

УДК 551.510.42

Н.О. Плауде, М.В. Вычужанина

СВЯЗЬ ЛЬДООБРАЗУЮЩИХ СВОЙСТВ С РАЗМЕРАМИ ЧАСТИЦ В АТМОСФЕРНОМ АЭРОЗОЛЕ

Анализируются результаты одновременных измерений концентрации атмосферных ледяных ядер, концентрации ядер Айткена и спектров размеров аэрозольных частиц в диапазоне от 0,01 до 10 мкм, проведенных в Московской области в 1993–1997 гг. На материалах 15-месячных измерений показано, что концентрация ледяных ядер не всегда коррелирует преимущественно с концентрацией крупных аэрозольных частиц. Во многих случаях преобладающей оказывается корреляция ледяных ядер с концентрацией ядер Айткена или одновременно наблюдается высокая корреляция ледяных ядер с концентрацией крупных и мелких частиц. Были отмечены периоды полного отсутствия корреляции концентрации ледяных ядер с дисперсностью атмосферного аэрозоля, совпадавшие с периодами частой смены погодных и синоптических условий.

Ряд экспериментальных данных показывает, что льдообразующими ядрами в атмосферном аэрозоле являются преимущественно крупные частицы [1]. Наиболее четко это было продемонстрировано Георги и Кляйнюнгом [2] на результатах серии ежедневных трехразовых измерений концентрации ледяных ядер (ЛЯ), ядер Айткена (ЯА) и частиц размером более 0,3 мкм, проведенных авторами в течение месяца на г. Кляйнер Фелдберг в 20 км к северу от Франкфурта-на-Майне. Концентрация ледяных ядер хорошо коррелировала с концентрацией крупных частиц (коэффициент корреляции 0,87), в то время как какая-либо корреляция отсутствовала для ледяных ядер и ядер Айткена.

Повышенное содержание ледяных ядер в грубодисперсных фракциях атмосферного аэрозоля было найдено при измерениях концентрации ЛЯ в свободной атмосфере [3, 4]. Подобные результаты согласуются с физическими представлениями о зависимости льдообразующей способности от размеров ядра-подложки. Однако разнообразие химического состава атмосферного аэрозоля, особенно в промышленных регионах, а также вариации погодных и синоптических условий при продолжительных измерениях могут, очевидно, делать более сложной связь льдообразующих свойств с размерами атмосферных частиц.

В годичной серии аэрозольных измерений в Московской области, выполненной в Центральной аэрологической обсерватории в 1987 г., не обнаружилось корреляции ни между концентрацией ледяных ядер и общей концентрацией субмикронного аэрозоля, ни между концентрацией ЛЯ и концентрацией крупных частиц диаметром от 0,2 до 1 мкм [5].

Предпринятый авторами в последующем анализ двух серий измерений, выполненных в 1993 г. [6], показал, что степень корреляции льдообразующей способности атмосферного аэрозоля с размерами аэрозольных частиц значительно варьирует в различные периоды и, по-видимому, различна для разных сезонов. Накопленные к настоящему времени в

ЦАО материалы систематических измерений характеристик ледяных ядер и общего атмосферного аэрозоля позволяют проанализировать связь ледяных ядер с размерами частиц на большем массиве данных.

Из 11-летнего периода аэрозольных измерений, проводящихся ЦАО в г. Долгопрудном Московской области с 1987 г., были выбраны серии систематических измерений продолжительностью от одного до нескольких месяцев, во время которых одновременно с концентрацией ЛЯ измерялись общая концентрация ядер Айткена (счетчик Шольца), спектр размеров частиц в диапазоне 0,01–1 мкм (электрический анализатор фирмы TSI, модель 3030) и спектр крупных ядер в диапазоне 0,3–100 мкм (прибор ПКЗВ-906). Из этих серий были отобраны периоды наиболее надежной работы прибора ПКЗВ-906, прошедшего периодическую поверку и настройку в организации-изготовителе. Всего для анализа было отобрано 15 мес, в которые вошли две полугодовые (январь–июнь) серии измерений, выполненные в 1994 и 1997 гг., и 3 мес измерений летом и осенью 1993 и 1994 гг.

Измерения проводились в рабочие дни с 9 до 10.30 утра. Отбор проб атмосферного воздуха производился с высоты 12 м над уровнем земли. Воздух засасывался в аэрозольный резервуар объемом 1 м³ в лабораторном помещении, откуда одновременно отбирались пробы во все измерительные приборы. Концентрация ледяных ядер измерялась облачной камерой «САЛЯ» [7] при постоянной температуре – 20 °С. Общее число одновременных измерений дисперсных и льдообразующих характеристик атмосферного аэрозоля, включенных в анализ, составило 323.

