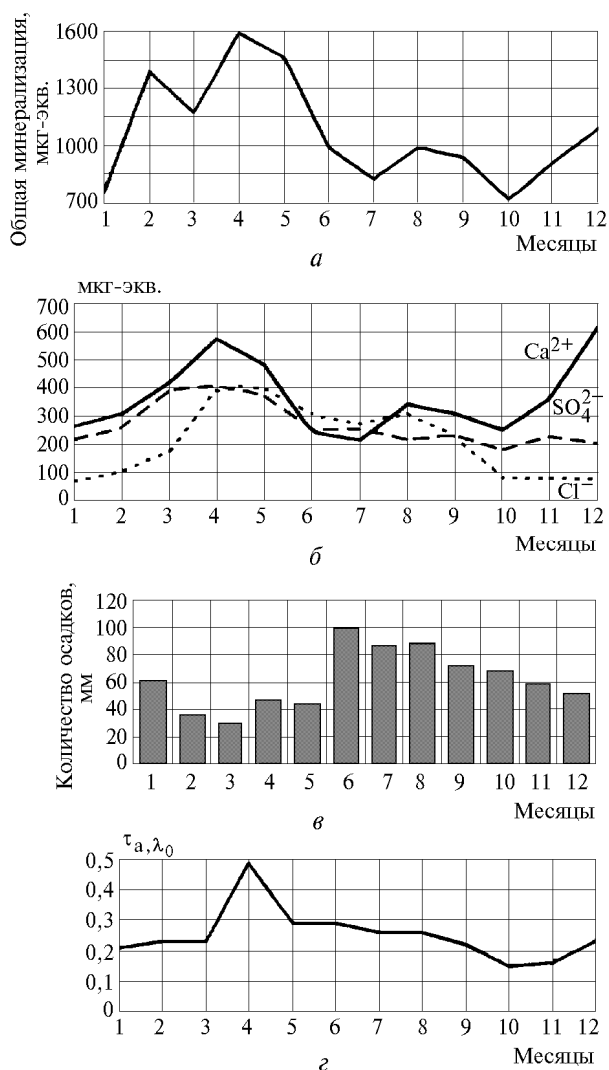


Рис. 1. Годовой ход общей минерализации, концентраций химических элементов, количества осадков и  $\tau_{a, \lambda_0}$ , Москва (1982 – 1991 гг.)

Более подробный корреляционный анализ связи месячных значений концентраций химических элементов с месячными значениями  $\tau_{a, \lambda_0}$ , как по месяцам, так и в целом за год, не дал положительного результата, что связано прежде всего с различными метеорологическими условиями, при которых

определяются эти величины. Характеристики аэрозольной мутности атмосферы определяются только при диске Солнца, не закрытом облаками, а выпадению осадков, как правило, предшествует пасмурная погода. Кроме того, вымывание аэрозоля осадками идет в подоблачном слое, а аэрозольная оптическая толщина атмосферы характеризует аэрозольную мутность всей толщи атмосферы [8].

Процесс вымывания определяется совокупностью факторов: количеством, продолжительностью и интенсивностью осадков, характером их выпадения (действие повторяющихся дождей больше, чем отдельных эпизодических), а также метеорологическими условиями.

По данным МОМГУ, значительное вымывание наблюдается при месячном количестве осадков 50 – 60 мм, дальнейшее увеличение количества осадков в месяц почти не сказывается на вымывании аэрозолей. Вымывание зависит от продолжительности осадков: двухчасовой дождь способствует стопроцентному вымыванию пыли, в то время как 6-минутный дождь (той же интенсивности) вымывает лишь 18% пыли, с увеличением продолжительности дождя его вымывающая способность растет. При одной и той же интенсивности дождя и скорости ветра 3 м/с концентрация пыли в атмосфере при северном ветре равнялась нулю в 8 случаях из двадцати, а при южном – всего в двух случаях [7]. Самые высокие значения  $\tau_{a, \lambda_0}$ , концентрации примесей, а также повышенные значения кислотности осадков, собранных в Метеорологической обсерватории МГУ в течение всего года, наблюдаются при ветрах южных направлений, что связано как с увеличением количества естественного аэрозоля в воздушных массах с юга России и Средней Азии, так и с загрязнением антропогенным аэрозолем при прохождении воздушной массы над юго-восточной частью города, где расположены крупнейшие промышленные предприятия столицы. В табл. 1 в качестве примера приводятся значения аэрозольной оптической толщины атмосферы до и после фронтальных и внутримассовых осадков, различных по продолжительности, количеству и интенсивности.

