

УДК 551.511.61+551.578.46

Исследование аэрозольных выпадений полиароматических углеводородов в сфере влияния г. Барнаула

В. Е. ПАВЛОВ¹, С. В. МОРОЗОВ², В. Ф. РАПУТА³, В. В. КОКОВКИН⁴, И. В. ХВОСТОВ¹¹Институт водных и экологических проблем Сибирского отделения РАН, ул. Молодежная, 1, Барнаул 656038 (Россия)

E-mail: pavlov@iwer.asu.ru

²Новосибирский институт органической химии им. Н. Н. Ворожцова Сибирского отделения РАН, проспект Академика Лаврентьева, 9, Новосибирск 630090 (Россия)³Институт вычислительной математики и математической геофизики Сибирского отделения РАН, проспект Академика Лаврентьева, 6, Новосибирск 630090 (Россия)⁴Институт неорганической химии им. А. В. Николаева Сибирского отделения РАН, проспект Академика Лаврентьева, 3, Новосибирск 630090 (Россия)

(Поступила 12.08.10; после доработки 18.02.11)

Аннотация

Приведены результаты полевых, химико-аналитических и численных исследований загрязнения снегового покрова в зоне влияния источников выбросов полициклических ароматических углеводородов (ПАУ) г. Барнаула. В отобранных пробах снега методом хромато-масс-спектрометрии определены 19 индивидуальных ПАУ. Выполнен численный анализ экспериментальных данных и найдены количественные закономерности регионального выноса ПАУ с территории Барнаула. Методами корреляционного анализа установлена линейная зависимость между средними логарифмами концентраций ПАУ, измеренных вблизи стационарных метеорологических постов на территории города и за его пределами на направлении преобладающего сноса. Показана возможность создания экономичной системы мониторинга для оценки загрязнения атмосферы города в течение долговременного периода.

Ключевые слова: атмосфера, загрязнение, аэрозоль, полиароматические углеводороды, снежный покров, данные наблюдений, численный анализ

ВВЕДЕНИЕ

Организация инструментальных наблюдений аэрозольного загрязнения на большой площади и в течение длительного времени представляет значительные трудности. В связи с этим в мониторинге окружающей среды широко используются природные планшеты-накопители аэрозолей. Так, снеговой покров служит одним из наиболее надежных индикаторов атмосферного загрязнения территории города и его окрестностей [1–3]. В составе выпадений обнаруживают такие высокотоксичные вещества, как полициклические ароматические углеводороды (ПАУ) [4] – про-

дукты неполного сгорания органического топлива. Особенно большой объем выбросов ПАУ наблюдается в зимнее время в результате сжигания угля на теплоэлектростанциях и в частном жилом секторе. Значительный вклад в загрязнение атмосферы города вносит также автотранспорт.

Вследствие сложной структуры пространственно-временного распределения источников выброса поле концентрации ПАУ в атмосфере города достаточно разнородное. Для его оценивания принято использовать систему стационарных метеорологических постов [5]. Однако эффективность используемой системы стационарных постов весьма ограничен-

на, особенно с учетом того, что на территории города появляются новые источники загрязнения, быстрыми темпами расширяется парк автотранспорта. В связи с этим возникает необходимость существенного расширения системы пунктов наблюдения и оценки ее информативности.

С другой стороны, территорию города можно рассматривать как площадной источник примеси, значительное воздействие которого прослеживается на расстоянии в десятки километров [1, 2]. По внешнему воздействию можно проводить оценивание его суммарных выбросов, многокомпонентного состава выпадающих примесей. Прямое численное моделирование распространения примесей с территории города требует разработки сложных математических моделей, включающих в себя значительное число параметров, которые нуждаются в дальнейшем определении и уточнении [6]. Однако проведение таких работ сдерживается имеющимися техническими и экономическими возможностями. Такая ситуация требует более взвешенного совместного использования экспериментальных данных наблюдений и теоретических исследований в рамках соответствующих постановок обратных задач распространения примесей в приземном и пограничном слоях атмосферы.

