

УДК 551.511.61+551.578.46

Экспериментальное исследование и численный анализ процессов распространения загрязнения снегового покрова в окрестностях крупной автомагистрали

В. Ф. РАПУТА¹, В. В. КОКОВКИН², С. В. МОРОЗОВ³

¹Институт вычислительной математики и математической геофизики Сибирского отделения РАН, проспект Академика Лаврентьева, 6, Новосибирск 630090 (Россия)

E-mail: raputa@sscc.ru

²Институт неорганической химии им. А. В. Николаева Сибирского отделения РАН, проспект Академика Лаврентьева, 3, Новосибирск 630090 (Россия)

³Новосибирский институт органической химии им. Н. Н. Ворожцова Сибирского отделения РАН, проспект Академика Лаврентьева, 9, Новосибирск 630090 (Россия)

(Поступила 23.06.09; после доработки 29.06.09)

Аннотация

Проведен отбор снежных проб в десяти точках по специальному маршруту на удаленностях до 150 м от Советского шоссе Новосибирска в феврале 2008 г. Исследования на данном объекте проводятся авторами более 10 лет. С использованием двух схем пробоподготовки определены основные неорганические и органические компоненты химического состава выбросов автотранспорта. Анализ данных практически по всем исследуемым параметрам свидетельствует о наличии монотонно ниспадающей зависимости концентраций загрязняющих веществ с удалением от автотрассы. Разработана малопараметрическая модель оценки выпадений полидисперсной примеси от линейного источника. Проведена апробация построенной модели на данных маршрутных наблюдений аэрозольного загрязнения снегового покрова полиароматическими углеводородами, макрокомпонентами и тяжелыми металлами. Показана значительная неоднородность состава выпадающих аэрозольных примесей. Выявлены высокие уровни содержания ПАУ в снегу, как вблизи, так и на большом удалении от автотрассы, что указывает на значительное загрязнение атмосферного воздуха мелкодисперсными компонентами.

Ключевые слова: автотранспорт, снежный покров, аэрозольное загрязнение, химический состав, полиароматические углеводороды, свинец, численное моделирование

ВВЕДЕНИЕ

Автомобильный транспорт – один из основных загрязнителей воздушной среды Новосибирска [1]. Характерные загрязняющие вещества представлены оксидами серы и азота, тяжелыми металлами, в частности свинцом, органическими продуктами неполного сгорания компонентов топлива, например полиароматическими углеводородами (ПАУ) [1–4]. Вклад в загрязнение воздушной среды вносят также выбросы пыли, поднимаемой с поверхности дорог при движении автотранспорта [1]. В составе пыли идентифицируются вещества, которыми посыпают дорогу (в част-

ности, в зимний период для борьбы с гололедом). Их элементный состав включает натрий, кальций, магний, хлорид, кремний и др.

В последние годы принимаются активные меры для снижения уровня загрязнения Новосибирска от автомобильных выбросов, однако из-за многопараметричности процессов эффективность этих мероприятий зачастую оказывается неоднозначной и непредсказуемой. Так, в период 1998–1999 гг. автопарк города был переведен на использование неэтилированного бензина. В результате произошло снижение выбросов свинца, что положительно сказалось на состоянии окружающей среды. Вместе с тем в этот же период време-

ни было зафиксировано значительное увеличение выбросов ПАУ, что, по-видимому, обусловлено неподготовленностью автопарка города к бензинам с новыми типами антидетонационных присадок [3]. В последние 5–7 лет ежегодный прирост автопарка Новосибирска составляет десятки тысяч единиц транспортных средств, что не может положительно сказаться на экологической обстановке города. Однако контроль за воздействием автотранспорта на состояние окружающей среды города носит эпизодический характер.

Представляется целесообразным вести постоянный контроль за динамикой загрязнения в окрестностях магистралей с интенсивным движением. В качестве индикатора загрязнения территории наиболее удобно использовать снежный покров [3–6]. Цель данной работы – продолжение исследований пространственной динамики загрязнения снежного покрова основными компонентами выбросов автотранспорта в окрестности крупной автомагистрали Новосибирска.

ПОЛЕВЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве объекта изучения нами выбрано Советское шоссе, расположенное в левобережной части Советского района Новосибирска. Маршрутная снегосъемка проводилась в конце зимнего сезона 2007–2008 гг. в окрестностях участка автотрассы, расположенного перпендикулярно ветрам юго-западно-

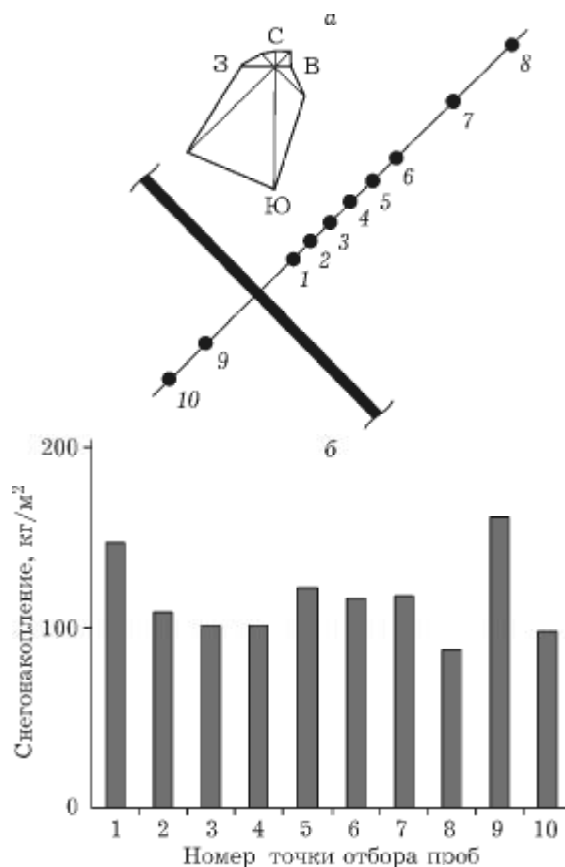


Рис. 1. Схема маршрутного пробоотбора снега (а) и данные по влагозапасу (б).

го направления – наиболее характерного направления для зимнего периода [7]. Регулярные исследования процессов загрязнения снежного покрова на данном участке проводятся нами уже более 10 лет.

ТАБЛИЦА 1

Содержание макрокомпонентов в растворенной части снеготалых проб и суммарное содержание микроэлементов

Номер пробы	Расстояние от трассы, м	Ионные макрокомпоненты, (мг/л)/(ммоль/л)					
		Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻
1	20	19.75/0.859	1.50/0.038	7.65/0.191	1.78/0.073	31.5/0.89	7.6/0.079
2	30	11.6/0.507	0.97/0.025	6.55/0.163	1.22/0.050	16.8/0.47	5.4/0.056
3	40	4.33/0.188	0.45/0.0115	3.91/0.098	0.77/0.032	6.9/0.195	4.8/0.050
4	50	3.59/0.156	0.43/0.011	3.97/0.099	0.83/0.034	5.5/0.155	4.0/0.042
5	65	3.27/0.142	1.42/0.036	3.63/0.091	0.79/0.033	5.7/0.161	4.0/0.042
6	80	2.31/0.10	0.33/0.0084	3.84/0.096	0.88/0.036	3.8/0.107	3.1/0.032
7	110	1.15/0.05	0.26/0.0066	1.85/0.046	0.43/0.0177	4.0/0.113	2.2/0.023
8	150	0.91/0.040	0.20/0.00511	1.79/0.045	0.45/0.0185	5.7/0.161	2.5/0.026
9	-30	0.8/0.035	0.23/0.0059	1.46/0.036	0.43/0.0177	1.4/0.039	2.2/0.023
10	-50	0.34/0.015	0.13/0.0033	1.0/0.025	0.38/0.0156	0.8/0.023	1.9/0.020

Схема отбора снеговых проб представлена на рис. 1, а. С наветренной стороны дороги были отобраны пробы в восьми точках, с подветренной стороны – в двух точках. Данные по их удаленности от автотрассы приведены в табл. 1. Отбор проб снега производился с помощью пластмассовой трубы диаметром 45 мм на всю глубину снежного покрова. На рис. 1, б представлена зависимость снегонакопления на маршруте исследования. Видно, что содержание снега варьирует в диапазоне 90–150 кг/м² и в среднем составляет 116 кг/м² (см. рис. 1, б).

ХИМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ СНЕГОВЫХ ПРОБ

После топления проб использовали две схемы пробоподготовки в зависимости от природы определяемых компонентов. Перед определением неорганических компонентов растопленную пробу фильтровали через фильтр “синяя лента” и мембранный фильтр с диаметром пор 0.45 мкм. Полученные осадки сушили на воздухе. Анализу подвергали и осадки, и фильтрат. В фильтрате определяли содержание натрия, калия, кальция, магния, хлоридов, нитратов и сульфатов. Для определения натрия, калия, кальция, магния использовали методику с атомно-абсорбционным спектрофотометром с зеемановской коррекцией фона Z 8000 (Hitachi, Япония) с атомизацией аналитов в пламени воздух – ацетилен. Детектирование натрия и калия проводили в

варианте эмиссии излучения, детектирование кальция и магния – в варианте абсорбции излучения от ламп с полым катодом. Для определения неорганических анионов (хлоридов, нитратов и сульфатов) использовали методику на основе системы капиллярного электрофореза “Капель 103 Р” (НПФ “Люмэкс”, С.-Петербург) с косвенным фотометрическим детектированием на длине волны 254 нм. В качестве электрофоретического буферного раствора использовали смесь хромата калия и диэтаноламина при рН 9. Разделение анионов проводили в кварцевом капилляре с внутренним диаметром 75 мкм при напряжении 25 кВ. Основные микроэлементы, определяемые в осадках и фильтрах, – Pb, Cu, Zn. Их определение проводили с использованием атомно-эмиссионного спектрометра PGS-2 (Германия) в дуге постоянного тока и регистрацией многоканальным анализатором эмиссионных спектров (МАЭС), разработанного фирмой “ВМК-Оптоэлектроника” (Новосибирск).

Органические компоненты (ПАУ) определяли после их трехкратного экстракционного концентрирования в предварительно перегнаный хлористый метилен из всего объема нефильтрованной пробы. После сбора экстрактов их осушали безводным сульфатом натрия. Далее растворитель упаривали на ротационном испарителе при температуре 35 °С до сухого осадка, полученный осадок растворяли в небольшом объеме ацетона (1–5 мл). Полученный раствор анализировали на содержание ПАУ с использованием газового хроматографа Hewlett-Packard 6890 с капиллярной кварцевой колонкой и квадрупольным масс-спектрометрическим детектором Hewlett-Packard 5972 MSD. В качестве газа-носителя выбран гелий, который пропускали со скоростью 1 мл/мин. Для идентификации соединений использовали библиотеку масс-спектров NIST 2002.

Погрешности определения как макро-, так и микроэлементов находились в пределах, регулируемых ГОСТ [8].

Полученные данные по ионным макрокомпонентам в растворенной части снеготалых вод и основным микроэлементам суммарно в растворенной части и твердом осадке представлены в табл. 1 в зависимости от удаленности места отбора проб от автотрассы. Видно, что в целом для всех параметров химического со-

в растворенной части и осадке

NO ₃ ⁻	Микроэлементы, мкг/л		
	Pb	Cu	Zn
2.8/0.045	14.9	21.0	33.8
2.0/0.032	13.7	21.8	18.8
2.3/0.0371	14.2	12.0	14.1
1.5/0.024	11.9	18.1	9.6
2.0/0.032	13.3	10.8	12.9
2.2/0.035	7.4	12.6	9.2
0.6/0.0097	7.3	6.1	8.6
1.8/0.029	11.4	9.1	9.3
0.5/0.0081	7.4	3.9	10.7
0.2/0.0032	4.4	1.9	2.3

става проб с удалением от автотрассы наблюдается монотонное уменьшение концентрации. Качественно это согласуется с тем, что источником этих элементов служит автотрасса. Уровень содержания загрязняющих веществ в снегу с наветренной стороны дороги оказался гораздо выше, чем с подветренной стороны, вследствие повторяемости направлений ветра в зимний период времени [7].

