

**В.Ф. Рапута, В.В. Коковкин, О.В. Шуваева, А.П. Садовский,
С.Е. Олькин, И.К. Резникова, С.В. Морозов**

Мониторинг загрязнения снегового покрова в окрестностях автотрасс

*Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН,
Институт неорганической химии СО РАН, г. Новосибирск
Новосибирский институт органической химии СО РАН
НИИ аэриологии ГНЦ ВБ «Вектор», пос. Кольцово Новосибирской обл.*

Поступила в редакцию 27.11.2001 г.

Предложена модель восстановления кратковременного загрязнения приземного слоя воздуха выбросами от автотранспорта. Для различных направлений ветра выявлены зоны интенсивного загрязнения. Проведена апробация численной модели длительного аэрозольного загрязнения местности на данных маршрутных снегосъемок в окрестностях Барнаульской автотрассы и Советского шоссе г. Новосибирска. Анализируются структурные изменения аэрозольных выбросов от автотранспорта в течение зимних сезонов 1998–2001 гг.

Введение

Для разработки мероприятий по охране атмосферы от загрязнения необходимы методы оценки выбросов на автомагистралях от автотранспорта. Эти выбросы зависят от большого числа факторов: характерных категорий, интенсивности и скоростей движения автомобилей; изношенности и уровня эксплуатации двигателей; используемого горючего и др. Разработан ряд методов оценки годовых выбросов от автотранспорта как по городам в целом, так и по отдельным автотрассам [1–5]. Большое внимание уделялось изучению загрязнения воздуха окислами углерода. Проводились детальные исследования временной динамики загрязнения воздуха, влияния метеорологических условий. Загрязняющие вещества поступают в атмосферу от автотранспорта также в виде аэрозолей, имеющих разнообразный дисперсный и химический состав.

Распространение аэрозольных примесей в окрестностях автотрасс изучено более слабо в плане как экспериментальных исследований, так и количественного описания. Исследования в этом направлении содержатся в работах [6–8]. В них проводится изучение процессов длительного загрязнения снегового покрова. Анализ данных химического состава снега с использованием теоретических представлений о распространении аэрозольных примесей в приземном слое атмосферы позволил выявить пространственные закономерности аэрозольных выпадений пыли, различных форм тяжелых металлов, в частности свинца, полиароматических углеводородов (ПАУ), макрокомпонентов. На основе полученных зависимостей проведено оценивание суммарных выбросов от автотранспорта для ряда зимних сезонов, получены оценки относительного изменения дисперсного состава. Использование снегового покрова в качестве индикатора уровня

аэрозольного загрязнения местности создает в условиях Сибири уникальные возможности эффективного контроля выбросов от автотранспорта. Сравнительно простая процедура отбора проб снега позволяет проводить масштабное обследование окрестностей автотрасс.

1. Модель разового загрязнения

Предварительно рассмотрим линейный источник конечной длины, который расположен по оси y в интервале (L_1, L_2) . Пусть горизонтальное направление ветра составляет с осью x угол β (отсчет ведется от оси x против часовой стрелки). Тогда распространение слабооседающей примеси от точечного источника, расположенного в точке $\eta \in (L_1, L_2)$, можно описать следующим соотношением [9, 10]:

$$q = \frac{M}{(1+n) k_1 \varphi_0 x_p^2 \sqrt{2\pi}} \times \exp\left(-\frac{u_1 H^{1+n}}{k_1 (1+n)^2 x_p} - \frac{y_p^2}{2\varphi_0^2 x_p^2}\right), \quad (1)$$

где M – мощность источника; k_1, u_1 – коэффициент вертикального турбулентного обмена и скорость ветра на 1 м соответственно; φ_0 – дисперсия отклонений направления скорости ветра; n – показатель степени в аппроксимации скорости ветра степенным профилем; H – эффективная высота источника;

$$x_p = a - \eta \sin\beta; \quad y_p = b - \eta \cos\beta; \\ a = x \cos\beta + y \sin\beta; \quad b = -x \sin\beta + y \cos\beta.$$

В силу принципа суперпозиции концентрация q_π для линейного источника определяется равенством

$$q_{\pi}(x, y, \beta) = \Theta_0 \int_{L_1}^{\eta_P} e^{-\frac{\alpha}{xP} - \frac{y_P^2}{2\varphi_0^2 x^2}} \frac{d\eta}{x^2}, \quad (2)$$

