

Б.Д. Белан, Г.А. Ивлев, И.И. Маринайте\*, Т.М. Рассказчикова,  
Д.В. Симоненков, А.В. Фофонов

## Исследование химического состава атмосферного аэрозоля в городах Сибири Ч. 1. Результаты исследования приземного аэрозоля в городах Иркутского промышленного района

*Институт оптики атмосферы СО РАН, г. Томск*  
*\*Лимнологический институт СО РАН, г. Иркутск*

Поступила в редакцию 8.06.2005 г.

В феврале 2004 г. с помощью мобильной станции АКВ-2, разработанной в ИОА, исследовались поля загрязнения воздуха городов Восточной Сибири, расположенных на участке Иркутск – Томск. По 22 пробам построен ход неорганической компоненты (суммарной массовой концентрации элементов и ионов) приземного аэрозоля в девяти городах региона. Разброс значений концентрации неорганической фракции оказался велик: от 22 мкг/м<sup>3</sup> на окраине Канска до 0,5–0,6 мг/м<sup>3</sup> в промзоне Усолья-Сибирского. В ряде случаев эта величина различалась на порядок в пределах одного города (Ачинск, Иркутск). Проведен анализ синоптической обстановки в местах пробоотбора в период эксперимента. Для городов Иркутского промышленного района (Иркутск, Ангарск, Усолье-Сибирское) приводится подробная аэрозольно-химическая матрица, включающая как неорганический состав, так и содержание полициклических ароматических углеводородов (ПАУ) в парковых и промышленных зонах этих городов. На значительную неоднородность неорганической компоненты, в том числе в рамках городов одной промышленной зоны, большое влияние оказывают, с одной стороны, состав выбросов местных источников и предыстория воздушной массы, а с другой – экранирующий эффект местной локальной циркуляции. Уровень концентраций ПАУ, а также процентное соотношение между ними в большей степени, чем неорганический состав, определяются местом отбора проб аэрозоля и близостью источников загрязнения в городе. Поэтому эти микрокомпоненты, имея однозначное антропогенное происхождение, могут быть своеобразным репером при переносе аэрозоля между различными районами городов.

### Введение

Данные о химическом составе атмосферного аэрозоля необходимы для решения широкого круга задач физики и оптики атмосферы, экологии. От химического состава частиц зависят их показатель преломления и, соответственно, закономерности рассеивания и поглощения солнечного излучения в атмосфере. В состав аэрозоля часто входят тяжелые металлы и полициклические ароматические углеводороды (ПАУ), обладающие канцерогенными и мутагенными свойствами, что определяет экологическую значимость исследования химического состава аэрозоля. Растворение в облачных каплях частиц, содержащих сульфаты, ведет к образованию кислотных дождей, которые пагубно действуют на биоту, вызывают деградацию водоемов и почв. Все это определяет большую значимость исследований химического состава атмосферного аэрозоля, которые в последние десятилетия осуществляются во всем мире с нарастающей интенсивностью [1].

Особый интерес в этой части исследований представляет изучение антропогенного аэрозоля, который в наибольшей степени проявляет себя в про-

мышленно-урбанизированных агломерациях — современных городах, которые занимают незначительную территорию, однако по уровню отклонения многих атмосферных параметров давно не имеют себе равных в природном мире. Скопление жилья и производств на ограниченной площади, каковой является современный город, приводит к тому, что в его пределах выбрасывается в окружающую среду большое количество всевозможных примесей, не наблюдающихся в естественных условиях. Уже первые экспериментальные исследования показали значительные (до десятков раз) превышения концентраций ряда компонентов в составе городского аэрозоля по сравнению с неагломерированной средой [2–4]. Наши предыдущие исследования, проведенные в нескольких городах СССР, также подтвердили факты многократного обогащения городского аэрозоля многими химическими компонентами [5, 6].

Традиционные и непоколебимые еще 15–20 лет назад представления об аэрации города, основанные на трансляции местной климатической розы ветров на городской ландшафт, не объясняли фактически наблюдаемую с накоплением примесей ситуацию, охватывающую не только приземный слой,

но и, в отдельные периоды, весь пограничный слой атмосферы над городом. Современные теоретические исследования закономерностей формирования и трансформации полей загрязнения воздуха в промышленных центрах, особенно бурно развивающиеся в последние 10–15 лет [7–9], несомненно, в значительной степени проясняют ситуацию с особенностями аэрации городов. Тем не менее в ряде случаев расхождения между фактически наблюдаемым распределением примесей и теоретическим предсказанием наличия особой локальной циркуляции, определяющей закономерности поведения примесей в атмосфере города, все еще имеют место, что повышает значимость проведения натурных измерений концентраций загрязнителей в промышленно-урбанизированных пунктах. Аэрозольная компонента вызывает в этом плане особый интерес ввиду сложности процессов ее образования и существования в условиях загрязненной атмосферы города. Признанные современные авторитетные исследователи однозначно классифицируют «живущий» в городе аэрозоль как особый и в то же время полноценный тип – городской аэрозоль [10, 11].