Полученные данные анализировались по месяцам. Для каждого месяца были определены коэффициенты корреляции концентрации ледяных ядер с концентрациями атмосферных аэрозольных частиц в 8 диапазонах размеров (от 0,01 до 1 мкм), измеренных анализатором TSI-3030, и общей концентрацией

частиц по этому прибору, а также между концентрациями ЛЯ и концентрациями крупных ядер – общей и в 6 размерных диапазонах (от 0,3 до 10 мкм), измеренных прибором ПКЗВ-906. Имеющийся в этом приборе диапазон 10–100 мкм был исключен из анализа ввиду малого числа таких частиц в атмосферном аэрозоле. Рассчитывался также коэффициент корреляции концентрации ЛЯ с концентрацией ядер Айткена, измерявшийся счетчиком Шольца.

При анализе совокупности полученных корреляционных связей вначале были выделены и рассмотрены случаи обнаружения коэффициента корреляции $R \geq 0,5$, условно принятого за пороговую величину значимой корреляции. Рассмотрение частоты обнаружения и распределения $R \geq 0,5$ по диапазонам размеров частиц показало, что из 15 мес измерений значимая корреляция концентрации ЛЯ с концентрациями аэрозольных частиц тех или иных размеров существовала в 12 мес. В остальных все коэффициенты корреляции были меньше 0,5. В 10 мес была найдена значимая корреляция концентрации ЛЯ с концентрациями частиц размером более 0,3 мкм, в 8 мес – с концентрациями частиц из диапазона TSI-3030 (0,01–1 мкм) или с концентрацией ядер Айткена. В 8 из 10 мес корреляция ЛЯ наблюдалась одновременно с числом крупных частиц того или иного размера из диапазона ПКЗВ-906 (0,3–10 мкм) и концентрацией частиц из диапазона 0,01–1 мкм, в 2 мес концентрация ЛЯ коррелировала только с концентрациями крупных частиц.

Не было месяца, когда ЛЯ коррелировали бы с частицами размером $0,01 < d < 1$ мкм и не коррелировали бы с крупными частицами. В 5 мес концентрации ледяных ядер коррелировали одновременно с концентрацией ядер Айткена, концентрацией крупных частиц и частиц размером 0,01–1 мкм. В 3 мес концентрации ЛЯ не коррелировали с концентрацией ядер Айткена, в то время как они коррелировали с концентрациями крупных ядер из диапазона ПКЗВ-906 и мелких из диапазона TSI-3030. В 1 мес концентрации ЛЯ коррелировали с концентрацией ядер Айткена ($R = 0,51$), в то время как значимая корреляция с крупными частицами и частицами $0,01 < d < 1$ мкм отсутствовала.

Сравнение значений коэффициентов корреляции показало, что из 12 мес, когда наблюдалась значимая корреляция числа ЛЯ с числом частиц каких-либо размеров, в 7 мес степень корреляции ЛЯ была выше с концентрацией крупных частиц (ПКЗВ-906). В 5 мес она была выше с концентрацией мелких ядер (из диапазона TSI-3030 или ядер Айткена). Максимальные значения коэффициента корреляции ЛЯ с частицами тех или иных размеров составили 0,87 для крупных частиц (ПКЗВ-906), 0,87 – для частиц диапазона TSI-3030 и 0,75 – для ядер Айткена. В целом рассмотрение совокупности коэффициентов корреляции больше 0,5 хотя и показало некоторую преимущественную корреляцию концентрации ледяных

ядер с крупными частицами, но не обнаружило четкой связи ледяных ядер с грубодисперсной фракцией атмосферного аэрозоля.

Учитывая, что диапазоны размеров частиц, регистрируемых приборами ПКЗВ-906 и TSI-3030, частично перекрываются, на следующем этапе были определены средние коэффициенты корреляции ЛЯ с концентрациями частиц в неперекрывающихся диапазонах – от 0,02 до 0,3 мкм (измерявшихся TSI-3030 и названных «средними» частицами) и от 0,5 до 10 мкм, измерявшихся ПКЗВ-906 («крупные» частицы).

Коэффициенты корреляции концентрации ЛЯ с концентрациями аэрозольных частиц в этих размерных диапазонах, а также с концентрациями ядер Айткена показаны на рис. 1 для полугодических серий измерений 1994 и 1997 гг.

