

УДК 551.511.61

В.Ф. Рапута, А.П. Садовский, С.Е. Олькин, Н.А. Лаптева

## ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ГОРОДА ПО ДАННЫМ МОНИТОРИНГА СНЕЖНОГО ПОКРОВА

Рассматривается малопараметрическая модель оценки состояния длительного загрязнения городской территории по данным наблюдений. Обсуждаются вопросы оптимального размещения точек отбора проб. Проводится анализ результатов апробации модели на данных наблюдений загрязнения бенз(а)пиреном снежного покрова г. Белово.

### Введение

Существует множество подходов к численному описанию состояния загрязнений городской среды [1–3]. Большинство из них используется для диагностических и прогностических целей на сравнительно коротких временных интервалах. К сожалению, общим недостатком этих моделей является невысокая точность, обусловленная как трудностями описания физических механизмов распространения примеси в атмосфере города, так и сложностью адекватного задания начальных и граничных внутригородских условий. Ситуация усугубляется при проведении по ним расчетов на длительные промежутки времени (месяц, сезон, год).

В данной статье для оценки загрязнения городской среды используется подход, основанный на решении обратных задач переноса примеси в атмосфере [4, 5]. Он позволяет непосредственно замкнуть в рамках одной математической модели информацию о процессах распространения примеси и данные наблюдений полей концентраций. Метод, примененный в [4], в основном пригоден для изучения одиночных аэрозольных источников. Прямое его обращение на случай их большего числа может оказаться малоэффективным, поскольку ограничен выбор репрезентативных точек пробоотбора. В связи с этим обсуждаются постановки задач с небольшим числом оцениваемых параметров. Такие возможности возникают, например, когда средние интенсивности источников в основном известны и характеристики осаждения примеси определены.

Апробация модели оценивания проводилась на данных наблюдений загрязнения бенз(а)пиреном г. Белово Кемеровской области, основными источниками которого являются котельные, расположенные в черте города. Сравнение расчетов с наблюдениями в контрольных точках показало вполне удовлетворительное соответствие.

### 1. Модель восстановления длительного загрязнения города

В работе [4] обратная задача определения длительного загрязнения местности аэрозольным источ-

ником была сведена к оцениванию по данным наблюдений параметров следующей регрессионной зависимости:

$$p(r, \varphi, \theta) = \theta_1 g(\varphi) r^{\theta_2} e^{-2r_m/r}, \quad (1)$$

где  $p(r, \varphi, \theta)$  – плотность осадка;  $r, \varphi$  – полярные координаты точки на поверхности земли относительно источника примеси;  $\theta = (\theta_1, \theta_2)$  – вектор неизвестных параметров;  $g(\varphi)$  – вероятность противоположного  $\varphi$  направления ветра;  $r_m$  – точка максимума приземной концентрации для невесомой примеси.

Здесь через неизвестные параметры  $\theta_1, \theta_2$  обозначены достаточно громоздкие комбинации величин, зависящих от метеорологических условий, характеристик источника, взаимодействия примеси с подстилающей поверхностью.

В случае значительного числа источников (достаточно типичная ситуация в городе) оценивание наборов векторов  $\theta_i, i = \overline{1, k}$ , может оказаться практически неосуществимым в силу ограниченных возможностей системы наблюдений. На наш взгляд, для выхода из такого положения необходимо привлечение дополнительной априорной информации о мощностях выбросов источников и характеристиках примеси.

Например, если учесть следующие соотношения для слабооседающей примеси:

$$\theta_{1,i} = S M_i, \quad \theta_{2,i} \rightarrow -2 \text{ при } w \rightarrow 0; \quad i = \overline{1, k}, \quad (2)$$

вытекающие из результатов работы [4], то решение обратной задачи оценивания суммарного поля плотности осадка существенно упрощается. Здесь  $M_i$  – интенсивности источников;  $S$  – коэффициент, зависящий от средних метеорологических условий;  $k$  – количество источников;  $w$  – средняя скорость оседания частиц примеси.

С учетом (1), (2) выражение для плотности осадка, создаваемого совокупностью источников, можно представить в виде

$$p(x, y, \omega) = S F(x, y) + \sum_{i=1}^{k_1} \theta_i p_i(x, y), \quad (3)$$

где  $\theta_i = \theta_{1,i}$ ;  $\omega = (S, \theta_1, \dots, \theta_{k_1})$  – вектор неизвестных параметров;  $k_1$  – число источников, для которых средний выброс не определен;

$$F(x, y) = \sum_{i=k_1+1}^k M_i p_i(x, y);$$

$$p_i(x, y) = \frac{g(\varphi_i(x, y))}{r_i^2(x, y)} e^{-2r_{m,i}/r_i}, \quad (4)$$

где

$$\varphi_i(x, y) = \arctg \frac{y - y_i}{x - x_i};$$

$$r_i(x, y) = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2},$$

$x_i, y_i$  – горизонтальные координаты источников;  $M_i, i = \overline{k_1 + 1, k}$  – предполагаются заданными.