### Методика и условия проведения эксперимента

Эксперимент выполнялся с использованием созданной в ИОА на базе автомобиля ГАЗ-66 передвижной лаборатории мониторинга воздуха АКВ-2, способной в автономном режиме отслеживать метео- и радиационные параметры приземной атмосферы, концентрации малых газовых составляющих, дисперсный состав аэрозоля. Подробное описание мобильной станции мониторинга воздуха АКВ-2 дано в [12].

Для исследования ионно-элементного состава аэрозоля отбирались на фильтры АФА-ХП-20 с помощью входящей в комплект мобильной станции выносной фильтроаспирационной установки, созданной на основе газосчетчиков СГБ G4-1. Помимо исследования неорганической фракции аэрозоля, в городах Иркутско-Черемховской промышленной зоны (Иркутск, Ангарск, Усолье-Сибирское) пробы аэрозоля отбирались также на стекловолоконные

фильтры «Whatman 41» для определения полициклических ароматических углеводородов (ПАУ), являющихся микрокомпонентами аэрозоля и относящихся к суперэкоотоксикантам 1-го класса опасности [13].

Непосредственно количественный химический анализ на определение ионно-элементного состава и содержание полиароматических углеводородов осуществлялся по окончании экспедиции в стационарных лабораториях Иркутского лимнологического института (ПАУ, гидрокарбонат-анион) и Томского госуниверситета (элементы и другие ионы). Применяемые при анализе методы, пороги обнаружения и погрешности определения приведены в табл. 1.

Отбор аэрозольного вещества на фильтры производился в девяти городах Восточной Сибири, расположенных на участке Иркутск – Томск федеральной трассы М53. Помимо Иркутска это города: Ангарск, Усолье-Сибирское, Тулун, Нижнеудинск, Тайшет, Канск, Красноярск и Ачинск. Измерения были начаты в Иркутске 25 февраля и закончены 29 февраля в Томске. Пробоотбор проводился на стоянках на въезде в город или (и) на выезде и вблизи центра города. Размещение мест и времени пробоотбора планировалось таким образом, чтобы получить для каждого города, по возможности в единых синоптических условиях, репрезентативную информацию о составе городского аэрозоля как местного промышленного происхождения, так и условно фонового, характерного для жилой зоны или пригорода, наименее подверженного выбросам местных предприятий. Очевидно, что оценить вклад городской циркуляции в накопление примесей и пути их распространения на территории города сразу, на месте, редко представляется возможным, поэтому часто выбиралась еще одна точка отбора пробы. Взвесить репрезентативность каждой из них для характеристики городского аэрозоля позволили последующий анализ градиентов метеоданных, концентраций малых газовых составляющих, сопоставление спектров размеров частиц, и, в конечном итоге, оценка общего изменения термодинамического режима по маршрутам измерений в исследованных городах. В целом такая оценка изложена в статье [14].

Таблица 1

Характеристики методов, использованных при анализе проб атмосферного аэрозоля

Компонент	Метод определения	Предел обнаружения, нг в пробе	Погрешность, %
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	ионная хроматография	600	5
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	»	500	10
Cl <sup>-</sup>	»	100	12
F <sup>-</sup> , NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> , NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	ионометрия	200	10
Na <sup>+</sup> , K <sup>+</sup>	атомная абсорбция	200	5
Al, Co, Cr, Mo, Ni, Ti, Zn, B, Si	атомно-эмиссионная спектроскопия	20	20
Ag, Ba, Cu, Pb, Sn, V, Mg, Mn	атомно-эмиссионная спектроскопия	10	20
Fe, Ga, W	АЭМС	100	20
Ca, Cd	АЭМС	200	20
ПАУ	хромато-масс-спектрометрия	0,001	10

Забор аэрозоля на фильтры в каждой точке измерения производился со скоростью аспирации воздуха 6 м<sup>3</sup>/ч на фильтр в течение 20–40 мин в зависимости от загрязненности атмосферы. Пробоотбор в пределах одного города осуществлялся по возможности с минимальным разрывом во времени между пунктами, что повышало вероятность наличия одной синоптической обстановки для всех точек измерения. Последующий анализ синоптических карт показал, что это условие не соблюлось лишь для пунктов пробозабора первого города, где производились измерения, – Иркутска (табл. 2).

Остановимся на характеристике синоптических условий в местах проведения измерений в период эксперимента.

25-го февраля погодные условия в районе Иркутска определялись седловиной, образованной двумя мощными со сложной конфигурацией циклонами, центр одного из которых располагался на Средне-Сибирском плоскогорье между реками Нижняя и Подкаменная Тунгуски, а второго – восточнее п-ова Камчатка, и двумя антициклонами с центрами над Северным Ледовитым океаном и верхним течением р. Иртыш. На фоне седловины проходил полярный фронт, и сначала его холодная, а затем теплая ветви оказывали свое воздействие на погодные условия и температурно-влажностный режим региона. Арктическая воздушная масса была вытеснена умеренной.

