

К.П. Куценогий

МОНИТОРИНГ АТМОСФЕРНЫХ АЭРОЗОЛЕЙ СИБИРИ

Представлены результаты систематического исследования атмосферных аэрозолей в Сибири.

К настоящему времени известно, что спектр размеров аэрозолей в Сибири имеет типичную трехмодовую структуру, хорошо соответствующую модели континентального аэрозоля фоновых территорий. Субмикронная фракция имеет отчетливый суточный и сезонный цикл. Создана полуэмпирическая модель этого процесса, хорошо описывающая экспериментальные данные. Получены данные об ионном составе аэрозолей и осадков и их сезонной динамике.

Рентгенофлуоресцентным методом получены данные о многоэлементном составе атмосферных аэрозолей. Определены основные компоненты грубодисперсной фракции, связанные с почвенно-эрозионными процессами образования аэрозолей. Используя микрондовую методику анализа индивидуальных аэрозольных частиц, выделено до 9 типов источников аэрозольных частиц в Сибирском регионе. Показано, что этот метод позволяет уже на ранней стадии выделять вклад от антропогенной нагрузки.

Аэрозоли играют важную роль во многих атмосферных процессах. Они определяют качество атмосферного воздуха, процессы облако- и туманообразования, оказывают существенное влияние на выпадение осадков и видимость, на климат, а также на здоровье людей и животных.

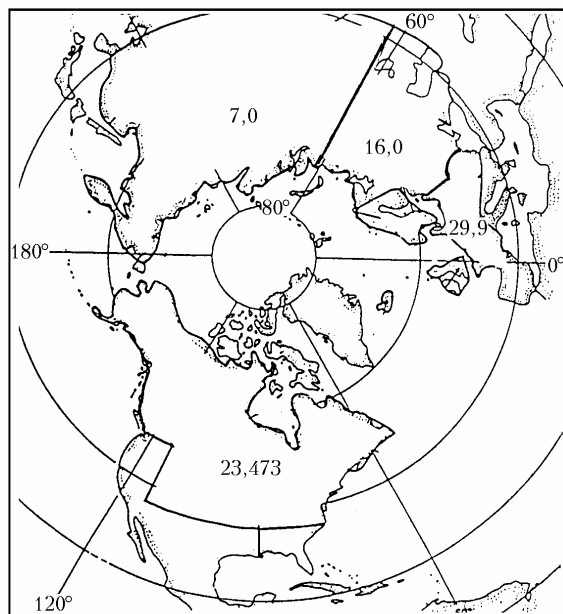
Наиболее важными классами атмосферных аэрозолей являются морской и континентальный. Последний в настоящее время исследован хуже. Это связано, в частности, с большим разнообразием ландшафтов на суше. Одним из практически неизученных регионов является Сибирь. Она покрывает огромную территорию азиатского континента, на которой расположены различные почвенно-климатические зоны. Северная граница Сибири охватывает большую часть Арктики.

В последние 15 лет в рамках Международного проекта «Арктическая дымка» ведутся детальные исследования аэрозолей Арктического региона [1-4]. В результате этих исследований выяснено, что многие свойства аэрозолей Арктики связаны с дальним переносом (более 1000 км) частиц, образовавшихся при эмиссии газовых и аэрозольных примесей на удаленных территориях континентов. В частности, по результатам этих исследований сделан вывод о том, что от 20 до 50% загрязнения Арктического региона связано с выбросами с территорий Сибири, Казахстана и Урала [5,6].

