

**К.П. Куценогий**

## **ПРОЕКТ <АЭРОЗОЛИ СИБИРИ>. ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ**

Атмосферные аэрозоли играют решающую роль во многих атмосферных процессах (облако- и осадкообразование, радиационный теплообмен, видимость). Они влияют на климат и качество окружающей среды [1–18].

Свойства атмосферных аэрозолей определяются спектром размеров, концентрацией, химическим составом и структурой частиц. Диапазон размеров атмосферных аэрозолей охватывает около 5 порядков величины, концентраций – более 10 порядков [19, 20].

Чрезвычайно сложен и состав атмосферных аэрозолей [14, 21–26], поэтому различные проекты по исследованию атмосферных аэрозолей носят комплексный характер [27–36] с использованием специальной аэрозольной аппаратуры [19–20] и современной аналитической техники [37–40].

Из морских и континентальных типов атмосферных аэрозолей [15, 25] до сих пор наименее изученными остаются последние. Так, по результатам многолетних исследований до 50% массовой концентрации загрязнения арктического региона связано с аэрозолями, образованными на территории Урала, Сибири и Казахстана [26–35]. Несмотря на значительный вклад в глобальное загрязнение атмосферы аэрозолей, возникающих на территории Сибири, сведения о них еще очень отрывочны и неполны [11, 36, 41–52].

Наряду с очень разнообразными природно-климатическими зонами Сибирского региона здесь интенсивно развиваются промышленность и сельское хозяйство, являющиеся источниками различных типов аэрозолей. Из-за огромных размеров Сибирского региона в нем нерациональна система сетевого мониторинга, характерная для Европы и развитых капиталистических стран. Поэтому наиболее приемлем метод <удаленных территорий> в сочетании с методикой планируемых <маршрутов>.

### **Цель проекта**

Цель проекта заключается в изучении закономерностей образования, трансформации и переноса аэрозолей в Сибирском регионе на локальном, региональном и глобальном уровне для выяснения источников и стоков атмосферных аэрозолей и оценке их влияния на качество атмосферного воздуха, уровни загрязнения растительности, почвы и воды, скорости миграции различных веществ и элементов, в оценке воздействия аэрозолей различной природы на здоровье людей и животный мир, в выяснении влияния атмосферных аэрозолей на атмосферные процессы и климат.

### **Конкретное содержание проекта**

В проекте предусмотрены следующие разделы.

1. Организация стационарных пунктов наблюдений суточной и сезонной динамики изменения спектра размеров, концентрации и химического состава аэрозолей в Новосибирской и Томской областях, в районе оз. Байкал, в Алтайском и Красноярском краях, в некоторых промышленно развитых городах Сибири, а также специальных маршрутов исследования атмосферных аэрозолей Сибирского региона.

2. Развитие и совершенствование методик и аппаратуры для проведения комплексных исследований атмосферных аэрозолей.

3. Разработка алгоритмов и программ для математического моделирования процессов образования, трансформации и распространения аэрозолей, расчета уровней загрязнения атмосферы, растительности и почвы, а также оптимизации системы наблюдений и оперативного управления качеством воздушной среды, подверженной воздействию антропогенной нагрузки.

4. Проверка результатов на совокупности экспериментальных данных.
5. Организация банка данных по характеристикам атмосферных аэрозолей Сибирского региона.

### **Сроки реализации проекта и его структура**

По аналогии с Международными проектами, подобными данному, а также по оценкам ведущих зарубежных ученых для осуществления проекта потребуется от 10 до 15 лет. Поэтому необходимы координация всех участников проекта, оперативная оценка полученных результатов и четкая формулировка задач на текущий период. Проект носит открытый характер и может привлечь тех, кто заинтересован в проведении совместных работ либо в использовании результатов, получаемых при выполнении проекта.

Ежегодно подводятся итоги деятельности и проводится корректировка конкретной программы совместных работ на следующий год.

Проект в целом и его отдельные составные части логически входят в различные региональные, российские и международные программы. Каждый участник проекта сам определяет форму и продолжительность сотрудничества.

Весь проект условно можно разбить на 5 блоков.

*1-й блок. Полевые исследования.* Он предусматривает организацию базовых пунктов наблюдений в районе оз. Байкал, Красноярском и Алтайском краях, Новосибирской и Томской областях и проведение систематических измерений атмосферного аэрозоля в заданных районах. В рамках этого же блока планируется организация комплексных целевых экспедиций в Сибирском регионе.