26-го февраля центр первого циклона сместился в район п. Ванавара и погодные условия Иркутска определялись его юго-восточной частью. К началу измерения теплый полярный фронт прошел через город и его тыловая часть также оказывала влияние на погоду. А режим температуры и влажности определялся воздушной массой, пришедшей из субтропических регионов Средней Азии.

С 8 до 10 ч по Гринвичу измерения проводились в Ангарске и погоду здесь обуславливала южная часть этого же циклона. В связи с тем что на высоте ведущего потока наблюдалось струйное течение со скоростью 100–120 км/ч, у поверхности земли циклон перемещался на юго-восток со скоростью около 70 км/ч и при проведении измерений с 12 до 14 ч в районе Усолья-Сибирского уже наблюдалась юго-западная часть этого образования, а его центральная часть – в районе Усть-Кута. В течение всего времени наблюдений сохранялась субтропическая воздушная масса.

27-го февраля с 2 до 3 ч погодные условия в районе Тулуна обуславливались тыловой частью циклона, который по-прежнему смещался на юго-восток. Приблизительно в 2 ч через Тулун прошел холодный арктический фронт и с этого момента арктическая воздушная масса определяла температурно-влажностный режим региона.

Таблица 2

Время установки и место отбора проб; сопутствующие синоптические условия

Дата	Время (GMT)	Город, площадка пробоотбора	Тип барического поля	Тип ВМ
25.02.04	08:00	Иркутск, р-н аэропорта (периферия города)	центр седловины, тыл ХАФ	КАВ
25.02.04	09:00	Иркутск, Знаменский монастырь (центр)	центр седловины, тыл ТАФ	КУВ
26.02.04	05:40	Иркутск, Ново-Ленино (промзона)	юго-восток циклона	КСВ
26.02.04	08:10	Ангарск, НПЗ, ТЭЦ-9 (промзона)	юг циклона	КСВ
26.02.04	09:20	Ангарск, ул. Потапова – Чайковского	юг циклона	КСВ
26.02.04	12:10	Усолье-Сибирское, Ю-В периферия	юго-запад циклона	КСВ
26.02.04	13:00	Усолье-Сибирское, ж/д. вокзал (центр)	юго-запад циклона	КСВ
26.02.04	13:40	Усолье-Сибирское, р-н Химфарм (промзона)	юго-запад циклона	КСВ
27.02.04	02:00	Тулун, спиртзавод (промзона)	запад циклона, тыл ХАФ	КАВ
27.02.04	03:00	Тулун, выезд, наветренная сторона (периферия города)	запад циклона	КАВ
27.02.04	06:50	Нижнеудинск, выезд, подветренная сторона	тыл гребня	КАВ
27.02.04	07:50	Нижнеудинск, гост. «Уда», Ц. рынок	тыл гребня	КАВ
27.02.04	08:40	Нижнеудинск, выезд (периферия города)	тыл гребня	КАВ
28.02.04	02:50	Тайшет, центр, ж/д. вокзал	юго-восток антициклона	КАВ
28.02.04	09:20	Канск, выезд	юго-восток антициклона	КАВ
28.02.04	10:10	Канск, центр	юго-восток антициклона	КАВ
28.02.04	11:10	Канск, выезд	юго-восток антициклона	КАВ
28.02.04	18:30	Красноярск, центр, ул. Семафорная	центр антициклона	КАВ
28.02.04	20:00	Красноярск, Советский р-н, выезд	центр антициклона	КАВ
29.02.04	01:30	Ачинск, выезд	северо-запад антициклона	КАВ
29.02.04	04:20	Ачинск, центр	северо-запад антициклона	КАВ
29.02.04	05:25	Ачинск, выезд	северо-запад антициклона	КАВ

В тылу циклона развивался замыкающий антициклон, и ко времени проведения измерений в районе Нижнеудинска погоду определяла тыловая часть гребня, связанного с этим образованием. На фоне гребня проходили приземные холодные фронты, с которыми было связано усиление ветра, приводящее к образованию метели.

28-го февраля антициклон, центр которого в это время находился в районе п. Имбатского, усиливался и скорость его уменьшалась. К 3 ч погодные условия в районе Тайшета определяла юго-восточная периферия образования. Эти же условия наблюдались и в Канске во всей серии измерений в этом городе.

Антициклон, продолжая усиливаться, смещался на юг, и ко времени измерений в Красноярске погодные условия региона определяла его центральная часть.

29-го февраля антициклон так же, как и в предыдущие дни, смещался на юг, и к 2 ч, когда начались измерения в Ачинске, погоду региона определяла его северо-западная периферия, а к концу измерений наблюдалась западная часть этого образования.