где

$$\Theta_0 = \frac{M}{(1+n)k_1\varphi_0\sqrt{2\pi}}; \quad \alpha = \frac{u_1 H^{1+n}}{(1+n)^2 k_1};$$

$$\eta_P = \begin{cases} L_2 & \text{при } y + x \operatorname{ctg} \beta \geq L_2, \\ y + x \operatorname{ctg} \beta & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

В результате интегрирования выражения (2) получим [1]:

$$q_{\pi} = \frac{\Theta}{x} \exp\left(-\frac{\alpha \cos \beta}{x} + \frac{\alpha^2 \varphi_0^2 \sin^2 \beta}{2x^2}\right) (\operatorname{erf} S_2 - \operatorname{erf} S_1), \quad (3)$$

где

$$\Theta = \frac{M}{2k_1(1+n)}; \quad S_i = \frac{\varphi_0 \alpha \sin \beta}{x\sqrt{2}} - \frac{\cos \beta}{\varphi_0 \sqrt{2} \sin \beta} + \frac{x}{\varphi_0 \sqrt{2} \sin \beta (\alpha - A_i \sin \beta)}, \quad i = 1, 2; \quad (4)$$

$$\operatorname{erf} S = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^S \exp(-\xi^2) d\xi, \quad A_1 = L_1, \quad A_2 = \eta_P.$$

Аналитическое выражение поля концентрации (3) с использованием агрегированных параметров Θ и α вместо исходных u_1, k_1, H, n, M позволяет существенно упростить анализ данных наблюдений загрязнения приземного слоя воздуха. Параметры Θ, α , а также φ_0 могут быть найдены с использованием (3) и данных наблюдений методом наименьших квадратов. Для повышения точности оценивания целесообразно использование математических методов планирования наблюдений [11,12]. При $L_1 \rightarrow -\infty, L_2 \rightarrow \infty$ из соотношения (3) вытекает формула для поля концентрации, создаваемого бесконечным линейным источником:

$$q_{\infty}(x, \beta) = \frac{\Theta}{x} \exp\left(-\frac{\alpha \cos \beta}{x} + \frac{\alpha^2 \varphi_0^2 \sin^2 \beta}{2x^2}\right) \times \left[1 - \frac{2}{\pi} \int_0^{r(x, \beta)} \exp(-\xi^2) d\xi\right]. \quad (5)$$

Здесь

$$r(x, \beta) = \frac{\varphi_0 \alpha \sin \beta}{x\sqrt{2}} - \frac{\cos \beta}{\varphi_0 \sqrt{2} \sin \beta}.$$

Формула (5) позволяет получить ряд полезных соотношений. В частности, из (5) следует

$$q_{\infty}(x, \beta)|_{\beta=0} = \frac{2\Theta}{x} \exp\left(-\frac{\alpha}{x}\right). \quad (6)$$

Причем максимум выражения (6) достигается при $x_{\max} = \alpha$. Тогда

$$q_{\infty}(x_{\max}, 0) = \frac{(1+n)M}{e u_1 H^{1+n}}. \quad (7)$$

Рассмотрим другой крайний случай – $\beta = \pi/2$:

$$q_{\infty}\left(x, \frac{\pi}{2}\right) = \frac{\Theta}{x} \exp\left(\frac{\alpha^2 \varphi_0^2}{2x^2}\right) \left[1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\frac{\alpha \varphi_0}{x\sqrt{2}}} \exp(-\xi^2) d\xi\right]. \quad (8)$$

С использованием асимптотического представления интеграла при $x \rightarrow 0$ получим [4]:

$$q_{\infty}\left(x, \frac{\pi}{2}\right) = \frac{\Theta}{x} \exp\left(\frac{\alpha^2 \varphi_0^2}{2x^2}\right) \times \left\{1 - \left[1 - \exp\left(-\left(\frac{\alpha \varphi_0}{\sqrt{2}x}\right)^2\right) \frac{\alpha \varphi_0 \sqrt{\pi}}{\sqrt{2}x}\right]\right\} = \frac{\sqrt{2}\Theta}{\sqrt{\pi} \alpha \varphi_0} = \frac{(1+n)M}{\sqrt{2\pi} \varphi_0 u_1 H^{1+n}}. \quad (9)$$

Из (9) вытекает, что при ветре, направленном вдоль автотрассы, концентрация существенно возрастает по сравнению с (7), поскольку обычно $\varphi_0 < 0,15$ [9].