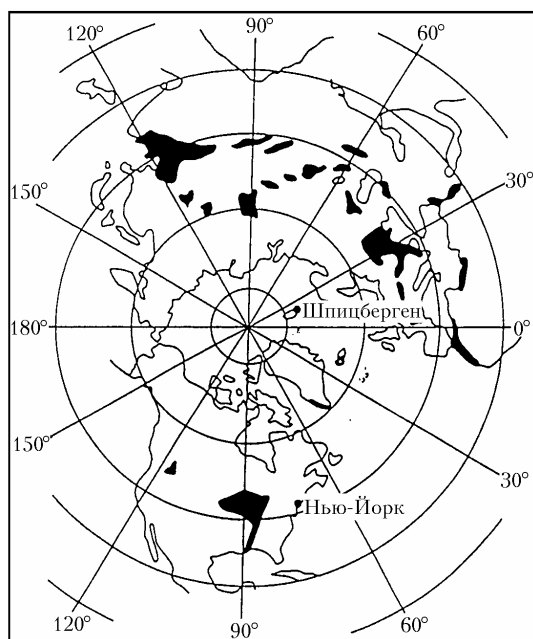
Иллюстрацией этого может служить информация, представленная на рис. 1. На нем показана карта Северного полушария, на которой нанесены оценочные данные о распределении возможных источников антропогенной эмиссии SO_2 (рис. 1, а), а также характер распределения наиболее крупных территорий с лессовыми почвами, которые могут являться мощными источниками пылевых бурь (рис. 1, б). Так, из данных, показанных на рис. 1, а, следует, что на территории Сибири антропогенные выбросы SO_2 составляют около 10% от общих выбросов этой газообразной примеси в Северном полушарии. Из рис. 1, б видно, что площадь лессовых почв, опоясывающих Сибирь, составляет значительную долю от общей территории легко эрозирующих почв Северного полушария.

Таким образом, на территории Сибири могут формироваться очень мощные потоки атмосферных аэрозолей. Для окончательного подтверждения полученных оценок необходимы систематические наблюдения в данных районах. Для этого был создан проект «Аэрозоли Сибири». Подробно цели и задачи проекта изложены в [7]. В рамках программы указанных исследований предусматривается организация мониторинга атмосферных аэрозолей на территории Сибири.

В данном сообщении кратко изложены основные результаты, полученные с начала реализации проекта до 1995 г.



a



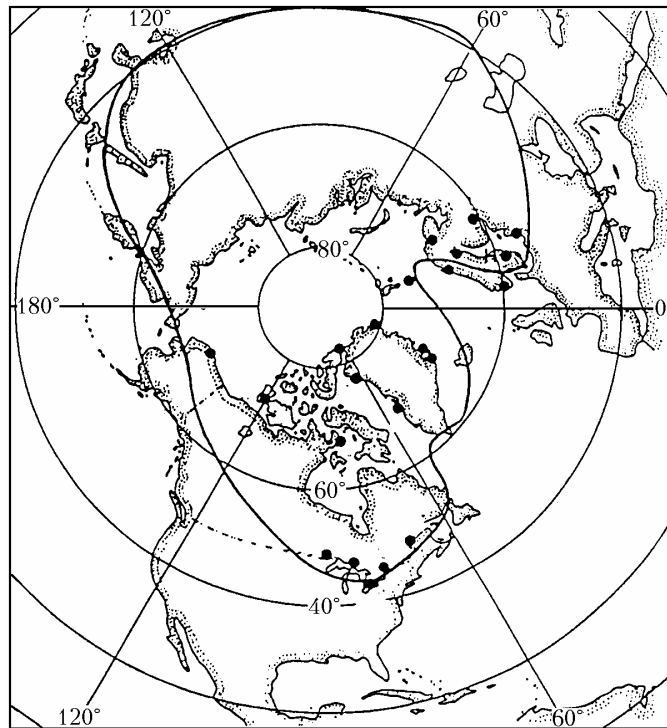
б

Рис. 1. Источники эмиссии газообразных и почвенно-эрозийных аэрозолей в Северном полушарии: *a* – (цифры) средняя мощность антропогенных выбросов SO_2 , Мт, на территории, ограниченной линиями, по [12]; *б* – (закрашенные пятна) территории лессовых почв

Рис. 2 иллюстрирует состояние мониторинга атмосферных аэрозолей в Сибири к началу реализации проекта «Аэрозоли Сибири» (рис. 2, *a*) и в настоящее время (рис. 2, *б*).