Помимо неоднородных с точки зрения синоптики условий пробозабора в Иркутске следует отметить нестационарность синоптической обстановки во время работы в Тулуне, на часы пробоотбора в котором пришлось прохождение фронта и смена воздушной массы, что нарушает устоявшуюся стратификацию аэрозоля [15, 16].

## Обсуждение результатов

Общий ход неорганической фракции приземного аэрозоля в городах Восточной Сибири представлен на рис. 1. Следует уточнить, что для некоторых небольших городов, не имеющих четких границ различных районов, деление на периферию и промзону достаточно условно и основывается на расположении точек отбора проб на наветренной либо подветренной сторонах относительно города.

Рассмотрение относительного химического состава неорганической фракции аэрозоля трех пер-

вых обследованных городов (рис. 2) дает основание говорить, что на химический состав аэрозоля в немалой степени оказывает влияние предистория воздушной массы. Особенно это проявляется в Иркутске и Усолье-Сибирском (после попадания их в зону действия субтропической воздушной массы, пришедшей из Средней Азии).

Появление в значительных количествах кремния в составе аэрозоля после смены воздушной массы 26 февраля, по всей видимости, больше связано с его дальним переносом, чем с местными источниками. В то же время не столь яркое его проявление в Ангарске можно охарактеризовать расположением города в центре общей промышленной зоны нескольких городов, которая формирует общую «шапку» загрязнений и тепловых выбросов, способствующую образованию охватывающей всю Иркутско-Черемховскую промзону локальной циркуляции с общей колонкой, а также созданию экранирующего эффекта над центром этой колонки, за счет обтекания ее основным потоком. «Края» колонки, по всей видимости, активно взаимодействуют в пограничном слое с приходящей воздушной массой, вызывая выпадение из нее аэрозоля. Вероятно, тенденция снижения коэффициентов обогащения для многих микроэлементов и ионов (табл. 3) в аэрозоле промышленных районов гг. Иркутска и Усолья-Сибирского связана с их разбавлением за счет осаждения компонентов пустынного аэрозоля из ведущего потока в приземный слой.

Обогащение микроэлементов в составе аэрозоля промзоны Ангарска в разы, а то и на порядки (V, Sn, Cl, F, Ag, Mo) больше, чем в его жилой зоне и пунктах пробоотбора в других городах. Это проявляется на фоне сравнительно невысокой ( $50 \text{ мкг/м}^3$ ) суммарной массовой концентрации неорганической фракции аэрозоля промзоны Ангарска, при том что выбросы загрязняющих веществ в атмосферу Ангарска превышают выбросы соседних городов, в том числе Иркутска [17]. Суммарная масса неорганики в жилой зоне Ангарска также оказалась больше почти в 1,5 раза ( $70 \text{ мкг/м}^3$ ). В то же время уровни суммарной концентрации ПАУ в пробах аэрозоля различных районов Ангарска имеют обратное соотношение (табл. 4).

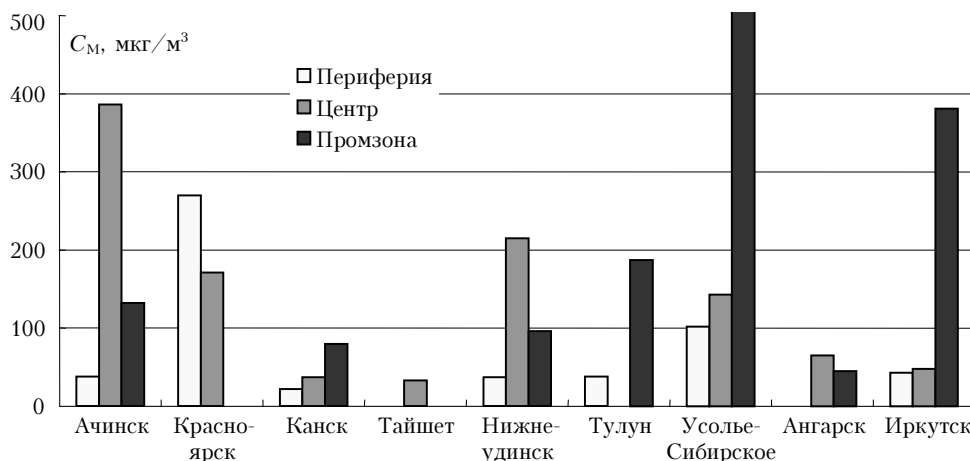


Рис. 1. Ход суммарной концентрации неорганической фракции приземного аэрозоля в городах Восточной Сибири, в их различных анклавах



Таблица 3

**Коэффициенты обогащения (по Al, Fe, Ti) компонентов аэрозоля, отобранного в городах Иркутско-Черемховской промышленной зоны**