*2-й блок. Аналитический.* Здесь разрабатываются методики и аппаратура для отбора проб, измерения спектра размеров, концентрации и химического состава аэрозольных частиц.

*3-й блок. Математическое моделирование.* В рамках этого раздела разрабатываются алгоритмы и программы для расчета процессов образования, трансформации и переноса аэрозолей, для взаимодействия с растительностью, поверхностью воды и суши, для оптимизации характеристик измерительной аппаратуры и системы наблюдений, оценки влияния аэрозолей на атмосферные процессы, качество окружающей среды, климат, здоровье людей, а также для обработки экспериментальных данных.

*4-й блок. Лабораторно-стендовые исследования.* Здесь планируются лабораторно-стендовые исследования элементарных стадий образования аэрозолей, свойств аэродисперсных систем, а также механизма взаимодействия аэродисперсных систем с биологическими объектами и системами.

*5-й блок. База данных.* Организация базы данных по характеристикам атмосферных аэрозолей, их свойствам и методам исследования аэродисперсных систем.

В настоящее время в той или иной мере в проекте участвуют 16 институтов Сибирского отделения, пять институтов Госкомприроды России, четыре университета России, а также зарубежные партнеры из США, Германии, Бельгии, Австрии, Швеции, Венгрии.

При реализации проекта в первую очередь используется научный потенциал участников совместных работ, их материальная база. Проект пользуется большой организационной, моральной и финансовой поддержкой Сибирского отделения РАН. В организационном плане огромна роль Сибирского отделения РАН в создании различных Международных центров и развитой сети стационаров и станций в различных регионах Сибири [53, 54].

Фактически проект <Аэрозоли Сибири> начался в 1990 г. с организации совместных семинаров, визитов ведущих зарубежных ученых в институты Сибирского отделения РАН, а также совместных экспедиций по изучению аэрозолей Сибири в район оз. Байкал и Новосибирской области.

### **Первые результаты и динамика развития исследований по проекту**

Первые предварительные результаты по исследованию аэрозолей Сибири, полученные в экспедициях 1990 и весной 1991 гг., были обсуждены на Первом международном семинаре по проекту <Аэрозоли Сибири>, прошедшем в Венском университете в августе 1991 г. [45]. На этом семинаре была признана международная значимость проекта и согласованы взаимные интересы и программа исследований на будущее. В соответствии с этими договоренностями в

1992 г. были проведены комплексные экспедиции по оз. Байкал и Новосибирской области. В Томской области исследования атмосферных аэрозолей ведутся уже на протяжении ряда лет в Институте оптики атмосферы СО РАН. В Алтайском крае экспедиционные работы по изучению атмосферных аэрозолей развернулись в 1991 г. в связи с выяснением последствий ядерных испытаний на Семипалатинском полигоне. Эти исследования проводят Институт водных и экологических проблем СО РАН и Алтайский госуниверситет. В связи со сложной экологической обстановкой в г. Кемерове исследования атмосферных аэрозолей ведутся сотрудниками Института угля СО РАН.

Весной 1993 г. Институт леса и Институт химической кинетики и горения СО РАН подготовили проект по изучению аэрозолей, образующихся при горении лесов Сибири. В июле 1993 г. в Красноярском крае состоялась первая комплексная экспедиция по изучению последствий лесных пожаров в Сибири, в которой были отобраны пробы аэрозолей, образующихся при лесном пожаре. В 1993 г. начались систематические наблюдения за динамикой суточного и сезонного изменения характеристик аэрозолей в Новосибирской области. Летом 1993 г. был проведен совместный эксперимент на самолете-лаборатории ИЛ-18 из ЦАО с участием ученых из Германии, в котором измерялась пространственно-временная структура атмосферных аэрозолей в Арктическом регионе и Новосибирской области.

Летом и осенью 1993 г. были продолжены экспедиционные исследования атмосферных аэрозолей над акваторией оз. Байкал. В этих экспедициях кроме ученых из СО РАН принимали участие ученые из США и Бельгии.

В сентябре 1993 г. в г. Новосибирске состоялся второй Международный семинар по проекту <Аэрозоли Сибири>. В семинаре наряду со специалистами из Новосибирска, Иркутска, Кемерова, Красноярска, Барнаула, Томска и Москвы участвовали ученые из США, Германии, Бельгии, Австрии [55]. На семинаре были подведены итоги исследований за 1991–1992 г. и скорректированы планы совместных исследований на 1994 и последующие годы.