Из неорганических катионов наиболее высокое содержание характерно для натрия: его молярное количество в расчете на 1 л практически совпадает с количеством хлоридов. Эти данные подтверждает тот факт, что хлористый натрий является основным компонентом смеси для зимней подсыпки дорог. Другим компонентом, по-видимому, служит сульфат магния.

В табл. 1 также приведены данные по общему содержанию тяжелых металлов (свинец,

медь и цинк) в пробе снега. Общее содержание каждого элемента рассчитано по данным определения содержания металлов во фракциях крупнодисперсного осадка (размер частиц более 2–5 мкм), мелкодисперсного осадка (>0.45 мкм) и фильтрата. Видно, что с увеличением расстояния от автотрассы содержание всех тяжелых металлов, как и макрокомпонентов, уменьшается.

Для сопоставления полученных результатов с данными наших предыдущих исследований [3, 4] обсудим зависимость содержания Pb, Cu и Zn в крупнодисперсном осадке, а также суммарно в мелкодисперсном осадке и фильтрате от удаленности точки отбора пробы от автотрассы. Как и в работе [3], установлено, что концентрация микроэлементов в крупнодисперсной фракции с удалением от автотрассы уменьшается, причем по обе

ТАБЛИЦА 2

Содержание полиароматических углеводородов в пробах снега, отобранных в окрестностях Советского шоссе

Компонент	Содержание, нг/л									
	Номер пробы									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Аценафтилен	105	113	767	65.8	40.9	66.1	323	31.9	32.9	20.1
Аценафтен	64.7	37.0	25.7	14.7	17.5	11.1	11.3	10.6	6.6	9.2
Нафталин	368	500	376	278	199	420	117	165	141	84.8
Флуорен	262	187	80.7	62.0	63.7	46.9	41.9	39.8	28.5	32.8
Фенантрен	2270	1650	739	484	447	244	174	117	104	83.8
Антрацен	80.7	57.9	30.0	32.2	29.8	21.9	88	9.7	8.2	6.8
Флуорантрен	769	588	322	200	230	118	75.5	48.1	70.4	44.4
Пирен	657	428	181.9	102	117	56.3	36.4	26.8	35.7	25.2
Бенз(а)антрацен*	118	78.4	34.3	23.0	25.6	14.7	10.3	8.7	37.9	7.8
Хризен*	562	355	175	95.1	110	57.6	31.6	24.3	138	17.8
Бенз(б)флуорантрен*	244	204	117	79.7	81.7	47.7	32.5	23.5	31.2	22.7
Бенз(к)флуорантрен*	153	112	80.7	49.3	46.8	30.2	20.1	13.8	16.9	12.5
Бенз(л)флуорантрен*	41.3	21.7	15.0	9.7	9.0	7.4	4.0	3.1	4.2	3.4
Бенз(е)пирен	493	302	139	74.7	88.3	46.9	25.4	19.6	22.9	15.0
Бенз(а)пирен*	159	92	53.4	31.3	42.5	24.1	20.1	14.8	27.5	17.6
Пирелен	96.7	56.3	27.5	16.2	13.6	4.3	2.8	2.5	3.8	2.4
Дибенз(а, h)антрацен*	95.5	65.9	25.1	11.8	14.4	8.2	2.9	3.9	4.9	2.1
Индено(1,2,3 cd)пирен*	122	107	68.6	43.6	42.9	25.7	17.6	13.5	23.3	12.0
Бенз(g, h, i)перилен	332	241	119	62.0	79.7	43.0	21.5	17.7	18.3	14.8
ΣПАУ	6996	5200	2686	1735	1700	1293	686.1	594.4	755.2	435.2
ΣПАУ(канц.)	1494.8	1036	568.8	343.5	373.3	215.6	139.1	105.6	283.5	95.9

*Канцерогенные ПАУ.