Элемент	Иркутск			Ангарск		Усолье-Сибирское		
	периферия	центр	промзона	центр	промзона	периферия	центр	промзона
Si	1,2	$1,2 \cdot 10^{-1}$	8,6	$3,0 \cdot 10^{-1}$	—	8,1	$4,3 \cdot 10$	3,4
Ca	$1,1 \cdot 10^2$	$8,9 \cdot 10$	7,1	$5,1 \cdot 10$	$1,8 \cdot 10^2$	$5,0 \cdot 10$	$2,1 \cdot 10$	$3,1 \cdot 10^2$
Al	8,6	7,3	3,5	1,7	1,0	6,4	2,8	4,3
Mg	2,1	3,4	1,7	1,8	7,9	4,0	$1,4 \cdot 10$	4,2
Ti	1,7	2,2	2,0	3,3	9,2	1,5	1,9	1,9
Fe	$1,0 \cdot 10^{-1}$	$1,0 \cdot 10^{-1}$	$1,4 \cdot 10^{-1}$	$1,8 \cdot 10^{-1}$	$1,0 \cdot 10^{-1}$	$1,1 \cdot 10^{-1}$	$1,9 \cdot 10^{-1}$	$1,2 \cdot 10^{-1}$
Mo	—	$9,7 \cdot 10^4$	$4,6 \cdot 10^3$	—	$2,0 \cdot 10^5$	—	—	—
Ag	—	$9,0 \cdot 10^5$	—	$4,3 \cdot 10^5$	$4,2 \cdot 10^6$	—	—	—
Mn	2,0	—	5,7	1,4	$5,4 \cdot 10$	1,8	$1,6 \cdot 10$	4,0
B	$2,1 \cdot 10^2$	$2,7 \cdot 10^2$	$4,6 \cdot 10^2$	—	$6,0 \cdot 10^3$	$2,8 \cdot 10^3$	$2,1 \cdot 10^3$	$2,6 \cdot 10^2$
Cu	$2,2 \cdot 10^2$	$1,6 \cdot 10^2$	$3,4 \cdot 10$	$2,9 \cdot 10^2$	$2,1 \cdot 10^3$	$7,8 \cdot 10$	$9,4 \cdot 10$	$1,0 \cdot 10^2$
Ni	$2,7 \cdot 10$	$7,6 \cdot 10^2$	$3,4 \cdot 10$	$2,6 \cdot 10^2$	$4,4 \cdot 10^3$	$2,6 \cdot 10$	—	$8,2 \cdot 10$
Sb	—	$9,0 \cdot 10^3$	$1,8 \cdot 10^4$	—	—	—	—	—
Pb	—	—	$1,9 \cdot 10$	$3,1 \cdot 10$	—	$2,3 \cdot 10^2$	—	—
V	5,6	5,9	$7,8 \cdot 10^{-1}$	$1,2 \cdot 10$	$1,3 \cdot 10^2$	6,9	$2,9 \cdot 10$	9,9
Cr	$4,8 \cdot 10$	8,0	5,7	$1,9 \cdot 10$	$3,3 \cdot 10$	$3,4 \cdot 10$	—	—
Sn	$3,4 \cdot 10^2$	$4,3 \cdot 10^2$	$5,0 \cdot 10$	$2,9 \cdot 10^2$	$2,5 \cdot 10^3$	—	—	$7,9 \cdot 10$
Cl <sup>-</sup>	$4,6 \cdot 10^3$	$3,4 \cdot 10^3$	$1,4 \cdot 10^3$	$3,7 \cdot 10^3$	$2,4 \cdot 10^4$	$2,5 \cdot 10^3$	$7,0 \cdot 10^3$	$1,4 \cdot 10^3$
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	—	—	$2,5 \cdot 10$	$8,1 \cdot 10$	—	$4,5 \cdot 10^2$	$5,4 \cdot 10^2$	$2,7 \cdot 10$
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	$6,4 \cdot 10^2$	$1,6 \cdot 10^4$	$2,7 \cdot 10^2$	$4,1 \cdot 10^2$	$3,5 \cdot 10^3$	$2,2 \cdot 10^2$	$4,2 \cdot 10^2$	$1,5 \cdot 10^2$
Na <sup>+</sup>	8,3	$1,2 \cdot 10$	2,1	2,4	$4,1 \cdot 10$	$7,9 \cdot 10^{-1}$	$6,5 \cdot 10^{-1}$	3,2
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	$1,5 \cdot 10^3$	$2,1 \cdot 10^4$	$9,0 \cdot 10^2$	$1,0 \cdot 10^3$	$1,3 \cdot 10^4$	$5,9 \cdot 10^2$	$1,7 \cdot 10^3$	$3,5 \cdot 10^2$
K <sup>+</sup>	2,1	3,3	$3,9 \cdot 10^{-1}$	$3,6 \cdot 10^{-1}$	4,2	$6,4 \cdot 10^{-1}$	1,6	$5,5 \cdot 10^{-1}$
F <sup>-</sup>	—	—	—	—	$3,2 \cdot 10^2$	$1,9 \cdot 10$	$5,1 \cdot 10$	$2,1 \cdot 10$

