

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ДЛИТЕЛЬНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ ОКРЕСТНОСТЕЙ АВТОТРАСС

В.Ф. РАПУТА, В.В. КОКОВКИН, О.В. ШУВАЕВА
*ИБМиМГ СО РАН, ИНХ СО РАН,
Новосибирск, Россия*

Введение

Одним из основных источников загрязнения городов является автомобильный транспорт. Характерными загрязняющими примесями являются оксиды серы и азота, тяжелые металлы, в частности, свинец, полиароматические углеводороды (ПАУ). Выбросы автотранспортом свинца и его соединений представляет значительную опасность для окружающей среды. Они обусловлены широким применением свинцовых присадок, являющихся антидетонационными агентами, для получения бензина с высоким октановым числом.

Существенной мерой по снижению выбросов вредных примесей в окружающую среду, в т.ч. соединений свинца, является перевод автотранспорта на неэтилированный бензин. Для достижения ожидаемой эффективности необходимо выполнение комплекса технических условий эксплуатации автомобильных двигателей [1-3]. В противном случае проводимые мероприятия могут привести к неоднозначным результатам.

В Новосибирской области в течение 1999 и 2000 гг. происходило интенсивное замещение этилированного бензина на неэтилированный, что требует разработки и применения эффективных методов контроля происходящих изменений. В качестве индикатора длительного загрязнения окрестностей автотрасс целесообразно использовать снеговой покров [4, 5]. Для повышения информативности данных наблюдений необходимо выявление и использование количественных закономерностей распространения вредных примесей от автомагистралей.

1. Модели восстановления

Пусть ось Y направлена вдоль автотрассы, ось X расположена в горизонтальной плоскости и перпендикулярна оси Y . Тогда для однородной местности поле $q(x, y)$ длительного аэрозольного загрязнения окрестностей участка автотрассы можно описать следующим образом [6]:

$$q(x, y) = \int_0^{L_1} \int_{L_2}^{L_2} \left[S(a) / 2\sqrt{\pi k_0 a} \right] \cdot e^{-\frac{b^2}{4k_0 a}} P(\varphi) d\eta d\varphi, \quad (1)$$

где L_1, L_2 - концы участка автотрассы, $a = x \cos \varphi + (y - \eta) \sin \varphi$, $b = -x \sin \varphi + (y - \eta) \cos \varphi$, φ - угол между осью X и направлением ветра, $S(a)$ - приземное поле концентрации от линейного источника, k_0 - коэффициент, характеризующий турбулентную диффузию примеси в поперечном к ветру направлении, $P(\varphi)$ - вероятность противоположного φ направления ветра.

Поле аэрозольных выпадений $S(a)$ от линейного источника определяется на основе решения полуэмпирического уравнения турбулентной диффузии в приземном слое атмосферы [6, 7]

$$u \frac{\partial S}{\partial a} - w \frac{\partial S}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} k(z) \frac{\partial S}{\partial z} \quad (2)$$

с естественными граничными условиями.

Здесь u - скорость ветра в направлении подвижной оси a , w - скорость оседания аэрозольной примеси, $k(z)$ - коэффициент вертикального турбулентного обмена.

Расчет по формуле (1) можно упростить, если воспользоваться аналитическим решением уравнения (2) для случая степенных представлений функций $u(z)$ и $k(z)$ в приземном слое атмосферы [6, 7].

В этом случае имеет место соотношение [6, 8]:

$$S(r, \theta) = \frac{\theta_1}{r^{\theta_2}} \cdot e^{-\frac{r_m}{r}}, \quad (3)$$

где

$$\theta_1 = \frac{G \cdot r_m^\omega}{2(1+n) \cdot k_1 \cdot \Gamma(1+\omega)}, \quad \theta_2 = 1 + \omega, \quad (4)$$

$$\omega = \frac{w}{k_1(n+1)}, \quad r_m = \frac{u_1 H^{1+n}}{(1+n)^2 \cdot k_1},$$

G - мощность линейного источника, n - показатель степени в аппроксимации скорости ветра степенным профилем, k_1 - коэффициент вертикального турбулентного обмена на высоте 1 м, $\Gamma(1+\omega)$ - гамма-функция.

Использование соотношения (3) позволяет снизить число неизвестных параметров в формуле (1) до четырех ($\theta_1, \theta_2, r_m, k_0$), которые могут быть определены по данным измерений поля концентрации не менее, чем в четырех различных точках. Число неизвестных параметров уменьшается, если автотрасса проходит в поперечном направлении к господствующим ветрам. В этом случае зависимость от параметра k_0 практически исчезает и восстановление загрязнения с подветренной стороны дороги проводится по формуле (3) на основе оценок параметров θ_1 и θ_2 . Величина r_m соответствует точке максимума приземной концентрации примеси для слабо оседающей примеси ($\theta_2 \rightarrow 1$) [6] и может быть предварительно найдена.