2. Восстановление длительного загрязнения

С учетом (1) выражение для вычисления концентрации оседающей примеси в окрестности автотрассы можно представить в виде [7]:

$$S(x, y, \Theta_0, \Theta_1) = \Theta_0 \int_0^{2\pi} \int_{L_1}^{\eta_P} q(x_P, y_P) \lambda(x_P, \Theta_1) R(\varphi + 180^\circ) d\eta d\varphi, \quad (10)$$

где

$$\lambda(x_P, \Theta_1) = x_P^{\Theta_1}, \quad \Theta_1 = \frac{\omega}{k_1(n+1)}, \quad (11)$$

ω – средняя скорость оседания аэрозольных частиц; $R(\varphi)$ – среднезимняя роза ветров для рассматриваемой местности. Функция $R(\varphi)$ обычно измеряется для дискретного набора углов

$$\varphi_j = j\Delta\varphi / N, \quad j = \overline{1, N},$$

где $\Delta\varphi = 2\pi / N$, N – число румбов. Для получения непрерывной зависимости функции R от φ полезно использовать следующую линейную интерполяцию:

$$R_j(\varphi) = P_j + \frac{(P_{j+1} - P_j)\varphi}{\Delta\varphi},$$

$j\Delta\varphi \leq \varphi \leq (j+1)\Delta\varphi$; P_j – повторяемость направления ветра для j -го румба.

Учет эффектов оседания не позволяет упростить путем интегрирования выражение (10), как в случае невесомой примеси, что приводит к вычислению довольно громоздких выражений. Существенными параметрами в (10) являются Θ_0 , Θ_1 . Для их оценки на основе (10) необходимо проведение наблюдений не менее чем в двух точках местности. Процедура оценивания заметно упрощается, если учесть линейность выражения (10) относительно параметра Θ_0 . Это позволяет провести раздельное определение параметров Θ_0 и Θ_1 . Для повышения устойчивости оценивания целесообразно на этапе экспериментальных исследований использование оптимальных схем пробоотбора. Расчет оптимального размещения точек наблюдений можно провести на основе алгоритмов последовательного анализа и планирования эксперимента [11, 12].

3. Экспериментальные условия и планирование наблюдений

Изучение загрязнения снегового покрова проводилось в окрестностях Барнаульской автотрассы и Советского шоссе г. Новосибирска. Пробы снега отбирались в начале марта 2001 г. по обе стороны от автотрасс. Участки обеих автотрасс, в окрестностях которых проходил маршрутный пробоотбор, одинаково ориентированы относительно частей света, проходят с юго-востока на северо-запад и находятся друг от друга на расстоянии около 30 км. Местность, где проходил отбор проб, является однородной, практически лишена растительности. Это позволяет проводить непосредственное сравнение полученных результатов и дает возможность существенно упростить интерпретацию данных наблюдений, поскольку в зимнее время повторяемость ветров южного и юго-западного направлений составляет более 60%.

На участке Советского шоссе маршрутные наблюдения проводятся четвертый зимний сезон подряд, что дает возможность отслеживать динамику длительного загрязнения, изменения компонентного и дисперсного состава, оценивать суммарные выбросы автотранспорта [6, 7]. По аналогичной схеме в 2001 г. был проведен пробоотбор снега в окрестности Барнаульской автотрассы. С учетом протекающих процессов аэрозольного загрязнения окрестностей автотрасс размещение точек измерения производилось в диапазоне расстояний от 15 до 90 м. Точки наблюдений располагались неравномерно: со сгущением у ближайшего конца отрезка и постепенным разрежением по мере удаления. Загрязнение участка местности шириной до 10–15 м, непосредственно примыкающего к дороге, обусловлено воздействием нескольких процессов, но в большей степени работой снегоочистительной техники. Требуется определенная корректировка на изменение размеров частиц, содержащих загрязняющие вещества. На данной стадии исследования этот участок целесообразно исключить из рассмотрения.

4. Восстановление аэрозольных выпадений

Для восстановления разового загрязнения в окрестностях автотрассы удобно использовать аналитическое выражение (3). При этом необходимо использовать 2–3 точки наблюдения. Для оценивания длительного аэрозольного загрязнения ориентация участков автотрасс, возле которых проводился пробоотбор, позволяет использовать как полную (10), так и приближенную модель [6]:

$$S(x, \Theta_0, \Theta_1) = \frac{\Theta_0}{x^{\Theta_1+1}} \exp\left(-\frac{\alpha}{x}\right). \quad (12)$$

Модель (10) дает возможность проводить восстановление полей концентраций загрязняющих веществ в снеге одновременно по обе стороны от автотрассы. В этом случае нужна информация о розе ветров для данного зимнего сезона. При использовании (12) детальная информация о розе ветров не требуется.