Таблица 4

**Уровни концентраций ПАУ в аэрозоле (нг/м<sup>3</sup>) городов Иркутской области, отобранных 26.02.2004 г.**

ПАУ	Иркутск, Академгородок	Иркутск, Ново-Ленино	Ангарск, промзона	Ангарск, жилая зона	Усолье-Сибирское, промзона
Фенантрен	1,1	15,0	15,8	12,6	16,8
Антрацен	0,14	1,4	< 0,001	0,53	1,2
Флуорантен	3,1	10,2	14,4	6,7	23,9
Пирен	2,4	7,3	7,9	3,8	13,8
Бенз(а)антрацен	1,2	4,7	0,7	< 0,001	2,3
Хризен	2,3	4,8	1,6	< 0,001	4,6
Бенз(б)флуорантен	2,6	5,7	1,2	1,6	4,2
Бенз(к)флуорантен	0,21	7,3	0,94	< 0,001	3435
Бенз(е)пирен	2,2	4,0	0,87	0,75	2,6
<b>Бенз(а)пирен</b>	<b>0,31</b>	<b>7,2</b>	<b>0,58</b>	<b>0,53</b>	<b>2,7</b>
Перилен	0,29	1,3	< 0,001	< 0,001	< 0,001
Индено(1,2,3-с, d)пирен	2,8	9,7	1,3	1,2	4,0
Дибенз(а, h)антрацен	0,6	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001
Бенз(г, h, i)перилен	2,4	8,9	1,4	1,7	3,3
<b>Сумма ПАУ</b>	<b>21,6</b>	<b>87,5</b>	<b>46,7</b>	<b>29,4</b>	<b>82,7</b>

В целом в аэрозоле парковых зон городов суммарные концентрации приоритетных ПАУ изменялись от 20 до 30 нг/м<sup>3</sup>. При этом концентрация бенз(а)пирена не превышала ПДК, составляющую 1 нг/м<sup>3</sup>. Повышенные концентрации суммы ПАУ в аэрозоле обнаружены в промышленной зоне г. Иркутска (Ново-Ленино) и г. Усолье-Сибирское. Концентрация бенз(а)пирена в этих районах превышала ПДК в 7 и 2,5 раза соответственно. В более ранних исследованиях [13], проведенных в г. Иркутске, суммарные концентрации 12 ПАУ в различ-

ных районах города в зимний период изменялись от 25 до 300 нг/м<sup>3</sup>, а бенз(а)пирена от 0,8 до 30 нг/м<sup>3</sup>. По данным Росгидромета [18], если в 1996 г. усредненные за год превышения ПДК по бенз(а)пирену составляли: в Иркутске — 6,5, Ангарске — 6, Усолье-Сибирском — 2,8, то в 2002 г. в Иркутске и Усолье-Сибирском эти превышения возросли до 10,4 и 6,2 ПДК соответственно и лишь в Ангарске снизились — до 2,8 ПДК [17]. Такая динамика согласуется с полученными в нашей комплексной экспедиции данными.

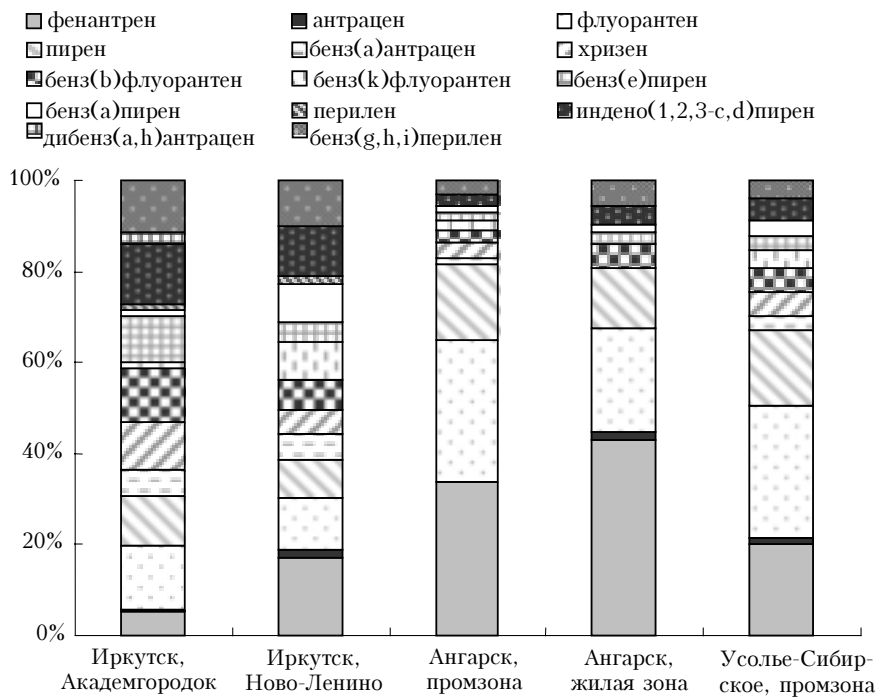


Рис. 3. Процентное соотношение между индивидуальными ПАУ в пробах аэрозоля, собранных в городах Иркутской промзоны