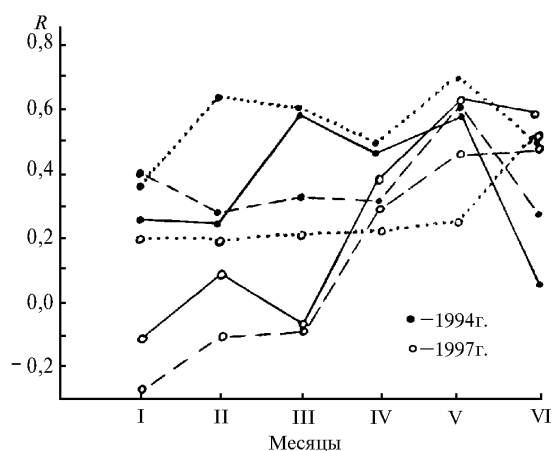


Рис. 1. Коэффициенты корреляции концентраций ЛЯ с концентрациями ядер Айткена (точечные линии), «средних» (штриховые) и «крупных» (сплошные линии) частиц в полугодических сериях измерений в 1994 и 1997 гг.

На рис. 2 приведены максимальные значения коэффициентов корреляции ЛЯ, наблюдавшиеся в пределах тех же диапазонов размеров частиц.

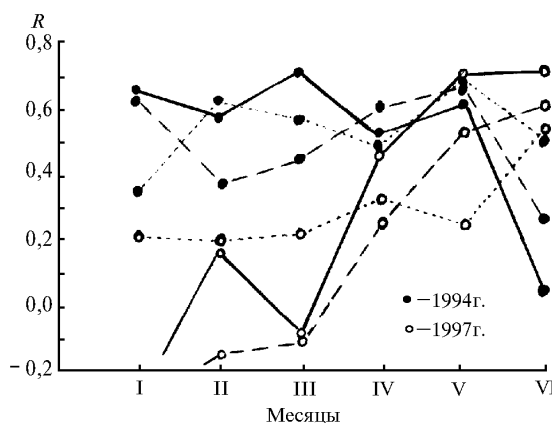


Рис. 2. Максимальные значения коэффициентов корреляции ЛЯ с концентрациями аэрозольных частиц в диапазонах «крупных» (сплошные линии) и «средних» (штриховые) частиц. Точечные линии – коэффициенты корреляции ЛЯ с концентрациями ядер Айткена

В таблице даны такие же средние и максимальные значения коэффициентов корреляции для месяцев измерений в 1993 и 1994 гг. На рис. 1–2 и в таблице приведены все коэффициенты корреляции, включая значения R меньше 0,5.

Средние и максимальные значения коэффициентов корреляции концентраций ЛЯ с концентрациями частиц разных размерных диапазонов по измерениям 1993 и 1994 гг.

Частицы	Значения	1993 г.				1994 г.
		Месяц				X
		VII	X	XI	X	
«Крупные»	Средние	0,64	0,74	-0,21	0,82	
	максимальные	0,71	0,79	-0,27	0,87	
«Средние»	Средние	0,8	0,8	0,47	0,57	
	максимальные	0,82	0,87	0,64	0,82	
Ядра Айткена		0,75	0,65	0,40	0,69	

Анализ представленных на рис. 1 и 2 и в таблице коэффициентов корреляции приводит к некоторым выводам. Корреляция ледяных ядер с размерами атмосферных аэрозольных частиц значительно варьирует как в течение одного года, так и от года к году. При наличии месяцев (в основном летних и осенних) с высокой корреляцией числа ЛЯ с концентрацией аэрозольных частиц тех или иных размеров наблюдаются достаточно продолжительные периоды, когда практически отсутствует связь концентрации ЛЯ с дисперсным составом аэрозоля (январь–март 1997 г.).

Преимущественная корреляция ледяных ядер с крупными аэрозольными частицами не является постоянно наблюдаемой закономерностью. Хотя в отдельные месяцы корреляция между концентрацией ЛЯ и концентрацией аэрозольных частиц была наиболее высока в диапазоне «крупных» частиц (май–июнь 1997 г., октябрь 1994 г.), в целом коэффициенты корреляции ЛЯ с концентрациями частиц разных размеров оказались достаточно близки между собой. В отдельные периоды (например, январь–май 1994 г.) наблюдалась даже более высокая корреляция концентрации ЛЯ с ядрами Айткена, чем в среднем с концентрациями частиц крупного размера (см. рис. 1).

На рис. 1, 2 и в таблице обращает на себя внимание параллельный ход коэффициентов корреляции ЛЯ с концентрациями частиц разных размеров, особенно «крупных» и «средних». В периоды обнаружения высоких коэффициентов корреляции ЛЯ с «крупными» ядрами, как правило, наблюдается и значимая корреляция ледяных ядер с концентрациями «средних» и мелких частиц (июль, октябрь 1993 г.; март, май, октябрь 1994 г.; май–июнь 1997 г.).