Цель данной работы – исследование по установлению закономерностей распределения компонентного состава ПАУ в снегу на территории г. Барнаула и за его пределами. В этой

связи нами выполнены полевые работы по отбору проб снега на рассматриваемых территориях, химическому анализу проб по основным ПАУ, численному анализу данных наблюдений переноса примеси от площадного источника.

ПОЛЕВЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

В соответствии с планами экспериментальных работ для определения основных ПАУ в начале марта 2009 г. был проведен отбор образцов снега, как на территории Барнаула, так и за его пределами. Следует отметить, что Алтайским центром по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (ЦГМС) проводится контроль атмосферного загрязнения Барнаула только бенз(а)пиреном и только на двух стационарных постах, что явно недостаточно для объективной оценки состояния воздушной среды города [7].

Внутри города пробы отбирались вблизи стационарных метеорологических постов Алтайского ЦГМС, относительно равномерно покрывающих его территорию. Число этих постоянно действующих станций в настоящее время равно пяти. На рис. 1 показано их расположение [7, 8] и приведены среднезимние климатические характеристики повторяемости направлений ветра.

За пределами города отбор проб проводился на маршрутах, приуроченных к северо-восточному сектору выноса примесей. Согласно зимней “розе ветров”, в этот сектор

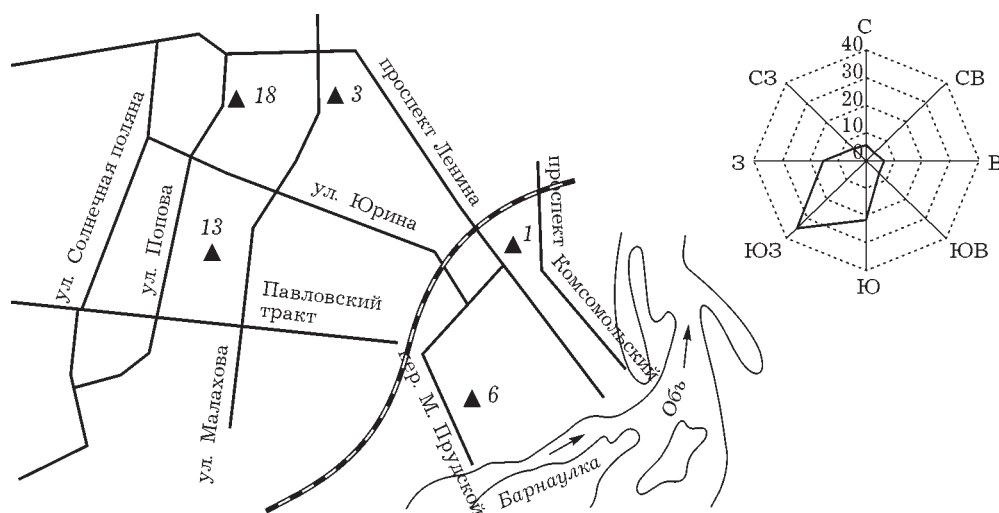


Рис. 1. Схема размещения стационарных метеорологических постов Алтайского ЦГМС г. Барнаула.