Часть докладов, отражающих вопросы, обсуждаемые на семинаре, представлена в данном выпуске журнала.

### **Основные результаты, полученные в рамках проекта <Аэрозоли Сибири>**

1. Разработан и освоен комплекс методик и аппаратуры для измерения спектра размеров и концентрации аэрозолей диаметром от  $10^{-3}$  до  $10^2$  мкм [46].

2. Разработаны и освоены методики определения ионного и иного элементного состава атмосферных аэрозолей различного размера, а также методика определения спектра размеров и многоэлементного состава индивидуальных аэрозольных частиц [47–52].

3. Показано, что спектр размеров аэрозолей Сибирского региона имеет типичное трехмодовое распределение, характерное для аэрозолей континентальных территорий. Определены параметры этого распределения и выявлена природа различных мод. Показано, что самые мелкие частицы образуются в результате фотохимической конверсии газ – аэрозольные частицы. Время жизни этой фракции несколько часов. Поэтому появление мелких частиц отражает прежде всего процессы локального масштаба [44, 46]. Самые крупные частицы связаны с процессами почвенной эрозии. Подтверждением этому служит и элементный состав данной фракции. В обычных условиях появление таких частиц связано с процессами локального и регионального масштаба. Наиболее долгоживущей фракцией служат частицы диаметром от 0,1 до 1 мкм. В основном частицы этой моды связаны со старением самых мелких частиц, возникающих как в результате фотохимических превращений, так и при сжигании различных видов топлив. Этот вывод основывается на результатах изучения элементного состава аэрозолей различных размеров [47–52].

4. Предложена полуэмпирическая модель суточного изменения счетной концентрации аэрозольных частиц, в которой учитывается скорость фотохимического превращения и динамики изменения толщины пограничного слоя атмосферы. Эта модель хорошо описывает результаты полевых наблюдений [46].

5. Разработан алгоритм решения системы уравнений Смолуховского, позволяющий рассчитывать кинетику аэрозолеобразования при высоких пересыщениях (фотохимическое аэрозолеобразование, образование аэрозолей при горении) [56]. Проведено сравнение развитой модели с результатами лабораторных опытов по фотохимическому аэрозолеобразованию в

смеси с галоидбензолами [57]. Результаты теоретических расчетов кинетики аэрозолеобразования хорошо согласуются с данными экспериментальных исследований [57].

6. Разработаны алгоритмы и программы для расчета поля концентраций и осадков от различного типа источников аэрозолей при решении задач локального масштаба. Предложенные модели позволяют решать задачи оптимизации системы наблюдений и режимов управления источниками [58–60].