На рис. 2, *a* приведена карта, на которой представлена существующая в середине 80-х годов сеть станций фоновое мониторинга, связанная с изучением арктической дымки. В Северном полушарии размещены 22 станции, но из них нет ни одной на территории Сибири.

На рис. 2, *б* показаны пункты отбора аэрозольных проб в Сибирском регионе, которые в основном базируются на системе научных станций и стационаров Сибирского отделения Академии наук России.



a



б

Рис. 2. Сеть мониторинга аэрозолей арктической дымки (а) по данным из [12] и аэрозолей Сибири (б): ■ – большие города региона; □ – места отбора проб: 1 – Карасук; 2 – Ключи; 3 – Погорельский Бор; 4 – Тарко-Сале; 5 – Самбург; 6 – Тикси; 7 – Листвянка; 8 – Танхой; 9 – Усть-Кан; 10 – Монды

Свойства аэрозолей определяются спектром размеров, концентрацией и химическим составом частиц, поэтому измерению этих характеристик уделялось наибольшее внимание.

С помощью сетчатой диффузионной батареи, счетчика ядер конденсации, импакторной техники и комплекса методик было показано, что спектр аэрозолей фоновых районов Сибири хорошо описывается трехмодовым распределением Витби с характерным видом, типичным для удаленных континентальных районов [8].

На рис. 3, *a* квадратиками и вертикальными линиями нанесены экспериментальные данные по измерению спектра размеров в районе оз. Байкал (линии) и в Новосибирской области (квадратики). Сплошной линией показан спектр размеров для континентального фоновоза [8].

Из рис. 3 видно, что нет разницы в спектрах размеров аэрозолей в Новосибирской области и в районе оз. Байкал. Так как эти территории находятся на расстоянии примерно 1300 км друг от друга, то можно говорить о едином аэрозоле Сибирского региона. Этот тип аэрозоля хорошо соответствует континентальному аэрозолю удаленных территорий.

На основе динамики суточного хода счетной концентрации и спектра размеров были выявлены основные закономерности изменения субмикронной фракции. Показано, что найденные закономерности можно описать, исходя из представлений о фотохимической конверсии газовых предшественников в аэрозольные частицы, учитывая суточное изменение высоты пограничного слоя. Согласие между результатами теоретического анализа и данными экспериментов видно из рис. 3, б. Эти же представления позволяют качественно объяснить динамику суточного (рис. 3, в) и сезонного (рис. 3, з) циклов изменения концентрации аккумуляционной моды ($0,1 < d < 1$ мкм). Синхронные измерения ионного состава аэрозолей в зимнее и летнее время дают возможность выявить основные составляющие и массовую долю водорастворимых компонентов в аэрозольных частицах и оценить их долю в общей массе аэрозолей.