Концентрации ПАУ, а также процентное соотношение между ними определяются местом отбора проб аэрозоля, т.е. расположением источников загрязнения. В ряду идентифицированных ПАУ в парковой и промышленной зонах г. Ангарска преобладают фенантрен, пирен и флуорантен, их суммарное количество достигает 80% от массы обнаруженных ПАУ (рис. 3). Сходство процентных соотношений ПАУ в аэрозоле, собранном в этих двух районах, указывает на перенос загрязняющих веществ от промышленной зоны в жилую зону г. Ангарска. Районы Академгородок и Ново-Ленино в г. Иркутске отличаются высоким содержанием бенз(г, h, i)перилена и индено(1,2,3-с, d)пирена, которые являются индикаторами загрязнения воздуха автомобильным транспортом [19]. К основным источникам ПАУ в районе Ново-Ленино относятся котельные средней и малой мощности, использующие слоевой способ сжигания угля, а также частный сектор с печным отоплением [20], при котором происходит недожог топлива, на что указывает высокое содержание бенз(а)пирена в пробах аэрозоля из этого района.

### Заключение

Выполненные исследования показывают, что формирование аэрозольных полей городов крупной промышленной зоны имеет сложный характер и является суперпозицией нескольких механизмов переноса и источников, как дальних так и местных, причем соотношение их вкладов в различных частях промышленно-урбанизированной зоны может существенно изменяться.

Малочисленность параллельных данных разных фракций аэрозоля, полученных в совместных измерениях, конечно, пока не позволяет провести глубокий анализ их взаимосвязи и сделать однозначные выводы, которые всеохватно охарактеризовали бы ситуацию с антропогенным аэрозолем в городах в целом.

Однако сопоставление суммарных концентраций макро- (неорганической фракции) и микрокомпонентов (ПАУ) в составе аэрозоля (см. рис. 1 и табл. 4) показывает значительную корреляцию между этими параметрами. Возможно, макрокомпоненты аэрозоля могут служить своеобразной матрицей-коллектором для органической составляющей. По крайней мере, очевидно, что микрокомпоненты, будучи однозначно антропогенно-промышленного происхождения, являются своеобразным репером при переносе аэрозоля между различными районами городов.

Таким образом, опыт проведения комплексных мобильных измерений показывает их ценность в возможности быстро и одновременно получить широкий круг данных как по химическому составу загрязнений, так и по другим параметрам, которые могут служить серьезной базой для проведения модельных исследований в городах.

Работа выполнена по программе СО РАН № 24, проект 24.3.3, при поддержке междисциплинарного проекта СО РАН № 130, программы Президиума РАН № 13, проект 13.2.

1. Кондратьев К.Я. Аэрозоль как климатообразующий компонент атмосферы. 1. Физические свойства и химический состав // Оптика атмосф. и океана. 2002. Т. 15. № 2. С. 123–146.