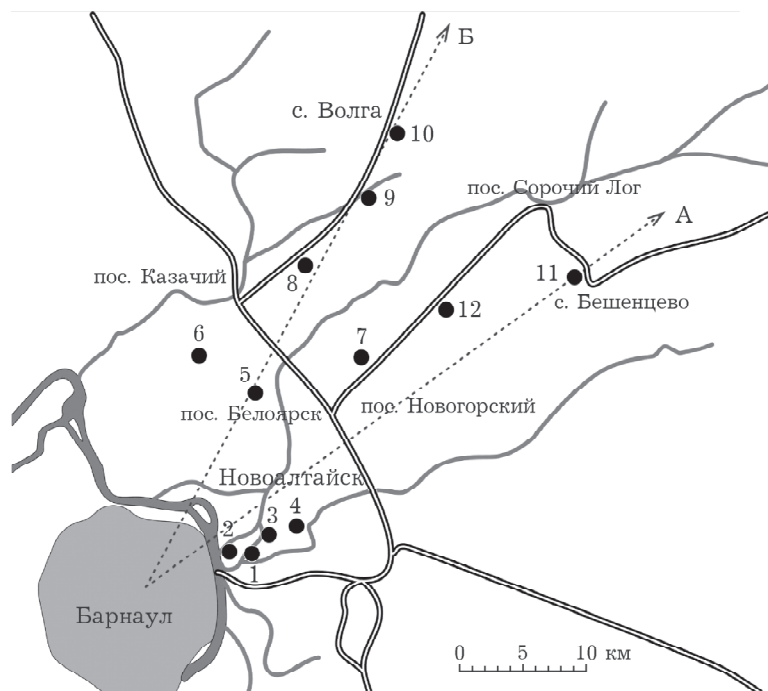


Рис. 2. Схема отбора снеговых проб в окрестностях г. Барнаула. Цифрами указаны номера точек наблюдений; А, Б – маршруты проб отбора.

поступает максимальное количество городских выбросов [9]. С учетом существующей системы дорог и расположения основных загородных локальных источников (городов Белооярск и Новоалтайск) выбраны два маршрута отбора образцов снега. Размещение точек на маршрутах производилось в соответствии с предполагаемой динамикой убывания концентраций по мере удаления от территории города [10]. Схема маршрутов отбора проб представлена на рис. 2.

Отбор образцов снега производился с помощью пластмассовой трубы диаметром 45 мм. Процедура отбора состояла в срезе керна на всю глубину снежного покрова до основания его залегания. Полученный керн, очищенный от остатков почвы и/или растительности в основании трубы, помещали в полиэтиленовый пакет. Число кернов в одном пакете для каждой точки отбора было таким, чтобы общая масса пробы составляла 1.0–1.5 кг.

ХИМИКО-АНАЛИТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для определения ПАУ использовали стандартную методику, приведенную в работе [11]. Данная методика включала следующие ста-

дии: топление снежных проб при комнатной температуре; введение веществ-свидетелей, позволяющих отследить в процессе определения полноту извлечения ПАУ; трехкратное экстракционное концентрирование ПАУ в предварительно перегнаный хлористый метилен из всего объема нефильтрованной пробы талого снега. Объединенные экстракты высушивали безводным сульфатом натрия, растворитель упаривали на ротационном испарителе при температуре 35 °С до сухого остатка. Остаток растворяли в 1 мл ацетона. Полученный раствор анализировали на содержание ПАУ методом хромато-масс-спектрометрии с использованием газового хроматографа Agilent Technologies (AT) 6890N и квадрупольного масс-спектрометрического детектора AT 5975N в режиме детектирования по индивидуальным характеристичным ионам определяемых соединений. Анализируемые компоненты разделяли на капиллярной кварцевой колонке HP-5MS длиной 30 м, диаметром 0.25 мм и толщиной покрытия 0.25 мкм. Условия газохроматографического определения: температура детектора 280 °С, температура источника ионов 230 °С, температура квадрупольного 150 °С, газ-

носитель – гелий. Температура термостата колонки увеличивалась от 50 (время выдержки 2 мин) до 280 °С (время выдержки 20 мин) со скоростью 10 °С/мин. Для расчета концентраций использована стандартная смесь ПАУ (Hewlett Packard № 8500-6035). Погрешность определения индивидуальных ПАУ составляла ±20 %. Контроль правильности результатов проводили с помощью добавок в исходный объем пробы перед экстракцией стандартных образцов бром- и дейтеропроизводных ПАУ.

Во всех пробах снегового покрова определены следующие 19 ПАУ: фенантрен, флуорантрен, пирен, нафталин, флуорен, аценафтилен, хризен, антрацен, бенз(е)пирен, бенз(б)флуорантрен, бенз(к)флуорантрен, бенз(г, h, i)периллен, индено(1,2,3-сд)пирен, бенз(а)пирен, бенз(а)антрацен, аценафтен, бенз(j)флуорантрен, периллен и дибенз(а, h)-антрацен. Полученные данные представлены в табл. 1.