4.1. Свинец

Результаты оценивания уровней содержания свинца в снеге для Советского шоссе по модели (10) приведены на рис. 1.

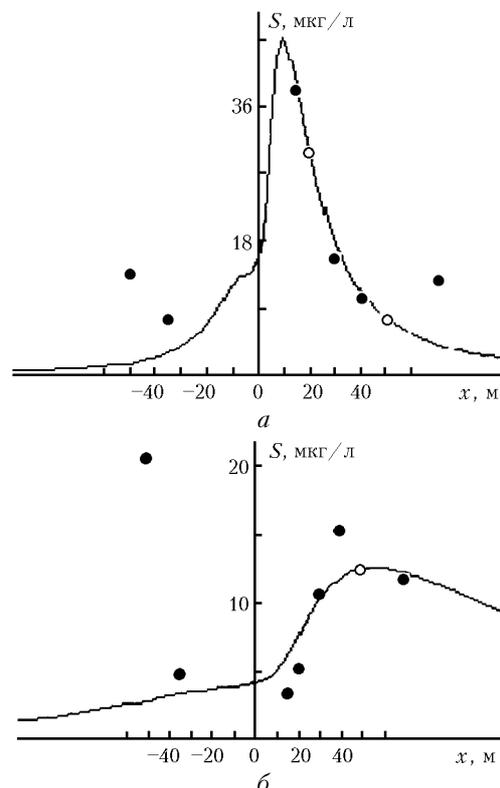


Рис. 1. Распределение в снеге крупнодисперсной (а) и суммарно мелкой и водорастворимой (б) фракций свинца: — опорные, — контрольные точки

Восстановление крупнодисперсной фракции свинца представлено на рис. 1, а. На рис. 1, б приведены

результаты численного моделирования по суммарному содержанию свинца в мелкодисперсной и водорастворимой фракциях. Была использована модель (12), соответствующая слабооседающей примеси ($\Theta_1 = 0$). В этом случае для восстановления функции регрессии использовалась лишь одна точка наблюдений, удаленная от автотрассы на 50 м. В табл. 1 приведены данные по распределению водной, мелкой и крупнодисперсной фракций свинца на различном удалении от дороги.

Таблица 1

Долевое распределение свинца по фракциям (%) для зимнего сезона 2000/01 г.

Фракция	Расстояние от автотрассы, м		
	20	30	50
В	6,3	4,1	27
М	3	23,9	22
К	90,7	72	51

Примечание. В – водная, М – мелкая, К – крупная фракция.

Данные по распределению свинца за предыдущие два зимних сезона содержатся в [7]. Анализ табл. 1 показывает, что с удалением от автотрассы происходит существенное перераспределение свинца в сторону мелкой и водорастворимой фракций. На рис. 2 приведена динамика распределения свинца по фракциям за три зимних сезона.

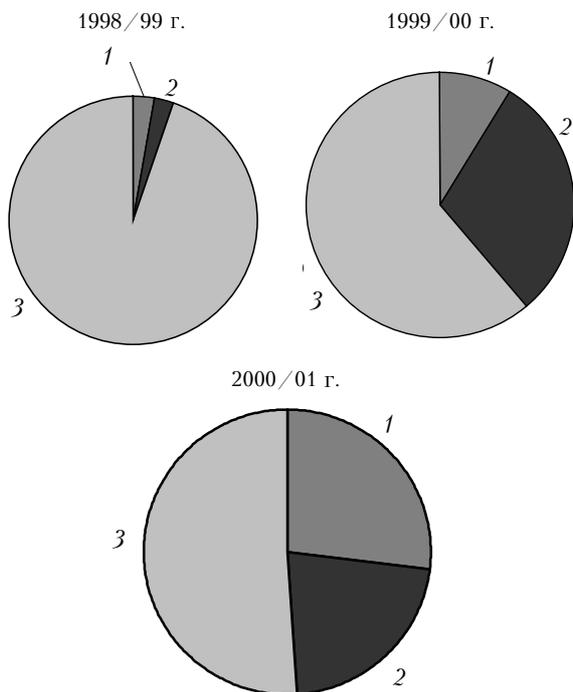


Рис. 2. Распределение свинца по фракциям на расстоянии 50 м от полотна дороги за зимние сезоны 1998–2001 гг.: 1 – водорастворимая, 2 – мелкая, 3 – крупная

Из рис. 2 вытекает, что усиливается тенденция возрастания доли мелкой и водорастворимой фракций, связанная с переводом автотранспорта на неэтилированный бензин.