2. Михайлов В.А., Пушкин С.Г., Назаров А.А., Гильберт Э.Н. Исследование элементного состава атмосферных аэрозолей с помощью современных аналитических методов // Тр. ЗСРНИИ. 1979. Вып. 40. С. 55–78.
3. Пушкин С.Г., Михайлов В.А. Компараторный нейтронно-активационный анализ. Изучение атмосферных аэрозолей. Новосибирск: Наука, 1989. 125 с.
4. Савенко В.С. Природные и антропогенные источники загрязнения атмосферы. М.: ВИНТИ, 1991. 211 с.
5. Белан Б.Д., Симоненков Д.В., Толмачев Г.Н. Химический состав аэрозоля в выбросах предприятий некоторых регионов // Оптика атмосфер. и океана. 1996. Т. 9. № 4. С. 453–459.
6. Белан Б.Д., Ковалевский В.К., Симоненков Д.В., Толмачев Г.Н., Рассказчикова Т.М. Структура аэрозольных «шапок» над промышленными центрами // Оптика атмосфер. и океана. 1996. Т. 9. № 6. С. 755–768.
7. Марчук Г.И., Алоян А.Е. Математическое моделирование в задачах экологии // Фундаментальные науки – прикладному хозяйству. М., 1990. С. 15–16.
8. Пененко В.В., Коротков М.Г. Применение численных моделей для прогнозирования аварийных и экологических неблагоприятных ситуаций в атмосфере // Оптика атмосфер. и океана. 1998. Т. 11. № 6. С. 567–572.
9. Пененко В.В., Цветова Е.А. Методы и модели для изучения природной среды и оценки экологических рисков // Оптика атмосфер. и океана. 2002. Т. 15. № 5–6. С. 412–418.
10. Кондратьев К.Я. Атмосферный аэрозоль как климатообразующий компонент атмосферы. 1. Свойства аэрозоля различных типов // Оптика атмосфер. и океана. 2004. Т. 17. № 1. С. 5–24.
11. Seinfeld J.H., Pandis S.N. Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change. New York: Wiley and Sons, 1998. 1327 p.
12. Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Давыдов Д.К., Ивлев Г.А., Козлов А.В., Пестунов Д.А., Покровский Е.В., Симоненков Д.В., Ужегова Н.В., Фофанов А.В. Мобильная станция АКВ-2 и ее применение на примере г. Томска // Оптика атмосфер. и океана. 2005. Т. 18. № 8. С. 643–648.
13. Горшков А.Г., Маринайте И.И. Мониторинг экотоксикантов в объектах окружающей среды Прибайкалья. Часть I. Определение полициклических ароматических углеводородов в аэрозоле промышленных центров (на примере г. Иркутска) // Оптика атмосфер. и океана. 2000. Т. 13. № 10. С. 967–970.
14. Белан Б.Д., Ивлев Г.А., Пирогов В.А., Покровский Е.В., Симоненков Д.В., Ужегова Н.В., Фофанов А.В. Сравнительная оценка состава воздуха промышленных городов Сибири в холодный период // Геогр. и природ. ресурсы. 2005. № 01. С. 152–157.
15. Arshinova V.G., Belan B.D., Rasskazchikova T.M., Skliadneva T.K. Variation of aerosol distribution in the near-ground layer of the atmosphere in the presence of atmospheric fronts // Proc. of the 14 Intern. Conf. on Nucleation and Atmospheric Aerosol. Helsinki, 1996. Pergamon. P. 626–628.
16. Белан Б.Д., Задде Г.О., Плотников А.П., Рассказчикова Т.М., Скляднева Т.К. Изменение состава воздуха при прохождении атмосферных фронтов // Метеорол. и гидрол. 1999. № 11. С. 34–39.
17. Государственный доклад о состоянии и об охране окружающей среды Иркутской области // Главное управление природных ресурсов и охраны окружающей среды МПР России по Иркутской области. Иркутск, 2004. 327 с.
18. Государственный доклад о состоянии окружающей среды Иркутской области // Государственный комитет по охране окружающей среды Иркутской области Госкомэкологии России. Администрация Иркутской области. Иркутск: ОАО «Облмашинформ», 1999. 320 с.
19. Суздорф А.Р., Морозов С.В., Кузубова Л.И., Анишиц Н.Н., Анишиц А.Г. Полициклические ароматические углеводороды в окружающей среде: источники, профили и маршруты превращения // Химия в интересах устойчивого развития. 1994. Т. 2. № 2–3. С. 511–540.
20. Моложникова Е.В. Учет загрязнения окружающей среды аэрозолями в задачах развития энергетических систем: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Иркутск: Ин-т систем энергетики им. Л.А. Мелентьева. 2003. 24 с.

*B.D. Belan, G.A. Ivlev, I.I. Marinaite, T.M. Rasskazchikova, D.V. Simonenkov, A.V. Fofonov. Investigation of the chemical composition of atmospheric aerosol in Siberian cities. Part 1. Results of investigation of the near-surface aerosol in towns of the Irkutsk industrial region.*

In February 2004, an AKV-2 mobile station, designed in the Institute of Atmospheric Optics, was used to study air pollution fields in East-Siberian towns situated between Irkutsk and Tomsk. Twenty two samples were collected and then used to draw the plot of the inorganic component (total mass concentration of elements and ions) in nine towns of the studied region. The scatter in the concentration of the inorganic fraction appeared to be large: from 22  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  in Kansk suburbs to 0.5–0.6  $\text{mg}/\text{m}^3$  in the Usol'e-Sibirskoe industrial zone. In some cases, this concentration varied by an order of magnitude within the same town (Achinsk, Irkutsk). The synoptic situation at the sampling sites during the experiment has been analyzed. For towns of the Irkutsk industrial region (Irkutsk, Angarsk, Usol'e-Sibirskoe), the detailed aerosol-chemical matrix is presented, which includes both the inorganic composition and the contents of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in public green spaces and industrial zones of these towns. The significant inhomogeneity of the inorganic component, in particular, within the towns of the same industrial zone is strongly affected, on the one hand, by the composition of emissions from local sources and the prehistory of the air mass and, on the other hand, by the screening effect of the local circulation. The level of the PAH concentrations, as well as their percentage, is determined by the aerosol sampling site and its closeness to pollution sources to the higher extent than the inorganic composition. Therefore, these components, being of definitely anthropogenic origin, can serve as tracers in the transport of aerosol between different districts.