Близкое совпадение коэффициентов корреляции ЛЯ с концентрациями частиц разных размеров могло быть объяснено наличием корреляции между концентрациями частиц, находящимися в разных участках спектра размеров. Действительно, рассмотрение коэффициентов корреляции между концентрациями ядер Айткена, «крупных» и «средних» частиц показало, что такое объяснение правомерно более чем в половине случаев. Таким образом, отсутствие выра-

женной преимущественной корреляции ЛЯ с крупными частицами и одновременная корреляция ЛЯ с крупными и мелкими атмосферными ядрами только отчасти могут свидетельствовать о равномерном распределении ледяных ядер в спектре размеров атмосферного аэрозоля.

Интерес вызывают периоды отсутствия корреляции ледяных ядер с концентрациями частиц всех размерных диапазонов. В поисках объяснения таким периодам были рассмотрены преобладавшие погодные и синоптические условия в месяцы высокой и низкой корреляции ЛЯ с концентрациями аэрозольных частиц. Анализ показал, что на степень корреляции ледяных ядер с дисперсным составом атмосферного аэрозоля влияет устойчивость синоптической ситуации и погоды. В месяцы активной циклонической деятельности с частой сменой воздушных масс, ветрами и выпадением осадков коэффициенты корреляции ЛЯ с концентрациями аэрозольных частиц, в первую очередь крупных, снижаются. Показательно в этом отношении сравнение июня 1994 и июня 1997 г.

Как видно на рис. 1, 2, в июне 1997 г. коэффициенты корреляции ЛЯ с концентрациями аэрозольных частиц всех размерных диапазонов были высокими. В июне 1994 г. корреляция ЛЯ с концентрациями «крупных» и «средних» частиц практически отсутствовала. В 1997 г. в этом месяце преобладала антициклоническая ситуация с устойчивой погодой без осадков. В июне 1994 г. было отмечено прохождение четырех циклонов и смен воздушных масс. Из 20 дней измерений в 13 выпадали осадки разной интенсивности.

Аналогичная зависимость степени корреляции ЛЯ с концентрациями аэрозольных частиц от синоптической ситуации была найдена и для других месяцев измерений. Вариации общей концентрации аэрозоля и содержания в нем ледяных ядер, обусловленные сменой воздушных масс и осадками, очевидно, затуманивают связь ледяных ядер со спектром размеров частиц атмосферного аэрозоля. Этим же, по-видимому, обуславливается наблюдаемый сезонный ход коэффициентов корреляции с минимумом в зимние месяцы.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 97-05-64527).

1. Pruppacher H.R., Klett J.D. Microphysics of clouds and precipitation. D. Reidel Publ. Boston, 1980. P. 714.
2. Georgii H.W., Kleinjung E. // J. recherches atmosph. 1967. V. 3. N 4. P. 145–156.
3. Березинский Н.А., Карнов В.Г., Мяконький Г.Б. и др. Метеорология и гидрология. 1980. N 8. С. 105–111.
4. Berezinski N.A., Stepanov G.V., Khorguani V.G. // Lecture Notes in Physics. 309. Atmospheric Aerosols and Nucleation. Springer-Verlag, 1988. P. 709–712.
5. Vychuzhanina M.V., Parshutkina I.P., Plaude N.O., Potapov Je.I. // J. Aerosol Sci. 1989. V. 2. P. 1237–1240.
6. Parshutkina I.P., Plaude N.O., Vychuzhanina M.V. // J. Aerosol. Sci. 1994. V. 25. S. 1. P. 145–146.
7. Вычужанина М.В., Мирошниченко В.И., Плауде Н.О. // Оптика атмосферы и океана. 1997. Т. 10. N 5. С. 1–6.

N.O. Plaude and M.V. Vyshuzhanina. **Correlation between Ice-forming Properties and Size of Atmospheric Aerosol Particles.**

Analyzed in this paper are the results of the simultaneous measurements of atmospheric ice nuclei concentration, Aitken nuclei concentration, and aerosol particle size spectrum within 0.01 to 10 mm range, made in Moscow Region in 1993–1997.

Based on the measurement data for 15 months, it is shown that ice nuclei concentration does not always correlate predominantly with the concentration of large aerosol particles. In many cases, ice nuclei correlation with Aitken nuclei is prevalent or high correlation of ice nuclei is observed with both large and small particles' concentrations. Periods with no correlation detected between ice nuclei concentration and atmospheric aerosol dispersity were also observed, which coincided with periods of frequent changes in weather and synoptic conditions.