МОДЕЛИ ОЦЕНИВАНИЯ РЕГИОНАЛЬНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ И ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ ДАННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

Данные натуральных наблюдений и численного моделирования свидетельствуют о том, что в нормальных условиях при удалении от источника на расстояние порядка 7–10 км концентрация примеси в пограничном слое атмосферы определяется сравнительно небольшим числом факторов. К ним в первую очередь следует отнести мощность источника, среднюю скорость ветра и толщину слоя перемешивания. В этом случае поле осредненной за длительный промежуток времени концентрации от точечного источника описывается соотношением [10]

$$Q(x,y) = \lambda Mg(\varphi(x,y,\xi,\eta))/[2\pi uhd(x,y,\xi,\eta)] \quad (1)$$

где (x,y) – декартовы координаты расчетной точки; (ξ,η) – координаты точечного источника;

$$\varphi(x,y,\xi,\eta) = \arctg \left(\frac{y-\eta}{x-\xi} \right), \quad d = \sqrt{(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2},$$

ТАБЛИЦА 1

Содержание ПАУ в образцах снега на стационарных постах и в окрестностях г. Барнаула, нг/л

Компоненты	Номера постов					Номера точек отбора проб на пригородных маршрутах											
	1	3	6	13	18	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Аценафтилен	69	31	200	190	210	44	37	18	25	21	13	16	12	22	13	22	10
Аценафтен	21	14	33	37	45	31	22	12	24	12	9.0	10	7.2	7.8	5.8	6.4	6.3
Нафталин	130	52	330	88	470	170	60	28	51	41	15	25	12	67	45	15	20
Флуорен	92	73	230	230	240	54	45	23	44	29	25	22	19	18	12	12	16
Фенантрен	290	160	1100	990	680	95	180	67	100	230	63	61	68	48	42	37	50
Антрацен	57	73	100	120	67	14	56	12	17	25	8.3	7.7	14	6.7	6.8	5.8	10
Флуорантрен	200	85	700	820	370	71	260	56	71	270	43	46	71	36	33	25	56
Пирен	130	58	530	560	270	54	170	37	50	160	29	29	44	24	22	15	33
Бенз(а)антрацен	20	10	110	100	55	15	40	8.3	6.9	5.9	3.2	2.5	4.3	2.8	3.9	1.9	3.2
Хризен	54	27	230	240	130	48	160	25	22	51	15	15	37	13	22	10	29
Бенз(б)флуорантрен	35	13	200	170	110	28	62	16	17	26	11	8.3	14	8.9	9.5	5.1	10
Бенз(к)флуорантрен	32	16	160	160	87	24	48	18	17	27	12	9.8	19	9.2	10	5.6	11
Бенз(j)флуорантрен	4.9	2.5	25	28	17	4.0	7.5	2.1	2.7	2.9	1.7	1.1	1.8	0.8	1.4	0.8	1.2
Бенз(е)пирен	34	18	180	160	120	24	46	13	18	25	12	8.6	13	7.8	9.6	5.3	8.8
Бенз(а)пирен	20	7.3	120	100	67	16	31	7.7	7.2	11	4.9	3.9	6.6	2.9	5.1	3.4	4.6
Периллен	3.3	1.7	18	22	16	3.4	5.3	1.4	3.0	1.9	1.0	0.5	1.0	0.8	1.0	0.4	0.7
Дибенз(а, h)антрацен	2.5	1.0	19	14	15	1.3	2.9	1.0	1.4	0.8	1.1	0.6	1.0	0.5	0.7	0.5	0.6
Индено(1,2,3-сд)пирен	25	11	140	150	97	22	32	12	11	17	9.8	5.9	15	5.8	7.5	4.7	5.0
Бенз(г, h, i)периллен	28	11	150	130	120	21	24	11	16	18	12	7.6	1.0	6.9	7.7	2.8	6.1
СПАУ	1248	665	4575	4309	3187	739	1289	368	503	976	289	280	362	288	258	179	283

$g(\varphi)$ – вероятность противоположного φ направления ветра на высотах пограничного слоя атмосферы; λ – коэффициент взаимодействия примеси с подстилающей поверхностью; M – мощность источника; u , h – средняя скорость ветра и толщина слоя перемешивания соответственно.