стороны от автотрассы. Максимум содержания микроэлементов суммарно в мелкодисперсной и водорастворенной частях смещен в наветренную сторону на 50–60 м. Также следует отметить, что соотношение долей микроэлементов во всех трех фракциях для проб, отобранных в точке, удаленной на 50 м от автотрассы, совпадает с аналогичными результатами, полученными нами в 2001–2002 гг.

В табл. 2 представлены данные по содержанию в снегу 19 компонентов ПАУ, а также их суммарной концентрации (ΣПАУ). Видно, что практически для всех компонентов ПАУ наблюдается монотонное уменьшение их концентрации с увеличением расстояния от дороги.

МОДЕЛЬ ОЦЕНИВАНИЯ АЭРОЗОЛЬНЫХ ВЫПАДЕНИЙ ПОЛИДИСПЕРСНОЙ ПРИМЕСИ

Предварительный анализ полученных экспериментальных данных наблюдений аэрозольных выпадений примесей показывает, что изменение их концентраций по мере удаления от автомагистрали весьма существенно. Это позволяет сделать предположение о наличии в составе выпадений крупных аэрозольных фракций. Для априорного описания распределения вещества примеси (*N*) по скорости оседания (*w*) в атмосфере воспользуемся двухпараметрической функцией [9, 10]

$$N(w) = \frac{a^{m+1}}{\Gamma(m+1)} w^m e^{-aw}, \quad m \geq -1, \quad a = m/w_m \quad (1)$$

где *w_m* – скорость преобладающей по количеству частиц фракции примеси; *m* – степень однородности распределения частиц примеси по скорости *w*; $\Gamma(m)$ – гамма-функция Эйлера.

Расчет поля выпадений полидисперсной примеси (*p*) от точечного источника основан на соотношении [9, 11]

$$p = \int_0^\infty w q_w N(w) dw \quad (2)$$

где *q_w* – поле концентрации монодисперсной примеси со скоростью оседания *w*.

При расчете средней концентрации в приземном слое атмосферы определяющее значение имеют часто встречающиеся метеорологические условия. К ним относятся так называемые нормальные метеоусловия, для которых используется степенная аппроксима-

ция скорости ветра *u(z)* и коэффициента вертикального турбулентного обмена *K_z* [12]:

$$u(z) = u_1 (z/z_1)^n, \quad K_z = k_1 z/z_1 \quad (3)$$

где *u₁* и *k₁* – значения *u* и *K_z* при *z* = *z₁*.

С использованием соотношений (3) и аналитических решений уравнения турбулентной диффузии для невысоких источников поле концентрации *q_w* вблизи земли можно представить в виде [11, 13]

$$q_w(x, y) = \frac{M c^\omega}{2(1+n)\sqrt{\pi k_0} \Gamma(1+\omega) x^{1.5+\omega}} \times \exp\left(-\frac{c}{x} - \frac{y^2}{4k_0 x}\right) \quad (4)$$

Здесь ось *x* ориентирована в направлении ветра; ось *y* направлена в поперечном ветру направлении; *M* – мощность источника примеси; *k₀* – параметр турбулентного обмена в направлении оси *y*,

$$c = u_1 H^{1+n} / (1+n)^2 k_1, \quad \omega = w / (k_1(1+n)) \quad (5)$$

С учетом соотношений (1), (4) выражение (2) можно представить в виде

$$p(x, y) = \frac{M a^{m+1}}{2(1+n)\sqrt{\pi k_0} \Gamma(1+m) x^{1.5}} \exp\left(-\frac{c}{x} - \frac{y^2}{4k_0 x}\right) \times \int_0^\infty \frac{w^{m+1} \exp(-aw)}{\Gamma(1+\omega)} \left(\frac{c}{x}\right)^\omega dw = \frac{Q}{x^{1.5}} \exp\left(-\frac{c}{x} - \frac{y^2}{4k_0 x}\right) \times \int_0^\infty \frac{\omega^{m+1} \exp(-R\omega)}{\Gamma(1+\omega)} \left(\frac{c}{x}\right)^\omega d\omega, \quad (6)$$