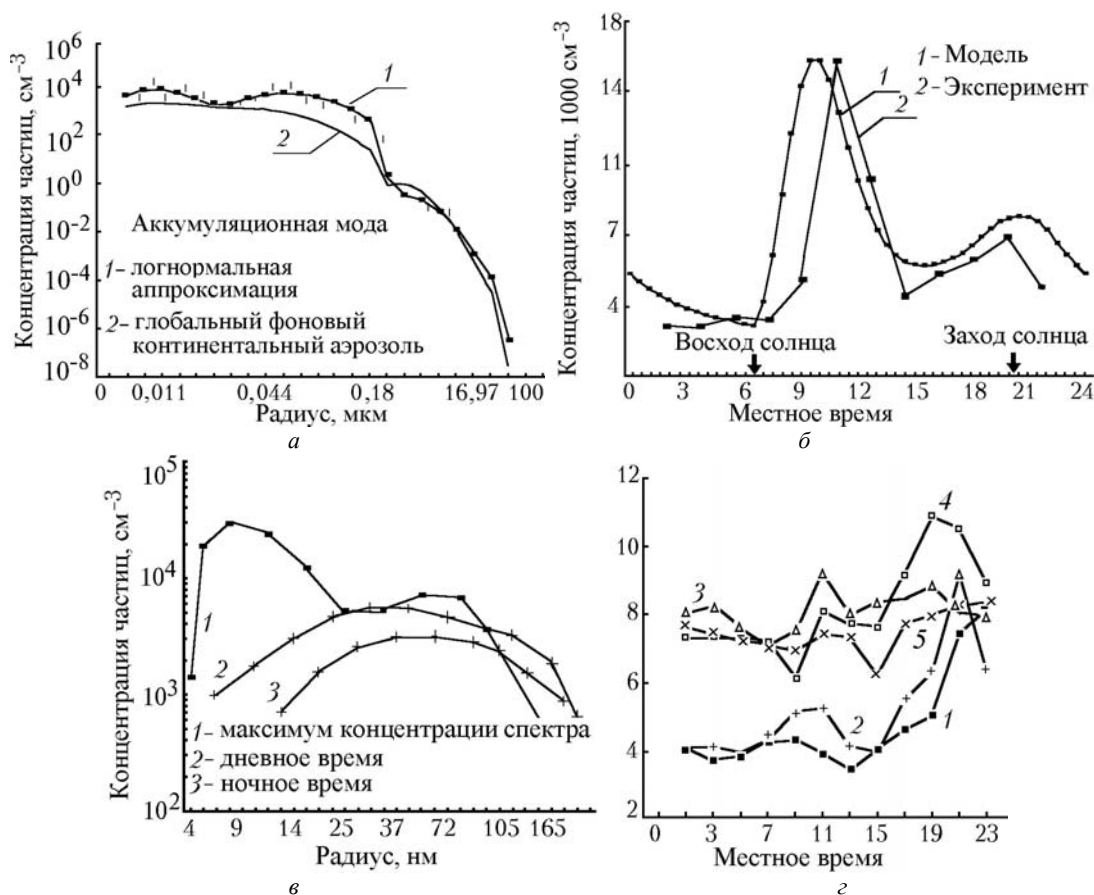


Рис. 3. Спектр атмосферных аэрозолей Сибири (а); динамика суточного хода счетной концентрации субмикронной части атмосферы в Сибири (б). Динамика суточного изменения спектра размеров субмикронной фракции аэрозолей (в); сезонное изменение суточного хода светорассеяния на субмикронной фракции (з): 1 – июнь, июль; 2 – август, сентябрь; 3 – октябрь, ноябрь; 4 – декабрь, январь; 5 – февраль, март

На рис. 4 показана динамика изменения ионного состава аэрозолей в Новосибирской области в летний сезон.

Из рис. 4 видно, что среднесуточная концентрация сульфатов и нитратов в различных местах, удаленных друг от друга на расстоянии 450 км, изменяется симбатно, следовательно, эти компоненты связаны с процессами регионального или глобального масштабов. Средние значения концентраций этих ионов в летний и зимний сезоны различаются в несколько раз, что, по-видимому, связано прежде всего с изменением толщины пограничного слоя атмосферы в летний и зимний сезоны.

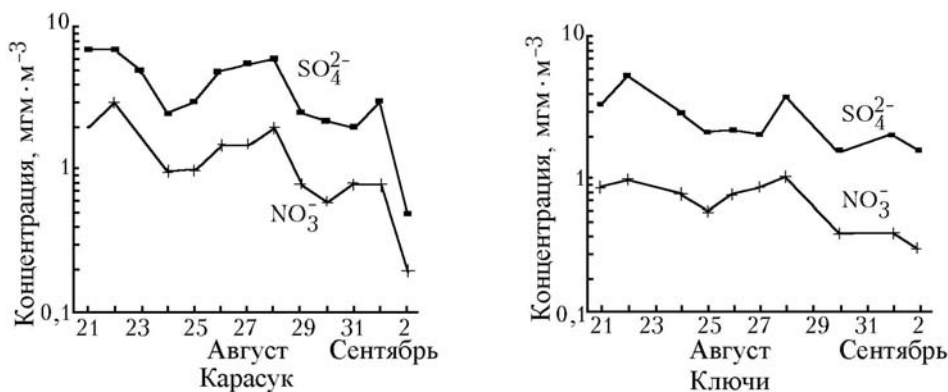


Рис. 4. Динамика изменения ионного состава аэрозолей в Новосибирской области – Карасук, Ключи