При переходе к площадным источникам задача оценивания существенно осложняется, поскольку выброс примеси, как правило, неизвестен и к тому же неравномерно распределен по территории города. С учетом выражения (1) плотность осадка аэрозольной примеси в случае площадного источника S имеет следующий вид:

$$Q(x, y) = \frac{\lambda}{2\pi u h} \iint_S \frac{m(\xi', \eta') g(\varphi)}{d} d\xi' d\eta' \quad (2)$$

где $(\xi', \eta') \in S$, (ξ', η') – текущие координаты источника; $m(\xi', \eta')$ – эмиссия примеси из этой точки. Предполагается также, что точка (x, y) достаточно удалена от множества S .

На практике мощность эмиссии $m(\xi', \eta')$ с территории города неизвестна либо может быть задана весьма приближенно. В таких условиях интерпретация данных наблюдений с помощью соотношения (2) затруднительна. В этом случае для приближенного описания полей концентрации в окрестности площадного источника следует использовать методы асимптотических разложений теории потенциала [12]. За пределами городской территории для фиксированного направления φ достаточно хорошим приближением к соотношению (2) может служить следующее выражение [10]:

$$Q(x, y) = \frac{\lambda M g(\varphi(x, y, x_0, y_0))}{2\pi d(x, y, x_0, y_0)} \iint_{\Omega} \frac{B(u', h')}{u' h'} d\Omega = \frac{\theta g(\varphi)}{d} \quad (3)$$

где (x_0, y_0) – координаты эффективного центра выброса примеси на территории площадного источника S ;

$$\theta = \frac{\lambda M}{2\pi} \iint_{\Omega} \frac{B(u', h')}{u' h'} d\Omega,$$

$M = \iint_S m(\xi', \eta') d\xi' d\eta'$, $B(u, h)$ – плотность вероятности распределения величин u , h в течение рассматриваемого промежутка времени.

Используя соотношение (3), оценку неизвестного параметра θ можно получить по данным измерений в определенных точках плотности аэрозольных выпадений примеси за пределами города.

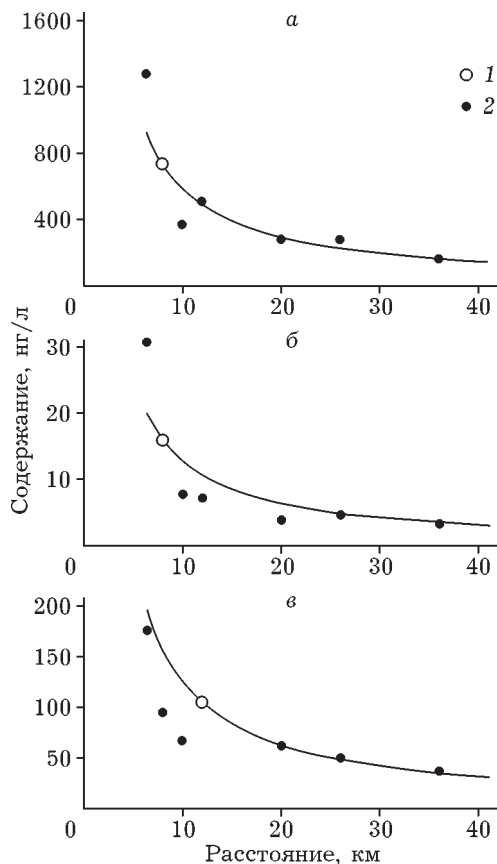


Рис. 3. Измеренные и численно реконструированные концентрации суммы ПАУ (а), бенз(а)пирена (б) и фенантрена (в) в образцах снега по маршруту А. Точки наблюдения: 1 – опорные, 2 – контрольные.

Предварительное изучение данных измерений (см. табл. 1) показало в целом монотонное убывание выпадений компонентов ПАУ на маршрутах А и Б, что позволяет провести их количественный анализ на основе регрессионного соотношения (3). Результаты численной интерпретации для части данных измерений (бенз(а)пирена, фенантрена, суммы ПАУ) на маршруте А представлены на рис. 3. Видно, что расчетные данные вполне удовлетворительно соответствуют результатам наблюдений для большинства контрольных точек измерений, а это служит дополнительным подтверждением доминирующего влияния выбросов от Барнаула на формирование уровней концентраций ПАУ в выбранных точках наблюдений. В частности, удалось избежать существенного вклада выбросов ПАУ с территории г. Новоалтайска, поскольку схема пробоотбора не включает область, в которой возможно проявление этого влияния.