$$Q = \frac{MR^{m+2}}{2(1+n)a\sqrt{\pi k_0} \Gamma(1+m)}, \quad R = a(1+n)k_1$$

Тогда поле концентрации, создаваемое бесконечным линейным источником, находится на основе суперпозиции полей выпадений от точечных источников:

$$p_{\text{лин}}(x, y) = \int_{-\infty}^\infty p(x_p, y_p) d\eta \quad (7)$$

где $x_p = s_1 - \eta \sin\beta$; $y = s_2 - \eta \cos\beta$; $s_1 = x \cos\beta + y \sin\beta$; $s_2 = -x \sin\beta + y \cos\beta$; β – угол между направлением ветра и осью *x*.

Наиболее простой вид выражение (7) приобретает при $\beta = \pi/2$. В этом случае получаем:

$$p_{\text{лин}}(x) = \frac{\theta_1}{x} \exp\left(-\frac{c}{x}\right) \int_0^\infty \frac{\omega^{\theta_2} \exp(-\theta_3 \omega)}{\Gamma(1+\omega)} \left(\frac{c}{x}\right)^\omega d\omega \quad (8)$$

$$\theta_1 = \frac{MR^{m+2}}{(1+n)a\Gamma(1+m)}, \quad \theta_2 = m + 1, \quad \theta_3 = R$$

Исследование свойств функции (8) показывает, что в интервале значений $x \in (0, \infty)$ она достигает максимума в некоторой точке x_0 , монотонно возрастает при $x \in (0, x_0)$ и соответственно монотонно убывает в интервале значений $x \in (x_0, \infty)$ и стремится к нулю при $x \rightarrow 0, x \rightarrow \infty$. Оценка неизвестных параметров $\theta_1, \theta_2, \theta_3$, входящих в соотношение (8), проводится методом наименьших квадратов с использованием данных измерений плотности выпадений примеси в точках отбора снеговых проб [14]. Следует также отметить, что величина s соответствует расстоянию, на котором в пробе отмечается максимальная концентрация легкой примеси [11].

ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Согласно данным рис. 1, исследуемый участок автотрассы простирается с юго-востока на северо-запад. В связи с этим для оценивания полей аэрозольных выпадений примесей можно использовать упрощенную модель (8), поскольку среднезимняя повторяемость ветров южного, юго-западного и западного направления составляет около 70 % [7]. Соответственно доля ветров северного, северо-восточного и восточного направлений составляет всего 14 %, что условно позволяет выделить “подветренную” и “наветренную” стороны и определить доли выноса примеси по обе стороны от автотрассы как 5 : 1.

На рис. 2, а приведены результаты оценивания полей выпадений суммы компонентов ПАУ на основании модели (8). Результаты численного восстановления поля концентрации вполне согласуются с данными измерений в контрольных точках. Некоторое расхождение измеренных и вычисленных значений в точке № 4, на наш взгляд, обусловлено заметным отклонением от среднего уровня влагозапаса в этой точке (см. рис. 1, б), а также наличием большого градиента поля концентрации. Полученные оценки параметров θ_2, θ_3 , непосредственно связанные с характеристиками дисперсного состава, использованы для восстановления поля концентрации бенз(а)пирена (см. рис. 2, б). В данном случае с использованием модели (8) проведена оценка толь-