Одновременные наблюдения за сезонным изменением ионного состава атмосферных аэрозолей и осадков (рис. 5) показывают, что ионный состав аэрозолей слабо изменяется в разные времена года. Существенно большее различие отмечено в ионном составе осадков. Отчетливо также выделяются периоды, когда осадки имеют либо кислотный, либо щелочной характер. В тоже время среднее значение рН осадков (как жидких – дожди, так и твердых – снег) близко к равновесному значению. Из анализа этих данных можно сделать выводы о том, что состав осадков определяется не только вымыванием аэрозольных частиц, но и процессами гетерогенного взаимодействия с газообразными примесями. Кроме того, ионный состав осадков определяется предысторией движения воздушных масс.

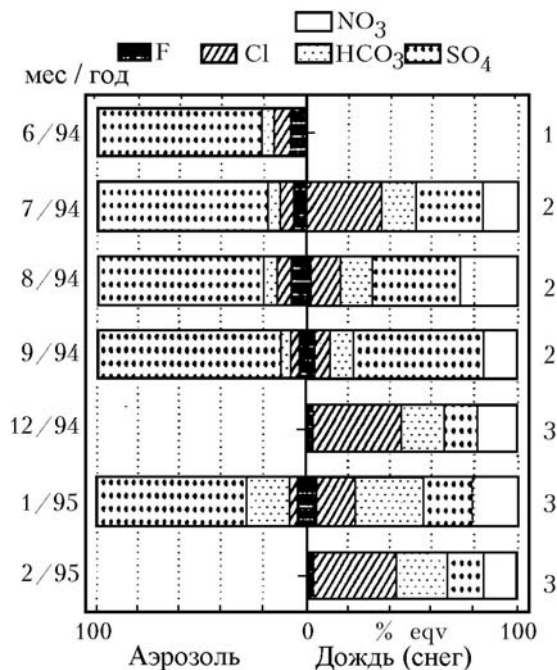


Рис. 5. Сезонные изменения ионного состава аэрозолей и осадков в Новосибирской области

Сочетание импакторной техники с рентгенофлуоресцентным анализом с использованием синхротронного излучения (РФА – СИ) позволило выяснить ряд закономерностей в поведении многоэлементного состава аэрозолей [9]. В табл. 1 представлены результаты анализа многоэлементного состава аэрозолей в одном из фоновых районов Новосибирской области (п. Ключи).

Исходя из характера распределения содержания элементов в аэрозольных частицах различного размера, вся совокупность элементов может быть разделена на 3 класса. Первый класс – когда основное количество содержится в грубодисперсной фракции ($d > 1$ мкм). Второй класс – когда более 60% массы элемента находится в субмикронной фракции ($d < 1$ мкм). Третий класс занимает промежуточное положение. Если нормировать содержание различных элементов на концентрацию Fe и сравнить указанное отношение с содержанием этих элементов в земной

коре, то заметно различие в типе частиц, относящихся к указанным ранее классам. Первый класс – это частицы почвенно-эрозионного происхождения, второй – частицы, образованные антропогенными источниками, и третий класс – частицы смешанной природы.