Таблица 1

Сравнение $\tau_{a, \lambda_0}$ до и после выпадения дождей						
Дата до дождя	$\tau_{a, \lambda_0}$	Дата дождя	Продолжительность, ч	Количество, мм	Дата после дождя	$\tau_{a, \lambda_0}$
<i>Фронтальные осадки</i>						
30.04.90	0,28	1.05.90	2	2,8	2.05.90	0,06
10.05.90	0,14	11 – 12.05.90	2	0,7	12.05.90	0,05
16.05.90	0,22	16 – 18.05.90	7	8,9	19.05.90	0,08
25.05.90	0,46	25 – 26.05.90	20	25,8	27.05.90	0,03
6.06.91	0,50	6 – 7.06.91	7	78,1	8.06.91	0,09
<i>Внутримассовые осадки</i>						
6.07.90	0,79	06.07.90	1	3,1	7.07.90	0,54
10.08.90	0,64	13 – 16.08.90	26	72,9	17.08.90	0,25
18.06.91	0,57	18 – 19.06.91	4	11,5	19.06.91	0,31
5.07.91	0,12	6.07.91	1	0,4	7.07.91	0,08

Значительное уменьшение  $\tau_{a, \lambda_0}$  после прохождения фронтальных осадков может быть связано не только с очищающим действием осадков, но и с сменой воздушной массы после прохождения фронта. Но при этом максимальные изменения  $\tau_{a, \lambda_0}$  произошли после наиболее длительных, с наибольшим количеством осадков дождей.

В большей степени вымывающее действие дождя определяет продолжительность осадков. С 25 по 27 мая 1990 г. аэрозольная оптическая толщина атмосферы уменьшилась после 20-часового дождя в 15 раз, а после экстремального по количеству осадков дождя 6–7 июня 1991 г. всего в 5 раз. После выпадения внутримассовых осадков  $\tau_{a, \lambda_0}$  до и после дождя изменялась в 1,5–2 раза. Максимальный по продолжительности и количеству осадков дождь 10 августа 1990 г. привел к очищению значительно загрязненной воздушной массы: значение  $\tau_{a, \lambda_0}$  до дождя почти в три раза превышало месячную норму, после дождя значение  $\tau_{a, \lambda_0}$  уменьшилось до среднего многолетнего. Значимая зависимость  $\tau_{a, \lambda_0}$  от продолжительности, количества и интенсивности осадков отмечается только в теплый период года, что,

видимо, связано с наибольшей концентрацией аэрозольных частиц в этот период.

Для изучения динамики вымывания аэрозолей из атмосферы осадками были отобраны фракционные пробы (пробы в течение одного дождя и равные по объему). Анализ данных показал, что концентрации почти всех ионов в осадках с течением времени, как правило, снижаются. На рис. 2 представлены гистограммы содержания сульфатов, нитратов, хлоридов и аммония в последовательных фракциях дождя, выпавшего 6 июня 1991 г. Видно, что концентрация хлорид-иона во всех фракциях мала и почти одинакова. Это объясняется тем, что этот дождь был очень обильным (78,1 мм – абсолютный максимум за 37 лет наблюдений), и пробы отдельных фракций уже были достаточно разбавлены. Поэтому содержание хлоридов почти сразу же достигло значений, характерных для чистых осадков на фоновых станциях. Невелики и концентрации остальных ионов. В дожде, выпавшем 18 июня 1991 г. со средним количеством осадков (11,5 мм), концентрации всех ионов были выше, так как пробы по объему были меньше, дождь был не очень продолжительным и удалось собрать только 3 фракции (табл. 2).