Далее предположим, что данные наблюдений плотности осадка имеют вид

$$g_n = p(x_n, y_n, \omega) + \xi_n, \quad (5)$$

где  $\xi_n$  – нормально распределенная ошибка измерений с заданной дисперсией  $\sigma_n, n = \overline{1, N}$ ,  $N$  – общее число точек наблюдения.

С учетом (3)–(5) оценки вектора  $\omega$  определим из условия минимума следующего квадратичного функционала [5]:

$$J_n(\omega) = \sum_{n=1}^N \sigma_n^{-2} [g_n - p(x_n, y_n, \omega)]^2 \quad (6)$$

при условии неотрицательности компонент вектора  $\omega$ .

Задача (3)–(6) является задачей квадратичного программирования, и ее численная реализация может быть проведена с использованием хорошо известных методов и алгоритмов [7, 8].

**Замечание 1.** Поскольку параметр  $S$  определяется в результате решения задачи (3)–(6), то с учетом (2) можно также провести оценку неизвестных мощностей  $M_i, i = \overline{1, k_1}$ .

## 2. Планирование наблюдений

Для повышения точности оценивания параметров регрессии (3) целесообразно оптимизировать размещение точек отбора проб. Так как зависимость (3) линейна относительно искомым параметрам, то существует возможность предварительного численного моделирования оптимальных планов наблюдений с учетом ограничений на допустимые области проведения измерений. Методы и алгоритмы численного построения планов эксперимента содержатся в [5, 6].

**Замечание 2.** Оптимальные планы наблюдений могут быть определены в явном виде для некоторых частных случаев:

а) пусть  $k_1 = 0$ . Тогда оптимальный план содержит одну точку и определяется из условия максимума функции  $F(x, y)$ ;

б) если  $k_1 = k$ , то в этом случае точки оптимального плана соответствуют положениям максимумов функции  $p_i(x, y), i = \overline{1, k}$ .

## 3. Оценка загрязнения бенз(а)пиреном снежного покрова г. Белово

Основными загрязнителями снежного покрова полиароматическими углеводородами (ПАУ) г. Белово Кемеровской области являются расположенные на его территории малые и средние котельные, число которых только в центральной части составляет несколько десятков.

Количество ПАУ, поступающего в атмосферу, зависит не только от вида используемого топлива, но главным образом от технологических процессов его переработки и сжигания. Образование и деградация ПАУ при высоких температурах являются конкурирующими процессами, интенсивность протекания которых определяется температурным режимом, избытком воздуха, рециркуляцией дымовых газов и другими факторами. Сложность протекающих процессов образования ПАУ затрудняет непосредственное определение интенсивности их выброса в атмосферу и расчет полей загрязнений. В связи с этим в данной ситуации целесообразна постановка обратной задачи оценивания полей загрязнения.

Индикатором для ПАУ принято считать бенз(а)пирен (БП), который является одним из самых сильных канцерогенов. Отбор проб снега в г. Белово на определение содержания БП был проведен в феврале 1997 г. Выбор мест пробоотбора проводился с учетом пункта а) замечания 2, поскольку вся необходимая информация о котельных была известна [9], что соответствует случаю  $k_1 = 0$ . Удельная эмиссия БП задавалась в пропорциях:

- 1) к выбросу пыли-зола [10],
- 2) к поступающему из труб объему газозвушной смеси [11].

Расчет функций источников  $p_i(x, y), i = \overline{1, 63}$ , также проводился в двух вариантах: с использованием формулы (4), на основе методики ГГО [1].

Предварительно проведенные оценки уровня загрязнения снежного покрова БП рассматриваемой территории показали, что максимум его концентрации следует ожидать в северо-восточной части города. В этом случае положение точки оптимального плана может быть рассчитано до проведения пробоотбора. Точки пробоотбора указаны на приведенном плане города звездочками. Восстановление уровня загрязнения снежного покрова БП проводилось по

данным измерения в точке № 1, расположенной в северо-восточной части. Результаты оценивания содержания БП в точках пробоотбора для обоих вариантов задания относительной эмиссии источников и расчетов приземной концентрации приведены в таблице. На рисунке представлено восстановленное по второму варианту с помощью методики ГГО поле плотности осадка БП (нг/л) на территории города.