Отметим, что оценку фоновой концентрации ПАУ можно было провести формальным образом, включив в уравнение регрессии (1) дополнительный неизвестный параметр, учитывающий его (фона) вклад. Однако в рамках регрессии (1) результаты численного моделирования хорошо согласуются с данными измерений ПАУ в зоне региональных выносов Барнаула, что указывает на относительно низкий уровень фона. Таким образом, предложенная выше процедура оценивания теряет смысл.

КОРРЕЛЯЦИОННЫЙ АНАЛИЗ ДАННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ КОНЦЕНТРАЦИЙ ПАУ

Представляет несомненный интерес изучение проблемы загрязнения снегового покрова антропогенными выбросами на обширных территориях и последующее построение мезомасштабной модели распространения качества загрязнителей. В этом случае город следует воспринимать как площадной источник примесей.

Хотя степень и состав аэрозольного загрязнения в исследуемом районе весьма изменчи-

вы, есть основания полагать, что между средневзвешенными концентрациями компонентов могут существовать устойчивые взаимосвязи и для территорий с общими источниками выбросов соответствующие соотношения будут примерно одинаковыми [13, 14]. Применяемая в дальнейшем исследовании методика предполагает определение средневзвешенных концентраций ПАУ на территории Барнаула (“посты”) и их последующее сопоставление с величинами, вычисленными аналогичным образом для прилегающей территории (“факел”).

Считалось, что эмпирические функции плотности распределения концентраций C_i по числу проб для ПАУ, как и для химических элементов в снеговом покрове [14], имеют нормальный логарифмический характер. В этой связи в качестве средневзвешенных концентраций ПАУ вычислялись их среднегеометрические значения $C_{\text{ср/геом}}$. В табл. 2 приведены данные по $C_{\text{ср/геом}}$, средним значениям логарифмов $\overline{\lg C}$ и стандартным отклонениям $\sigma_{\lg C}$, которые могут рассматриваться как модельные данные для оценки ин-

ТАБЛИЦА 2

Среднегеометрические концентрации ПАУ на стационарных постах и на пригородных маршрутах ($C_{\text{ср/геом}}$), их логарифмы ($\overline{\lg C}$) и стандартные отклонения $\sigma_{\lg C}$

ПАУ	Стационарные посты			Пригородные маршруты		
	$C_{\text{ср/геом}}$	$\overline{\lg C}$	$\sigma_{\lg C}$	$C_{\text{ср/геом}}$	$\overline{\lg C}$	$\sigma_{\lg C}$
Фенантрен	500	2.70	0.37	74	1.87	0.24
Флуорантрен	320	2.51	0.41	64	1.81	0.32
Пирен	230	2.36	0.42	42	1.62	0.32
Нафталин	150	2.19	0.40	34	1.53	0.33
Флуорен	150	2.18	0.25	24	1.37	0.21
Аценафтилен	110	2.04	0.37	19	1.28	0.19
Хризен	100	2.00	0.41	27	1.43	0.33
Антрацен	81	1.91	0.14	12	1.08	0.28
Бенз(е)пирен	73	1.86	0.45	13	1.12	0.26
Бенз(б)флуорантрен	71	1.85	0.50	14	1.15	0.29
Бенз(к)флуорантрен	65	1.81	0.45	15	1.18	0.25
Бенз(г, h, i)перилен	58	1.76	0.51	8.4	0.93	0.39
Индено(1,2,3-сd)пирен	56	1.75	0.50	10	1.01	0.27
Бенз(а)пирен	42	1.62	0.52	6.7	0.83	0.30
Бенз(а)антрацен	42	1.62	0.45	5.3	0.72	0.37
Аценафтен	28	1.44	0.20	11	1.04	0.25
Бенз(j)флуорантрен	11	1.04	0.47	1.9	0.27	0.29
Перилен	8.2	0.91	0.50	1.3	0.10	0.34
Дибенз(а, h)антрацен	6.3	0.80	0.57	0.90	-0.04	0.22

тегрального загрязнения исследуемых территорий площадью около $10 \times 20 \text{ км}^2$.