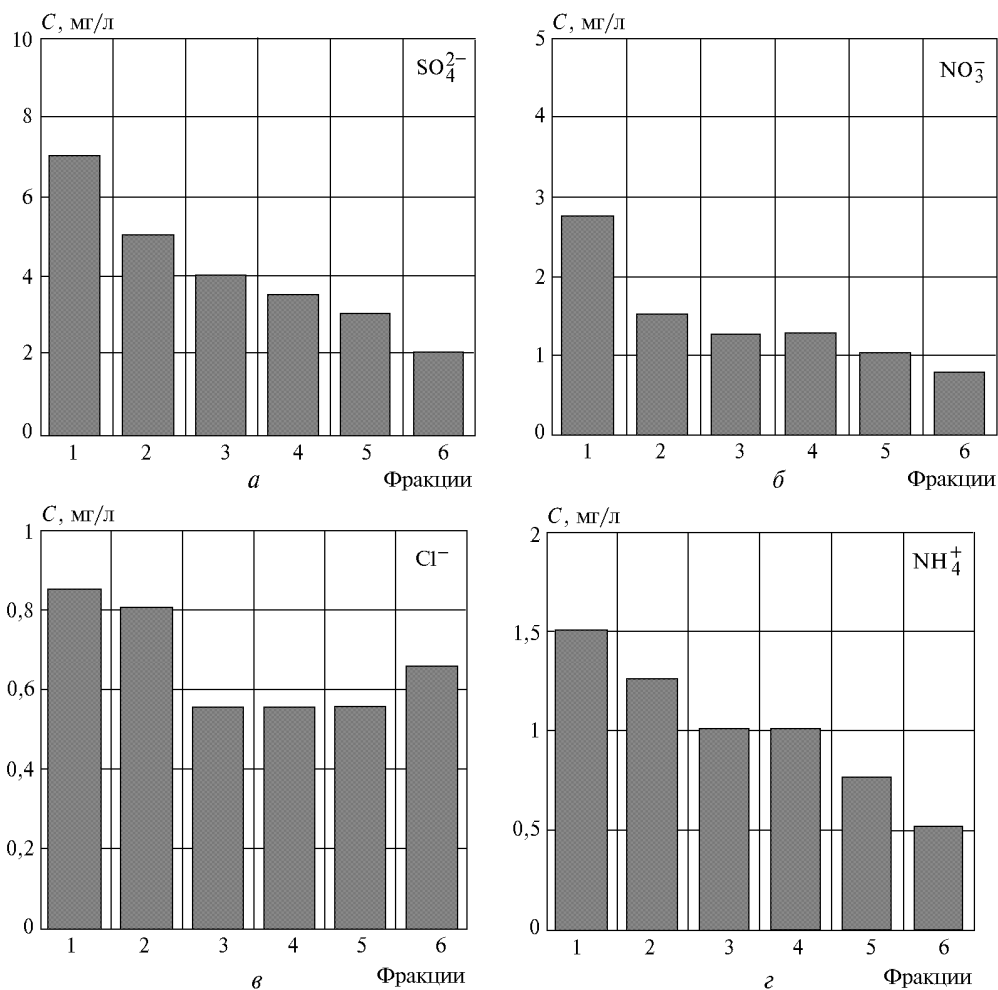


Рис. 2. Концентрации сульфатов (а), нитратов (б), хлоридов (в) и аммония (з) в последовательных фракциях дождя 06.06.91 г.

Химический состав фракций дождя

Номер фракции	Время отбора проб, мин	Концентрации ионов, мг/л				
		HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>
		<i>Дождь постоянной интенсивности</i>				
1	35	0	15,0	4,1	2,7	2,2
2	40	0	11,2	2,7	2,3	1,1
3	57	0	8,1	2,4	2,1	0,9
		<i>Дождь меняющейся интенсивности</i>				
1	8	1,4	2,3	3,5	0,9	1,6
2	45	6,0	16,2	18,0	7,1	6,5
3	10	1,2	2,0	3,2	0,6	1,5

Видно, что наибольшее очищение произошло в первые 35 мин дождя, при этом нельзя сказать, что к отбору третьей фракции произошло полное очищение атмосферы, так как после дождя значение  $\tau_{a, \lambda_0}$  не достигло среднего многолетнего. Интенсивность выпадения дождя в этих случаях была довольно постоянной.

Другая картина наблюдается, если интенсивность выпадения дождя будет значительно меняться (см. табл. 2). При почти таком же, как в предыдущем случае, количестве осадков (10,9 мм) время отбора равных порций сильно отличается, т.е. интенсивность дождя в течение выпадения значительно изменялась. Первая фракция была собрана за 8 мин, т.е. дождь был обильный, с крупными, быстро падающими каплями.

Потом интенсивность его сильно уменьшилась, и вторая фракция собиралась 45 мин. Мелкие капли дождя дольше находятся в атмосфере, имеют большую поверхность и поэтому успевают поглотить больше аэрозолей, вследствие этого концентрации ионов во второй фракции дождя резко возросли. Затем дождь опять усилился, и время отбора третьей фракции почти такое же, как для первой. Время пребывания крупной капли в атмосфере опять мало, да и атмосфера уже достаточно очищена, поэтому и концентрации в последней фракции ниже, чем в первой.