2. Оценивание полей загрязнения

Объектом экспериментальных исследований являлся участок Советского шоссе в левобережной части Советского района г. Новосибирска. Этот участок дороги направлен с юго-востока на северо-запад. В зимнее время правая сторона дороги подвергается наибольшему загрязнению в силу высокой повторяемости ветров южного и юго-западного направлений, составляющей более 60% [9]. Такая ориентация автотрассы упрощает задачи исследования, так как позволяет ограничиться проведением маршрутной снегосъемки с подветренной стороны и использовать для интерпретации данных наблюдений модель (3). Более масштабное экспериментальное изучение загрязнения снега в окрестностях этого участка проводилось в конце зимы 1999 года [5], которое позволило установить количественные закономерности распределения аэрозольных загрязнений. Основной задачей исследования 2000 года являлось уточнение зон интенсивного загрязнения местности непосредственно выхлопами автотранспорта и оценивание характеристик аэрозольных выбросов. В связи с этим отбор проб снега проводился на расстояниях не менее 20 метров от полотна дороги.

Восстановление уровней загрязнения снежного покрова велось на основе регрессионной зависимости (3) в приближении тяжелой и слабо оседающей ($\theta_2 \rightarrow 1$) примеси. Для примесей с относительно высокими скоростями оседания оценивание параметров (3) выполнялось по наблюдениям, полученным на расстояниях 20 м и 35 м (опорные точки). Остальные точки измерений использовались для контроля уровня соответствия расчетов наблюдениям.

Интерпретация данных экспериментальных исследований по модели (3) проводилась на макро- и микроэлементном составе снеговых проб, ПАУ. Анализ результатов численного моделирования показал вполне удовлетворительное согласие расчетных зависимостей измеряемым характеристикам [5, 10]. Некоторые расхождения имеют место на значительных удалениях от автотрассы, что объясняется недостаточным учетом эффекта полидисперсности выбрасываемых автотранспортом аэрозольных примесей.

3. Структурные изменения выбросов автотранспорта

Согласно соотношениям (3), (4) оценки параметра θ_2 характеризуют средние скорости W оседания аэрозольных частиц в окрестности автотрассы и непосредственно связаны с их размерами. Согласно (4) изменения относительной скорости оседания λ можно описать следующим выражением

$$\lambda = \frac{\theta_2^{**} - 1}{\theta_2^* - 1}, \quad (5)$$

где θ_2^* , θ_2^{**} - оценки параметра θ_2 для зимних сезонов 1999 и 2000 гг. соответственно.

Оценку аэрозольных выпадений M выбросов автотранспорта будем проводить на основе (3) согласно формуле

$$M = \int_{10,м}^{50,м} S(r, \theta) dr. \quad (6)$$

В табл. 1 представлены оценки параметров θ_2 и M по данным маршрутных снегоъемок 1999 и 2000 гг. для некоторых компонентов ПАУ.

Таблица 1

Оценки суммарных выпадений и относительных скоростей оседания ПАУ

ПАУ	Оценка θ_2		Оценка выпадений, M , г/км		Скорость относительного оседания, λ
	1999 г.	2000 г.	1999 г.	2000 г.	
Бенз(а)пирен	1,27	3,6	0,16	0,55	9,6
Флуорантен	1,45	4,08	1,2	1,9	7
Пирен	1,72	4,2	0,6	1,5	4,4

При оценке суммарного содержания ПАУ в окрестностях автотрассы привлекалась информация о влагозапасе снега на маршрутах снегоотбора. Масса снега по пробам 1999 года в среднем составила 103 кг/м², в 2000 году она увеличилась до 140 кг/м².

Рассмотрение таб.1 показывает, что в 2000 году по сравнению с прошлым зимним сезоном поступление компонентов ПАУ в придорожную полосу от 10 до 50 м увеличилось от 1,5 до 3 раз. Скорость относительного оседания аэрозольных частиц, содержащих ПАУ значительно изменилась. Ее рост для различных ПАУ составил от 4 до 10 раз. Отсюда следует, что произошел также рост средних размеров частиц с ПАУ, которые увеличились, согласно формуле Стокса [6], в 2-3 раза.