Сравнительный анализ состава выпадений выполнялся сразу по всем 19 компонентам. Через точки, абсциссы и ординаты которых соответствуют значениям логарифмов концентраций компонентов в двух сопоставляемых множествах, проводилась линия регрессии:

$$y = kx + b$$

Параметры k и b определялись методом наименьших квадратов. В качестве меры близости компонентного состава выступал вычисляемый по известной методике коэффициент линейной корреляции Пирсона r . Применение логарифмического масштаба обусловлено представлением о логнормальном характере закона распределения концентраций, а также необходимостью равноценного учета вклада компонентов с высокими (например, флуорантрен или пирен) и низкими (перилен) значениями концентраций в коэффициент линейной корреляции r .

Суммарная концентрация 19 ПАУ в образцах из группы “посты” изменяется от 0.7 до 4.6 мкг/л, причем содержание некоторых из них слабо варьирует от образца к образцу. Так, например, концентрации антрацена, аценафтена и флуорена изменяются всего в 2–3 раза. Для других веществ эти изменения могут достигать 10–20-кратных значений. При сопоставлении концентраций ПАУ в пробах попарно значения коэффициента линейной корреляции r варьируют от 0.85 до 0.97.

Суммарное содержание всех 19 ПАУ в образцах из группы “факел” изменяется от 0.2 до 1.3 мкг/л. Величина отношения максимальных и минимальных концентраций для разных веществ находится в пределах от 4 до 24. При попарном сопоставлении состава проб значения коэффициента корреляции изменяются от 0.77 до 0.97.

На рис. 4 представлены средние значения логарифмов концентраций ПАУ, измеренных на метеопостах ($\overline{\lg C_n}$) и под факелом ($\overline{\lg C_\phi}$), с соответствующими стандартными отклонениями логарифмов $\sigma_{\lg C}$. Распределения ПАУ по логарифмам среднегеометрических концентраций в двух территориально различных зонах отбора проб очень сходны: $r = 0.76$.

Коэффициенты уравнения линейной регрессии имеют следующие значения:

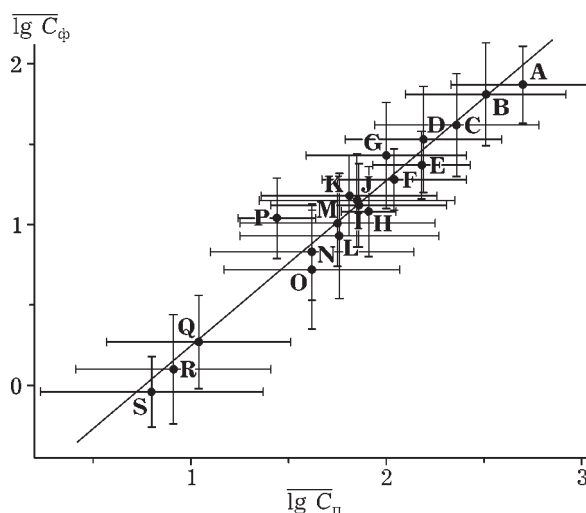


Рис. 4. Сопоставление средних логарифмов концентраций ПАУ для барнаульских метеорологических постов $\overline{\lg C_n}$ и “факела” $\overline{\lg C_\phi}$: **A** – фенантрен, **B** – флуорантрен, **C** – пирен, **D** – нафталин, **E** – флуорен, **F** – аценафтилен, **G** – хризен, **H** – антрацен, **I** – бенз(е)пирен, **J** – бенз(б)флуорантрен, **K** – бенз(к)флуорантрен, **L** – бенз(г, h, i)перилен, **M** – индено(1, 2, 3-сд)пирен, **N** – бенз(а)пирен, **O** – бенз(а)антрацен, **P** – аценафтен, **Q** – бенз(j)флуорантрен, **R** – перилен и **S** – дибенз(а, h)антрацен.