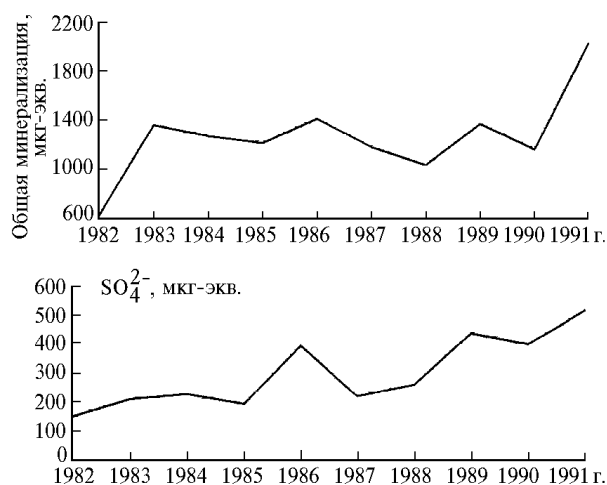


Рис. 3. Многолетние изменения общей минерализации осадков, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>

Зная концентрации всех ионов в атмосферных осадках, можно оценить количество солей в них. В рассматриваемом районе в год выпадает 95 – 160 кг/га солей, причем значительная их часть (30 – 40%) приходится на долю сульфатов.

Анализ изменений концентраций по годам не обнаружил значимых тенденций к увеличению для отдельных ионов. Однако существенно растет в последние годы содержание в осадках сульфатов, основных промышленных аэрозолей, что наряду с положительным трендом  $\tau_{a, \lambda_0}$  [10] также свидетельствует о росте антропогенного влияния на аэрозольное загрязнение в городе (рис. 3).

Таким образом, аэрозольная оптическая толщина атмосферы и химический состав атмосферных осадков характеризуют аэрозольное загрязнение воздуха. Исследование  $\tau_{a, \lambda_0}$  до и после выпадения дождей и анализ химического состава фракционных проб осадков показали значительную роль в очищающем действии осадков их продолжительности и интенсивности. Так как вымывание из атмосферы для каждого вещества идет по-разному, для дальнейшего исследования этой проблемы необходимы измерения химического состава сухого аэрозоля.

1. Бурцев И.И., Бурцева Л.В. Сравнение характеристик вымывания гигроскопического и негигроскопического аэрозоля облачными каплями // Тр. Ин-та экспериментальной метеорологии. 1971. Вып. 21.
2. Еремينا И.Д., Штигун Л.К., Золотов Ю.А. Проточный инжекционный анализ. Спектрофотометрическое определение сульфат-ионов в атмосферных осадках // Журнал аналит. химии. 1987. Т. 42. № 9. С. 1631–1635.
3. Еремينا И.Д., Штигун Л.К., Золотов Ю.А. Проточный инжекционный анализ. Спектрофотометрическое определение хлорид-ионов в атмосферных осадках // Журнал аналит. химии. 1989. Т. 44. № 3. С. 399–403.
4. Ивлев Л.С., Дмоховский В.И. К вопросу о стабильности распределения аэрозольных частиц по размерам в приземном слое атмосферы // Проблемы физики атмосферы. 1970. № 8. (ЛГУ).
5. Климат, погода, экология Москвы. СПб.: Гидрометеоздат, 1995. 437 с.
6. Палагов О.А., Ужегов В.Н. Влияние ливневых дождей на оптические свойства морской прибрежной дымки // Изв. АН СССР. Сер. ФАО. 1980. Т. 16. № 4. С. 345–351.
7. Руднева Е.А. Роль осадков в очищении воздуха // Наблюдения МОМГУ. Изд-во МГУ, 1977. № 7.
8. Селезнева Е.С. Общая характеристика фонового уровня загрязнения воздуха по данным об атмосферных осадках // Метеорологические аспекты загрязнения атмосферы. М.: Гидрометеоздат, 1981. Т. 3. С. 164–173.

9. Тарасова Т.А., Ярхо Е.В. Определение аэрозольной оптической толщины атмосферы по наземным измерениям прямой интегральной солнечной радиации // Метеорология и гидрология. 1991. N 12. С. 66–71.

10. Ярхо Е.В. Временная изменчивость аэрозольной оптической толщины атмосферы в различных климатических регионах // Изв. АН РАН. Сер. ФАО. 1994. Т. 30. N 3. С. 417–424.

Московский государственный  
университет им. М.В. Ломоносова

Поступила в редакцию  
25 апреля 1997 г.

*E.V. Gorbarenko, I.D. Eremina. The Role of Precipitations in the Process of the Atmosphere Cleaning from Aerosol.*

Based on many-year observations (1981 – 1991) conducted at the Meteorological observatory of the Moscow State University on the territory of Moscow city, the dynamics of the process of the city atmosphere cleaning by precipitations is analyzed.