Таблица 1

Многоэлементный состав аэрозолей в Ключах, 1993 г. ВИ и РФА–СИ. Коэффициент обогащения

Номер	d50, мкм	Ca, Ti, Fe, Ni, Rb, Sr, Y, Zr	Sc, V, Cu, Br, Nb, Mo, Ba	Mn, Zn, As, Pb
Элементный состав аэрозольных частиц				
1	> 6,6	26,1	11,5	11,3
2	6,6 – 3,8	44,2	12,7	21,1
3	3,8 – 1	26,1	10,8	30,1
Фильтр	< 1	2,4	63,8	36,4
Коэффициент обогащения				
1	> 6,6	1,4	18,2	24,9
2	6,6 – 3,8	1,3	11,5	24,5
3	3,8 – 1	1,4	21,4	61,6
Фильтр	< 1	0,4	150,2	162,7

Таблица 2

Анализ многоэлементного состава атмосферных аэрозолей в Новосибирской области методом ЕРХМА

Карасук, зима		Карасук, лето		Ключи, лето	
Тип частиц	Состав, %	Тип частиц	Состав, %	Тип частиц	Состав, %
Si, Al, Fe	57,4	Si, Al, Fe	64,0	Si, Al, Fe	53,5
Ca, S	11,4	Ca, S	10,4	Ca, S	19,6
Si, S, Fe	11,4	Fe, Si	10,4	Fe, Zn, Ti	8,5
Fe	9,1	Cl, K, P, S	7,1	Fe	8,0
Pb	5,2	Ca, Si	6,8	P, S, K	3,9
S	3,5	Pb	1,3	S	3,5
Zn	1,2			K, Cl	2,1
Ti	0,7			Pb	0,9

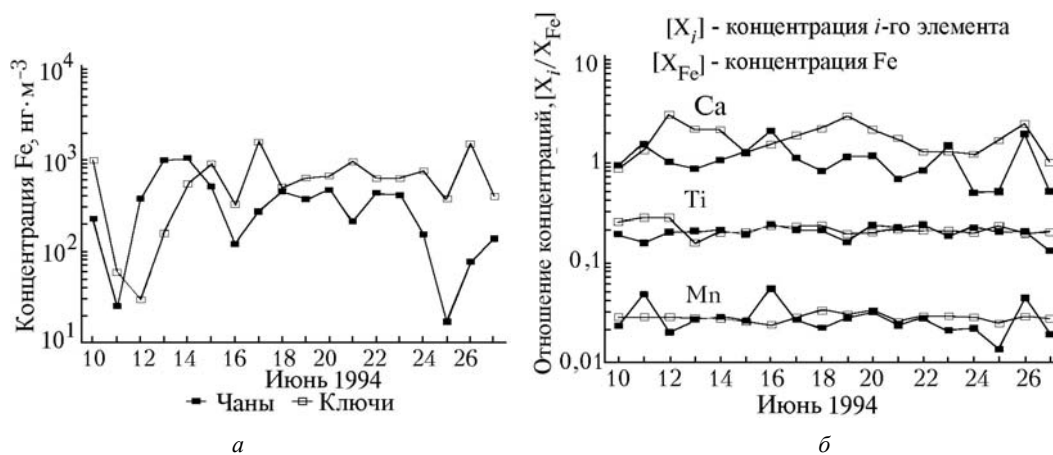


Рис. 6. Динамика изменения Fe в Ключах и Чанях (а); динамика изменения $X_{fe} = X_i/X_{Fe}$ для Ca, Ti и Mn (б)

На рис. 6, а показана динамика изменения концентрации Fe в двух пунктах Новосибирской области, отстоящих на расстоянии примерно 450 км друг от друга. Из рисунка видно, что амплитуда колебания концентрации железа в каждой из точек наблюдения достигает двух порядков. Временные изменения в указанных пунктах очень похожи друг на друга. Из этого можно сделать вывод, что в летний период почвенно-эрозионная компонента аэрозолей в Сибири носит региональный, а возможно, глобальный характер, что подтверждают также данные, приведенные на рис. 6, б. На этом рисунке показано изменение относительной концентрации ряда элементов. В качестве элемента сравнения выбрано железо. Видно, что относительное содержание Ca, Ti, и Mn в грубодисперсной фракции аэрозолей практически постоянно. Это указывает на постоянство

элементного состава почвенно-эрозионной компоненты по всей Новосибирской области. Более детальную информацию о составе атмосферных аэрозолей в Сибири удалось получить с помощью микрозондовой методики анализа многоэлементного состава индивидуальных аэрозольных частиц. Статистический анализ этих данных позволяет выявить до 9 различных источников аэрозолей [10, 11]. Пример такого анализа приведен в табл. 2.