1. Мазин И. П., Шметер С. М. Облака, строение и физика образования. Л.: Гидрометеоздат, 1983. 279 с.
2. Радиация в облачной атмосфере. / Под ред. Е.М. Фейгельсон. М.: Наука, 1981. 280 с.
3. Оптика атмосферы и аэрозоль. / Под ред. Е.М. Фейгельсон. М.: Наука, 1986. 226 с.
4. Ивлев Л. С., Андреев С. Д. Оптические свойства атмосферных аэрозолей. Л.: ЛГУ, 1986. 259 с.
5. Зуев В.Е., Креков Г.М. Оптические модели атмосферы. Л.: Гидрометеоздат, 1986. 256 с.
6. Астауров М.Л., Будыко М.И., Винников К.Я. и др. Вулканы, стратосферный аэрозоль и климат Земли. Л.: Гидрометеоздат, 1986. 256 с.
7. Будыко М.И., Голицин Г.С., Израэль Ю.А. Глобальные климатические катастрофы. М.: ГИМИЗ, 1986. 159 с.
8. Последствия ядерной войны. Физические и атмосферные эффекты. / Под ред. А.А. Дородницына, Г.Л. Стенчикова. М.: Мир, 1988. 391 с.
9. Последствия ядерной войны. Воздействие на экологию и сельское хозяйство. / Под ред. А.А. Баева, Ю.М. Свирижева. М.: Мир, 1988. 551 с.
10. Кондратьев К.Я., Москаленко Н.И., Поздняков Д.В. Атмосферный аэрозоль. Л.: Гидрометеоздат, 1983. 224 с.
11. Белан Б.Д., Гришин А.И., Матвиенко Н.И. и др. Пространственная изменчивость характеристик атмосферного аэрозоля. Наука: Новосибирск, 1989. 152 с.
12. Израэль Ю.А., Назаров И.М., Прессман А.Я. и др. Кислотные дожди. Л.: Гидрометеоздат, 1983. 206 с.
13. Acid Precipitation. Formation & Impact on Terrestrial Ecosystems. / Ed. by C.J. Brandt, VDI-Kommission, Reinhaltung der Luft, Verein Deutscher Ingenieur, 1987. 282 p.
14. Scenfeld J. H. Atmosph. Chem. & Phys. of Air Pollution, John & Son, 1986. 738 p.
15. Аэрозоль и климат. / Под ред. К.Я. Кондратьева. Л.: Гидрометеоздат, 1991. 540 с.
16. Aerosols and climate. / Ed. by P.V. Hobbs, M. Patrick, Mc Cormick. AD, 1988. 485 p.
17. d'Almeida G. A., Koepke P., Shettle E. P. Atmospheric Aerosols Global Climatology and Radiative Characteristics. AD, 1991. 263 p.
18. Control and Fate of Atmospheric Trace Metals. / Ed. by J.M. Pacyna, B. Ottar. Kluwer Academic Publishers, 1989. 382 p.
19. Куценогий К.П. // Аэрозоль и климат. Л.: Гидрометеоздат, 1991. Гл. 1. С. 17–51.
20. Kutzenogii K. P. // J. Electrostatic. 1989. V. 23. P. 371–379.
21. Исидоров В.А. Органическая химия атмосферы. Л.: Химия, 1985. 264 с.
22. Гетерогенная химия атмосферы. / Под ред. Д.Р. Шрайра. Л.: Гидрометеоздат, 1986. 492 с.
23. Atmosphärische Spurenstoff. / Heraus gegeben von Ruprecht Jaenicke. VCH, 1987. 443 p.
24. Atmospher. Environ. 1978. N 1–3. P. 1–796.
25. Jaenicke R. Aerosol Physics and Chemistry. / In: Landolt Bornstein Numerical Data & Functional Relationships in Science & Technology New Series Group V: Geophysics & Space Research Volum 4 Meteorology Subvolum b, Fisher G. (ed.): Physical & Chemical Properties of the air. 1988. P. 391–457.
26. Rahn K. A. Progress in Arctic air Chemistry. 1980–1984. // Atmosph. Envir. 1985. V. 19. N 12. P. 1987–1994.
27. First Ibero American conference on the atmospheric environment. // Atmospher. Environ. 1993. V. 27A. N 3. P. 291–464.
28. The Fourth International Conference on Carbonaceous Particles in the Atmosphere. // Atmospher. Environ. 1993. V. 27A. N 8. P. 1167–1377.
29. A Joint Soviet-American experiment for the study of Asian desert dust and its impact on local meteorological conditions and climate. // Atmospher. Environ. 1993. V. 27A. N 16. P. 2467–2552.
30. Atmospher. Environ. Special Issue on Arctic Air Chemistry. 1981. V. 15. P. 1345–1516.
31. Atmospher. Environ. Special Issue on Arctic Air Chemistry. 1985. V. 19. P. 1987–2208.
32. Atmospher. Environ. Special Issue on Arctic Air Chemistry. 1989. V. 23. P. 2345–2638.
33. Atmospher. Environ. Special Issue of Atmospheric Environment on Arctic Air, Snow and Ice Chemistry. 1993. V. 27A. N 17/18. P. 2695–3038.
34. Geophysical Research Letters. Special Issue on the Arctic Gas and Aerosol Sampling Programm (AGASP). 1984. V. 11. P. 359–472.
35. J. of Atmosph. Chem. Special Issue on Arctic Haze and Arctic Gas and Aerosol Sampling Programm II. 1989. V. 9. P. 3–397.
36. Оптика атмосферы и океана. / 1992. Т. 5. N 6. С. 561 – 672.
37. Тельдеши Ю., Яковлев Ю.В., Билимович Г.Н. Диагностика окружающей среды радиоаналитическими методами. М.: Энергоатомиздат, 1985. 193 с.
38. Смит Л.Е. // Химия окружающей среды. / Под ред. Д.О. Бокриса, М.: Химия, 1982. С. 580–649.
39. Хроматографический анализ окружающей среды. / Под ред. Р.Л. Гроба. М.: Химия, 1979. 606 с.
40. Xhoffer C., Wouters L., Artoxo P., van Put A., van Grieken R. // Environ. Partic. / Ed. by J. Buffle, van Leenwen H. 1992. V. 1. Ch. 3. P. 107–143.
41. Зуев В.Е., Белан Б.Д., Задде Г.О. Оптическая погода. Новосибирск: Наука, 1990. 191 с.
42. Мониторинг состояния озера Байкал. / Под ред. Ю.А. Израэля, Ю.А. Анохина / Л.: Гидрометеоздат, 1991. 261 с.
43. Мониторинг и оценка состояния Байкала и Прибайкалья. / Под ред. Ю.А. Израэля, Ю.А. Анохина / Л.: Гидрометеоздат, 1991. 238 с.