За зимний сезон 2000/01 г. суммарное содержание свинца в полосе 10–50 м от дороги составило около 140 г/км. Это несколько ниже, чем за зимний сезон 1999/00 г. (190 г/км). Оценка суммарного выброса свинца за зиму 1998/99 г. составила 400 г/км [7].

4.2. Полициклические ароматические углеводороды

Оценивание полей концентраций бенз(а)пирена (БП) в снегу проводилось по данным наблюдений для Советского шоссе и Барнаульской автомагистрали с помощью регрессионных зависимостей (10), (12). В качестве опорных точек наблюдений выбирались две точки с северо-восточных сторон обеих дорог, удаленные от них на 20 и 50 м. На рис. 3 приведены результаты восстановления полей загрязнения.

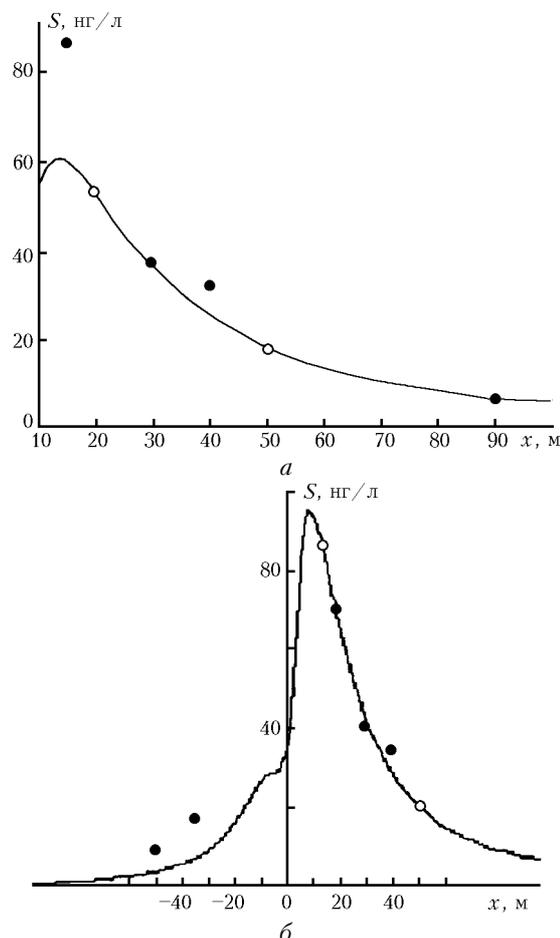


Рис. 3. Рассчитанное и измеренное удельное содержание в снегу бенз(а)пирена для Барнаульской трассы (а) и Советского шоссе (б). Обозначение см. рис. 1

В табл. 2 содержатся данные по оценке параметров для различных компонентов ПАУ. Анализ представленной информации показывает вполне удовлетворительное согласие расчета и результатов наблюдений. Полученные кривые имеют практически подобный характер, что объясняется совпадением оценок параметров Θ_1 для обоих наборов экспериментальных данных.

Таблица 2

Оценки параметров регрессии (10) для компонентов ПАУ

Вещество	Барнаулская автодорога		Советское шоссе	
	Θ_0	Θ_1	Θ_0	Θ_1
Бенз(а)пирен	510	-2,47	517	-2,38
Перилен	$4,7 \cdot 10^4$	-2,5	$3,2 \cdot 10^4$	-2,53
Пирен	$3,2 \cdot 10^3$	-2,27	$6,1 \cdot 10^3$	-2,89

Оценки параметров Θ_0 линейным образом связаны с мощностью источника. Сравнение оценок Θ_0 показывает, что выбросы БП для обеих автодорог оказывают сопоставимыми. В ближней зоне содержание БП в снеге составляет около 100 нг/л, что может оказывать заметное негативное влияние на здоровье (предельно допустимая концентрация БП для воды – 5 нг/л).

Значения параметров Θ_1 для зимнего сезона 2000/01 г. несколько ниже по сравнению с зимним сезоном 1999/00 г. Согласно (11) это означает, что средние размеры аэрозольных частиц, содержащих ПАУ, соответственно уменьшились. Суммарный же выброс ПАУ для этих зимних сезонов практически не изменился и остается достаточно высоким относительно зимнего сезона 1998/99 г. [7].