$k = 1.00 \pm 0.05$, $b = -0.74 \pm 0.10$. Величина тангенса угла наклона к оси абсцисс k , совпадающая в пределах доверительного интервала с единицей, свидетельствует о том, что не только логарифмы, но и непосредственно значения среднегеометрических концентраций C_ϕ и C_n линейно связаны между собой. Значение параметра $b = -0.74$ указывает на то, что снеговой покров на городских постах загрязнен всеми ПАУ в среднем в 5.5 раза больше, чем под факелом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные нами полевые, химико-аналитические и численные исследования загрязнения снегового покрова в зоне влияния источников выбросов ПАУ Барнаула позволяют сделать следующие выводы.

Методом хромато-масс-спектрометрии проведено определение 19 индивидуальных ПАУ в снежных пробах, отобранных в конце зимнего сезона 2008–2009 г. у пяти гидрометеорологических постов Барнаула и в его окрестностях

на маршрутах, приуроченных к северо-восточному сектору выноса примеси с территории города.

Численный анализ полученных данных позволил установить количественные закономерности регионального выноса ПАУ с территории Барнаула. Восстановленные поля плотности выпадений загрязняющих примесей на снежный покров в окрестностях города служат интегральной характеристикой длительного регионального воздействия площадного источника на окружающую среду.

Методами корреляционного анализа установлена линейная зависимость между средними логарифмами концентраций ПАУ, измеренных на стационарных метеопостах и в зоне максимального регионального выноса загрязнителей от всего города в целом по спектру измеренных компонентов ПАУ. Отметим, что полученная линейная корреляция, с одной стороны, свидетельствует об идентичности суммарного источника площадных выбросов, а с другой, – подтверждает представительность размещения метеорологических постов в городе в отношении измеренного спектра компонентов ПАУ. Дальнейший анализ данных выявил наличие линейных зависимостей между концентрациями компонентов ПАУ сравниваемых территорий.

Полученные закономерности указывают на возможность создания экономичной системы мониторинга, оценки загрязнения атмосферы города за длительный промежуток времени и определения эмиссии компонентов ПАУ с его территории.

Работа выполнена при финансовой поддержке Программы фундаментальных исследований Президиума РАН № 4, интеграционного проекта СО РАН № 84.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Василенко В. Н., Назаров И. М., Фридман Ш. Д. Мониторинг загрязнения снежного покрова. Л.: Гидрометеоиздат, 1985.
- 2 Прокачева В. Г., Усачев В. Ф. Снежный покров в сфере влияния города. Л.: Гидрометеоиздат, 1989.
- 3 Бояркина А. П., Байковский В. В., Васильев Н. В., Глухов Г. Г., Медведев М. А., Писарева Л. Ф., Резчиков В. И., Шелудько С. И. Аэрозоли в природных планшетах Сибири. Томск: Изд-во Том. ун-та, 1993.
- 4 Ровинский Ф. Я., Теплицкая Т. А., Алексеева Т. А. Фоновый мониторинг полициклических ароматических углеводородов. Л.: Гидрометеоиздат, 1988.
- 5 Безуглая Э. Ю., Смирнова И. В. Воздух городов и его изменения. СПб.: Астерион, 2008.
- 6 Алоян А. Е. Моделирование динамики и кинетики газовых примесей и аэрозолей в атмосфере. М.: Наука, 2008.
- 7 Ежегодник состояния загрязнения атмосферы в городах на территории России за 2008 г. СПб.: Астерион, 2009.
- 8 Селегей Т. С. Формирование уровня загрязнения атмосферного воздуха в городах Сибири. Новосибирск: Наука, 2005.
- 9 Климат Барнаула. Л.: Гидрометеоиздат, 1984.
- 10 Рапута В. Ф., Олькин С. Е., Резникова И. К. // Оптика атмосферы и океана. 2008. Т. 21. С. 558.
- 11 Сониясси Р., Сандра П., Шлетт К. Анализ воды: органические микропримеси. СПб.: Теза, 1995.
- 12 Тихонов А. Н., Самарский А. А. Уравнения математической физики. М.: Наука, 1972.
- 13 Павлов В. Е., Суторихин И. А., Хвостов И. В. // Оптика атмосферы и океана. 2007. Т. 20. С. 96.
- 14 Павлов В. Е., Суторихин И. А., Хвостов И. В., Зинченко Г. С. // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. 2008. № 3. С. 88.