Таблица 2

Долевое распределение свинца по фракциям, %

Зимний сезон	Фракция	Расстояние от автотрассы, м		
		20	30	50
1998-1999гг.	В	1,4	2,7	2,8
	М	0,4	6,1	2,5
	К	98,2	91,2	94,7
1999-2000гг.	В	7	14	9
	М	22	28	30
	К	71	59	61

Примечание: В – водная, М – мелкая, К – крупная фракции.

В таб. 2 представлены данные по распределению различных форм свинца для зимних сезонов 1998-

1999 и 1999-2000 гг. Ее анализ показывает, что к 2000 году произошло существенное изменение соотношения содержания свинца между фракциями. Если в 1999 году для всех расстояний абсолютно доминировала крупнодисперсная фракция, то в 2000 году суммарный вклад мелкодисперсной фракции и водорастворимой части стал сопоставимым с ней. Для придорожной полосы 10-50 м суммарное содержание свинца в снеге для зимы 1998-1999 гг. составил около 400 г/км, а в зимний сезон 1999-2000 гг. выпадения свинца составили 193 г/км. Из данных табл. 2 вытекает, что произошедшее снижение содержания свинца, в основном, связано с уменьшением крупнодисперсной составляющей.

Заключение

Проведенное исследование позволяет сделать следующие выводы:

В области интенсивного загрязнения местности выхлопами автотранспорта распределения удельного содержания макрокомпонентов, ПАУ, суммы содержания свинца в растворенной и нерастворенной фракциях вполне удовлетворительно описываются моделью (3) линейного приподнятого источника. Максимум приземной концентрации для слабо оседающей примеси формируется на расстоянии 30 м от полотна дороги.

Наибольшие изменения за зимний сезон 1999-2000 гг. произошли в выбросах ПАУ. Суммарное поступление в придорожную полосу от 10 до 50 м для бенз(а)пирена выросли в 3 раза, флуорантена и пирена в 1,5 и 2,5 раза соответственно. Средние размеры аэрозольных частиц, содержащих ПАУ, также заметно увеличились. Для рассматриваемых компонентов ПАУ они изменились от 2 до 3 раз по сравнению с зимним сезоном 1998-1999 гг.

В результате использования в качестве горючего больших объемов неэтилированного бензина наряду с этилированным произошли существенные изменения как в структуре аэрозольных выбросов автотранспорта, так и в массе поступающих вредных примесей. Суммарное снижение свинца в 2000 г. происходило, в основном, за счет крупнодисперсной фракции. Это обстоятельство следует учитывать при оценке эффективности проводимых мероприятий, поскольку крупнодисперсная фракция свинца представляет меньшую опасность при загрязнении окружающей среды.

Для получения более полной картины загрязнения окрестностей автотрассы необходимо проведение дополнительных исследований, связанных с влиянием эффектов полидисперсности и воздействием снегоуборочной техники на прилегающую к автотрассе полосу.

Литература

- [1] Александров В.Ю., Кузубова Л.И., Яблокова Е.П. Экологические проблемы автомобильного транспорта. Аналитический обзор. Выпуск 34. Новосибирск: Изд-во ГПНТБ СО РАН, 1995. 32с.
- [2] Загрязнение воздуха и жизнь растений / Под ред. М.Трешоу. Л.: Гидрометеиздат, 1988. 250с.
- [3] Силантьев А.Н., Шкуратова И.Г. Обнаружение промышленных загрязнений почвы и атмосферных выпадений на фоне глобального загрязнения. Л.: Гидрометеиздат, 1983. 136с.
- [4] Окружающая среда и экологическая обстановка в Новосибирском научном центре СО РАН. Новосибирск: Изд. СО РАН, 1995. 186с.
- [5] Коковкин В.В., Рапута В.Ф., Шуваева О.В., Морозов С.В. Закономерности длительного загрязнения окрестностей автотрасс//Оптика атмосферы и океана. 2000. Т.13. №8. С.788-792.
- [6] Берлянд М.Е. Современные проблемы атмосферной диффузии и загрязнения атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1975. 448с.
- [7] Бызова Н.Л. Рассеяние примеси в пограничном слое атмосферы. М.: Гидрометеиздат, 1974. 192с.
- [8] Крылова А.И., Рапута В.Ф., Суторихин И.А. Планирование и анализ подфакельных наблюдений примеси в атмосфере//Метеорология и гидрология. 1993. №5. С.5-13.
- [9] Климат Новосибирска. Л.: Гидрометеиздат, 1979. 222с.
- [10] Рапута В.Ф., Коковкин В.В., Шуваева О.В., Морозов С.В. Изменение структуры выбросов автотранспорта г. Новосибирска при переходе на использование неэтилированного бензина// Оптика атмосферы и океана. 2001. Т.14. №3. С.282-287.