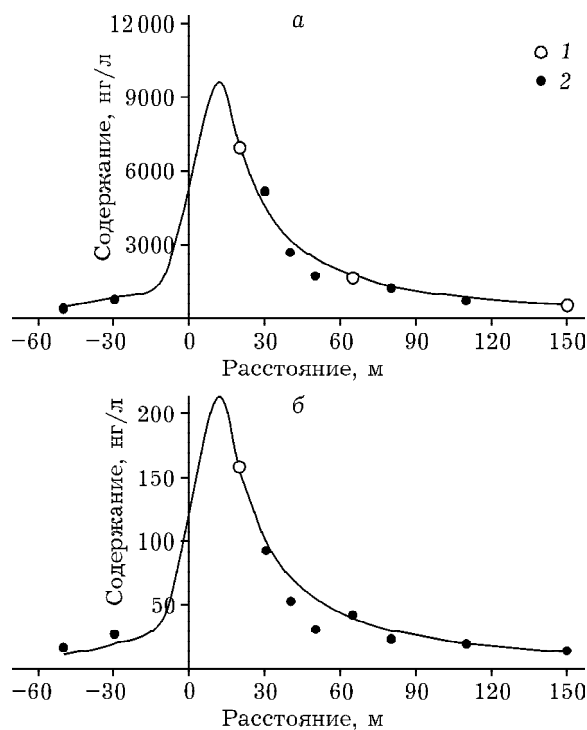


Рис. 2. Измеренные и восстановленные по модели (8) данные по суммарному содержанию в снеге ПАУ (а) и бенз(а)пирена (б). Здесь и на рис. 3: 1, 2 – опорные и контрольные точки наблюдения соответственно.

ко параметра θ_1 , и для его определения использовалось наблюдение в опорной точке, удаленной на 20 м от дороги.

Данные моделирования пространственной динамики компонентов ионного состава на примере натрия и сульфат-ионов представлены на рис. 3. Видно, что модельная кривая, параметры которой оценены по трем экспериментальным точкам, хорошо описывает снижение концентрации натрия на участках, расположенных по обе стороны от автотрассы. Для сульфат-ионов прямые оценки параметров модели из экспериментальных данных дали систематическое отклонение в точках с наветренной стороны дороги (см. рис. 3, б). При вычете фоновой концентрации сульфат-ионов (1.4 мг/л) наблюдается хорошее совпадение экспериментальных точек с модельной кривой.

Для тяжелых металлов результаты моделирования, как для части, относящейся к крупнодисперсному осадку, так и суммарно к мелкодисперсному осадку и фильтрату, согласуются с ранее полученными результатами [3].

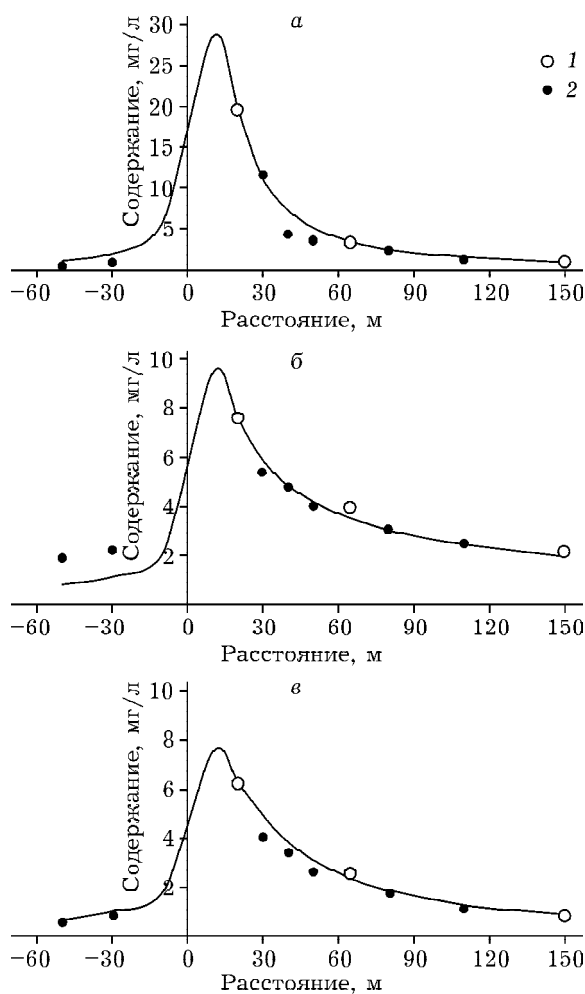


Рис. 3. Измеренные и восстановленные данные по содержанию в снегу ионов Na^+ (а) и SO_4^{2-} с учетом (б) и без учета (в) фоновых значений. Обозн. см. рис. 2.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные в работе химико-аналитические и численные исследования загрязнения снегового покрова в окрестностях автомагистрали позволяют сделать следующие выводы.