44. Bashurova V.S., Dreiling V., Khodzher T.V., Jaenicke R., Koutsenogii K.P., Koutsenogii P.K. et al. // *J. Aeros. Sci.* 1992. V. 23. N 2. P. 191–199.
45. Workshop SIBERIAN HAZE, 26–29 August, 1991, Vienna. 88 p.
46. Koutsenogii P. Measurements of remote continental aerosol in Siberia. Ph. D. dissertation, Johannes-Gutenberg University in Mainz, 1992. 106 p.
47. Koutsenogii P. K., Bufetov N. S., Drozdova V. I., Golobkova V. L., Khodzher T.V., Koutsenogii K. P. et al. // *Atmosph. Envir.* 1993. V. 27A. N 11. P. 1629–1633.
48. Барышев В.В., Буфетов Н.С., Жунусбеков А.М., Куценогий К.П., Макаров В.И. Анализ элементного состава аэрозолей. Отчет Сибирского Международного центра синхротронного излучения за 1991–1992 гг. Новосибирск: ИЯФ СО РАН, 1993. С. 124–128.
49. Baryshev V.B., Bufetov N.S., Dolbnya I.P., Koutsenogii K.P., Zolotarev K.V. Elemental Analysis of Aerosol Particles Using Synchrotron Radiation. Abstract Book of the 4-th Int. Conference <X-ray Microscopy-93>. S. 5.
50. Куценогий К.П., Буфетов Н.С., Немировский А.М. и др. // XV Менделеевский съезд по общей и прикладной химии. Химические проблемы экологии. Минск. 1993. С. 206–207.
51. Иванов В.П., Кочубей Д.И., Куценогий К.П., Буфетов Н.С. Изучение состава аэрозолей вторичной ионной масс-спектрометрией. // *Экологическая химия.* 1993. N 4. С. 281–285.
52. van Malderen H., van Grieken R., Khodzher T.V., Grachev M.A., Bufetov N.S., Koutsenogii K.P. Single particle analyses of aerosols from Siberia. Proceeding of the 2-nd Russian-Ukrainian-Austrian-German Analytical Symposium. Hirshegg, Austria, on September 26 October 3, 1993. In press. 10 p.
53. START starts in Siberia. A study of Global Change and Sustainable Development. Новосибирск: Сибвнешторгкредит, 1992. Изд. N 61МП, 32 с.
54. Programme of Development of International Research Centers. SB USSR A5. Новосибирск: Сибвнешторгкредит, 1991. Изд. N 44МП, 46 с.
55. Abstract on the Workshop <Siberian Haze-2>, Novosibirsk, September 1993. 50 p.
56. Куценогий К.П., Левыкин А.И., Сабельфельд К.К. Численное моделирование кинетики аэрозолеобразования в режиме свободно-молекулярных столкновений. Новосибирск, 1992. 25 с. (Препринт/ ВЦ СО РАН, N 460).
57. Дубцов С.Н., Куценогий К.П., Левыкин А.И., Сабельфельд К.К., Скубневская Г.И. // *ДАН,* 1993. Т. 330. N 3. С. 327–330.
58. Крылова А.И., Рапута В.Ф., Суторихин И.А. // *Метеорология и гидрология.* 1993. N 5. С. 5–13.
59. Крылова А.И., Рапута В.Ф. Обратная задача восстановления плотности осадка препарата при аэрозольных обработках сельскохозяйственных культур. Новосибирск, 1993. 18 с. (Препринт / ВЦ СО РАН, N 995).
60. Рапута В.Ф., Крылова А.И. // *Оптика атмосферы и океана.* Т. 7. N 8. С. 1120–1126.

Институт кинетики и горения  
СО РАН, Новосибирск

Поступила в редакцию  
9 марта 1994 г.