Таким образом, результаты анализов показывают, что созданная система мониторинга атмосферных аэрозолей в Сибири позволяет получить комплексное представление о характеристиках аэрозольных частиц, их структуре и составе, выявить основные источники атмосферных аэрозолей Сибирского региона и оценить масштабы пространственно-временного изменения параметров аэрозолей.

1. Atmospher. Environ. Special Issue on Arctic Air Chemistry. 1981. V. 15. P. 1345–1516.
2. Atmospher. Environ. Special Issue on Arctic Air Chemistry. 1985. V. 19. P. 1987–2208.
3. Atmospher. Environ. Special Issue on Arctic Air Chemistry. 1989. V. 23. P. 2345–2638.
4. Atmospher. Environ. Special Issue of Atmospheric Environment on Arctic Air, Snow and Ice Chemistry. 1993. V. 27A. N 17/18. P. 2695–3038.
5. Rahn K. A. Progress in Arctic air Chemistry 1980–1984 // Atmospher. Environ. 1985. V. 19. N 12. P. 1987–1994.
6. Akeredoln F.A., Barrie L.A., Olson M.P., Oikawa K.K., Pacyna J.M., Keeler G.J. The flux of anthropogenic trace metals into Arctic from the midlatitudes in 1979/80 // Atmospher. Environ. 1994. N 8. P. 1555–1572.
7. Koutzenogii K. P. Project «Aerosols of Siberia», the first results // Atmospheric and Oceanic Optics. 1994. V. 7. N 8. P. 542–545.
8. Koutzenogii P. Measurements of remote continental aerosol in Siberia: Ph. D. dissertation, Johannes–Gutenberg University in Mainz, 1992. 106 p.
9. Baryshev V.B., Bufetov N.S., Koutzenogii K.P., Makarov V.I., Smirnova A.I. // Nucl. Inst. Meth. Phys. Res. 1995. A 359. P. 297–301.
10. Van Malderen H., Van Grieken R., Khodzer T.V., Bufetov N.S., Koutzenogii K.P. // Atmospheric and Oceanic Optics. 1994. V. 7. N 8. P. 622–631.
11. Van Malderen H., Van Grieken R., Bufetov N.S., Koutzenogii K.P. Chemical Characterisation of Individual Aerosol Particles in Central Siberia // Environ. Sci. Tech. 1996. V. 30. N 1. P. 312–321.
12. Barry L. A. Arctic air pollution: an overview of current knowledge // Atmosph. Envir. 1986. V.20. P. 643–663.

Институт химической кинетики и горения СО РАН,
г. Новосибирск

Поступила в редакцию
26 января 1996 г.

K. P. Koutzenogii. **Monitoring of Atmospheric Aerosols in Siberia.**

It is shown to date, that the particle size distribution in Siberia has the typical three-mode structure well consistent with the corresponding models of the continental aerosol of background territories.

The submicron aerosol fraction has distinct daily and seasonal cycles. The semiempirical model of the process has been designed which well describes the experimental data. By means of impactor technique together with X-ray fluorescent method, using the synchrotron radiation, the data on complex composition of the atmospheric aerosol have been obtained. The main components of the coarse fraction formed due to the soil erosion have been identified. Up to 9 types of the aerosol particle sources is discerned in the Siberian region using the automated electron probe X-ray microanalysis (EPXMA) for individual aerosol particle. This method allows one to distinct the anthropogenic contribution of the different aerosol sources.