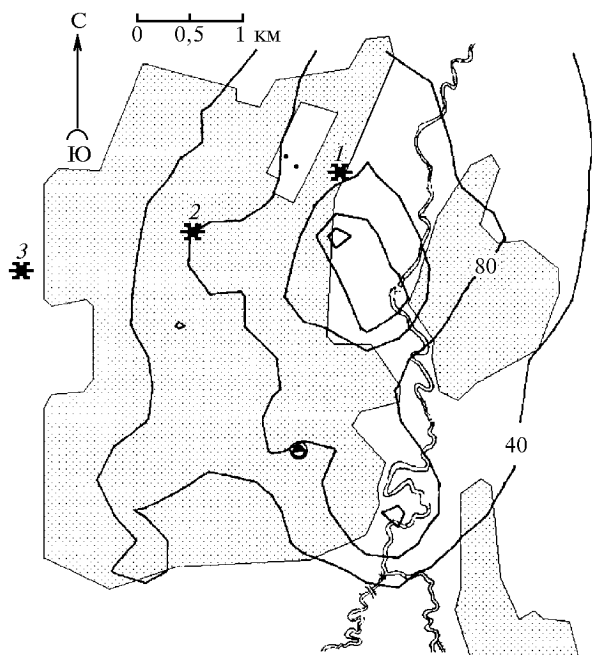
Удельное содержание бенз(а)пирена в снеге (нг/л)

№ точки	Измерение	Расчет			
		Формула (1)		Методика ГГО	
		Вариант**	Вариант***	Вариант**	Вариант***
1	124*	124	124	124	124
2	87	56	67	71	82
3	5	10	10	8	7
Оценка параметра S		0,32	0,99	$6,4 \cdot 10^{-5}$	$1,9 \cdot 10^{-4}$

\* Использовалось для определения параметра S.

\*\* Пыль-зола.

\*\*\* Газовоздушная смесь.



Восстановленное поле плотности осадка бенз(а)пирена (нг/л) в снеге на территории г. Белово

Анализ результатов расчетов показывает удовлетворительное согласие вычисленных и измерен-

ных значений в контрольных точках № 2 и 3 для обоих вариантов задания удельной эмиссии БП от котельных. Приведенные на плане города изолинии плотности осадка БП в снеге находятся в соответствии с положениями источников и среднезимней повторяемостью направлений скорости ветра.

## Заключение

Предложенная в этой статье модель восстановления загрязнения позволяет использовать достаточно ограниченную систему наблюдений, что допускает ее практическое применение. Требуемая входная информация о параметрах источников и климатических условиях рассеяния примеси является вполне доступной.

Несмотря на малое число контрольных точек, полученное соответствие расчета наблюдениям, на наш взгляд, не является случайным, а отражает характер внутренних связей в процессах загрязнения БП территории города.

Необходимо проведение дальнейшей апробации модели оценивания полей загрязнения с учетом специфики конкретного города, характеристик источников загрязнения и выбрасываемых примесей.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (95-05-15575).

1. Берлянд М.Е. Современные проблемы атмосферной диффузии и загрязнения атмосферы. Л.: Гидрометеоздат, 1975. 448 с.
2. Атмосферная турбулентность и моделирование распространения примесей / Под ред. Ф.Т.М. Ньюстада и Х. Ван Допа. Л.: Гидрометеоздат, 1985. 351 с.
3. Бызова Н.Л., Гаргер Е.К., Иванов В.Н. Экспериментальные исследования атмосферной диффузии и расчеты рассеяния примеси. Л.: Гидрометеоздат, 1991. 279 с.
4. Рапута В.Ф., Садовский А.П., Олькин С.Е. // Метеорология и гидрология. 1997. № 2. С. 33–41.
5. Пененко В.В., Рапута В.Ф., Быков А.В. // Известия АН СССР. Сер. ФАО. 1985. № 6. С. 913–920.
6. Успенский А.Б., Федоров В.В. Вычислительные аспекты метода наименьших квадратов при анализе и планировании регрессивных экспериментов. М.: Изд-во МГУ, 1975. 168 с.
7. Васильев Ф.П. Численные методы решения экстремальных задач. М.: Наука, 1980. 518 с.
8. Гилл Ф., Мюррей У., Райт М. Практическая оптимизация. М.: Мир, 1985. 511 с.
9. Комплексная схема охраны окружающей среды города Белово. Охрана атмосферы. Кемерово, 1980. Т. 2. Кн. 4. 35 с.
10. Брюханов П.А. // Труды Института прикладной геофизики. М.: Гидрометеоздат, 1988. Вып. 71. С. 33–38.
11. Исидоров В.А. Органическая химия атмосферы. Л.: Химия, 1985. 264 с.

ИВМиМН СО РАН, Новосибирск  
ГНЦ ВБ «Вектор», НИИ аэробиологии,  
Новосибирская обл.

Поступила в редакцию  
4 февраля 1998 г.

V.F. Raputa, A.P. Sadovsky, S.E. Olkin, N.A. Lapteva. Estimation of a Town Pollution State Based on Snow Cover Monitoring.

A model with short-range variations of the parameters providing the estimation of continuous pollution of town territory basing on monitoring data is described. Optimal location of sampling sites is discussed. The resulting of testing the model using the monitoring data on the snow cover in Belovo town with benz(A)pyrene pollution are analyzed.