С использованием двух схем пробоподготовки проведено определение основных неорганических и органических компонентов химического состава в пробах, отобранных в десяти точках по специальному маршруту на удалении до 150 м от автотрассы. Неорганические компоненты включают восемь макрокомпонентов и три микроэлемента, органические компоненты – 19 компонентов ПАУ. Анализ данных практически по всем параметрам состава свидетельствует о наличии монотонно ниспадающей зависимости концентрации элементов с удалением от автотрассы.

На основе аналитических зависимостей (1), (4) разработаны малопараметрические модели оценивания выпадений примеси с учетом неоднородности ее аэрозольного состава. Полученные модели могут быть использованы для оценивания полей как разового, так и длительного загрязнения местности.

Апробация предложенной модели показала ее удовлетворительное согласие с данными наблюдений ПАУ, макрокомпонентов. Для восстановления полей аэрозольных выпадений требуется относительно небольшое количество опорных точек наблюдений. С учетом полидисперсности состава примесей в рамках единой модели можно проводить интерпретацию результатов экспериментальных исследований для значительного диапазона расстояний.

Следует отметить весьма высокий уровень содержания ПАУ в снегу как вблизи, так и на большом удалении от автотрассы, что указывает на значительное загрязнение атмосферного воздуха мелкодисперсными компонентами.

Учитывая доминирующее влияние выбросов автотранспорта на окружающую среду города, необходимо расширять теоретические и прикладные исследования по этой проблеме, более широко привлекать методы инструментального мониторинга текущего загрязнения атмосферного воздуха и разрабатывать эффективные мероприятия по снижению негативного воздействия.

Работа выполнена при финансовой поддержке Программы фундаментальных исследований Президиума РАН (проект № 16) и СО РАН (интеграционный проект № 84).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Александров В. Ю., Кузубова Л. И., Яблокова Е. П. Экологические проблемы автомобильного транспорта: анализ обзор. Новосибирск: Изд. ГИИТБ СО РАН, 1995. Вып. 34.
- 2 Загрязнение воздуха и жизнь растений / под ред. М. Трешоу. Л.: Гидрометеиздат, 1988.
- 3 Рапута В. Ф., Коковкин В. В., Шуваева О. В., Морозов С. В. // Оптика атмосферы и океана. 2001. Т. 14. С. 240.
- 4 Рапута В. Ф., Коковкин В. В., Шуваева О. В., Садовский А. П., Олькин С. Е., Морозов С. В. // Химия уст. разв. 2002. Т. 10, № 6. С. 683.
- 5 Василенко В. Н., Назаров И. М., Фридман Ш. Д. Мониторинг загрязнения снежного покрова. Л.: Гидрометеиздат, 1985.
- 6 Методические рекомендации по оценке степени загрязнения атмосферного воздуха населенных пунк-

- тов металлами по их содержанию в снежном покрове и почве. М.: Гл. сан.-проф. упр. МЗ СССР, 1990.
- 7 Климат Новосибирска / под ред. С. Д. Кошинского и Ц. А. Швер. Л.: Гидрометеиздат, 1979.
- 8 ГОСТ 27384–2002. Вода. Нормы погрешности измерения показателей состава и свойств. Минск: Межгосударственный совет по стандартам, метрологии и сертификации, 2002.
- 9 Прессман А. Я. // Инж.-физ. журн. 1959. Т. 2. С. 78.
- 10 Петров В. Н., Прессман А. Я. // ДАН СССР. 1962. Т. 146. С. 86.
- 11 Берлянд М. Е. Прогноз и регулирование загрязнения атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1985.
- 12 Бызова Н. Л., Гаргер Е. К., Иванов В. Н. Экспериментальные исследования атмосферной диффузии и расчеты рассеяния примеси. Л.: Гидрометеиздат, 1991.
- 13 Коковкин В. В., Рапута В. Ф., Шуваева О. В., Морозов С. В. // Оптика атмосферы и океана. 2000. Т. 13. С. 788.
- 14 Успенский А. Б., Федоров В. В. Вычислительные аспекты метода наименьших квадратов при анализе и планировании регрессионных экспериментов. М.: Изд-во МГУ, 1975.