Заключение

Проведенное комплексное исследование загрязнения снегового покрова и приземного слоя воздуха выбросами от автотранспорта позволяет сделать следующие выводы.

На основе аналитических зависимостей (3), (5) предложены модели оценивания разового загрязнения воздуха окрестностей автодороги, определены зоны интенсивного загрязнения для различных направлений ветра.

Разработана численная модель длительного загрязнения местности выбросами от автотранспорта, позволяющая проводить как восстановление концентраций аэрозольных примесей по обе стороны от дороги, так и их пересчет на произвольную ориентацию дороги относительно частей света. Это существенно расширяет возможности интерпретации экспериментальных исследований.

Апробация предложенной модели показала ее удовлетворительное согласие с данными наблюдений ПАУ, различных фракций свинца. Сравнение восстановленных по данным измерений профилей ПАУ, полученных для Советского шоссе и Барнаулской трассы, показало практически их полную идентичность с точностью до масштабного множителя, связанного с величиной суммарного выброса.

V.F. Raputa, V.V. Kokovkin, O.V. Shuvaeva, A.P. Sadovkii, S.E. Ol'kin, I.K. Reznikova, S.V. Morozov.
Monitoring of snow contamination in vicinities of highways.

The model for restoration of short-term contamination of air surface layer by motor transport is proposed. The areas of intense contamination for different wind directions are determined. The numerical model of long-term aerosol contamination is tested on the data of route snow observation in vicinities of Barnaul highway and Soviet highway in Novosibirsk. Structural changes in motor transport aerosol emissions during 1998–2001 are analyzed.

Существенные структурные изменения в аэрозольных выбросах от автотранспорта, произошедшие в результате его перевода на использование неэтилированного бензина, подтверждаются анализом данных загрязнения снега в течение зимнего сезона 2000/01 г. С учетом степени влияния выбросов от автотранспорта на окружающую среду необходимы дальнейшее расширение теоретических и прикладных исследований по этой проблеме, создание оптимальных и экономичных схем мониторинга, анализа данных и разработка эффективных мероприятий по уменьшению негативного воздействия.

Работа выполнена при финансовой поддержке Интеграционного проекта СО РАН № 64.

1. Буренин Н.С., Соломатина И.И. Об определении вклада выбросов автотранспорта в загрязнение воздушного бассейна городов // Труды ГГО. 1975. Вып. 352. С. 191–199.
2. Детри Ж. Атмосфера должна быть чистой. М.: Медицина, 1973. 379 с.
3. Фельдман Ю.Г. Гигиеническая оценка автотранспорта как источника загрязнения атмосферного воздуха. М.: Медицина, 1973. 379 с.
4. Буренин Н.С., Оникул Р.И., Соломатина И.И. К оценке вклада выбросов автотранспорта в атмосферу и загрязнения воздуха вблизи автомагистралей // Труды ГГО. 1979. Вып. 436. С. 102–110.
5. Буренин Н.С. К оценке временной структуры загрязнения воздуха автотранспортом // Труды ГГО. 1983. Вып. 467. С. 74–80.
6. Рапута В.Ф., Кокочкин В.В., Шуваева О.В., Морозов С.В. Закономерности длительного загрязнения окрестностей автодорог // Оптика атмосф. и океана. 2000. Т. 13. № 8. С. 788–792.
7. Рапута В.Ф., Кокочкин В.В., Шуваева О.В., Морозов С.В. Изменение структуры аэрозольных выбросов автотранспорта г. Новосибирска при переходе на использование неэтилированного бензина // Оптика атмосф. и океана. 2000. Т. 14. № 3. С. 240–243.
8. Пчелинцев В.П. Пространственная изменчивость загрязнения воздушного бассейна г. Сыктывкара по данным о химическом составе снега // Влияние деятельности человека на природную среду Коми АССР. Сыктывкар, 1982. С. 103–114.
9. Берлянд М.Е. Современная проблема атмосферной диффузии и загрязнения атмосферы. Л.: Гидрометеоздат, 1975. 448 с.
10. Берлянд М.Е. Прогноз и регулирование загрязнения атмосферы. Л.: Гидрометеоздат, 1985. 272 с.
11. Федоров В.В. Теория оптимального эксперимента. М.: Наука, 1971. 312 с.
12. Крылова А.И., Рапута В.Ф., Суторихин И.А. Планирование и анализ подфакельных наблюдений концентрации примеси в атмосфере // Метеорол. и гидрол. 1993. № 5. С. 5–13.