

УДК 551.511.42.001.572(571.14)

В.Ф. Рапута, Т.В. Ходжер, А.Г. Горшков, К.П. Куценогий

## НЕКОТОРЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ОКРЕСТНОСТЕЙ ИРКУТСКА ПОЛИАРОМАТИЧЕСКИМИ УГЛЕВОДОРОДАМИ

На основе решений полуэмпирического уравнения турбулентной диффузии предлагается простая регрессионная модель загрязнения окрестностей города. Проводится апробация модели на данных маршрутных снегоъемок. Устанавливается связь между уровнями загрязнения на маршрутах и среднезимней повторяемостью направлений ветра.

### Введение

Для многих проблем загрязнения воздуха существует обычно ограниченное число действительно важных факторов, определяющих уровень концентрации загрязняющих веществ. Усложнение модели распространения примеси, если это не оправдано анализом имеющихся данных, может вызвать нежелательные помехи в расчетах.

С учетом этих соображений в данной статье обсуждается модель длительного загрязнения местности, значительно удаленной от источников атмосферных выбросов примеси. В основу модели заложены соответствующие свойства решений полуэмпирического уравнения турбулентной диффузии в слое перемешивания, позволяющие существенно снизить требования к входной метеорологической информации и заданию параметров источников.

В рамках предлагаемого подхода проводится интерпретация данных загрязнения снежного покрова полиароматическими углеводородами (ПАУ) окрестностей Иркутска.

На маршрутах Иркутск—Листвянка и Иркутск—Баяндай в контрольных точках получен достаточно высокий уровень соответствия расчета наблюдениям. С использованием данных аэрологического зондирования зимнего пограничного слоя атмосферы г. Иркутска установлена связь уровней загрязнения ПАУ на этих маршрутах со среднезимней повторяемостью направлений ветра для высот более 100 м.

### 1. Постановка задачи

Результаты теоретических и экспериментальных исследований распространения легкой примеси в пограничном слое атмосферы указывают [1–3], что на удалениях от места выброса порядка 7–10 км высота источника практически не влияет на уровень концентрации как вблизи подстилающей поверхности, так и во всем слое перемешивания. Концентрацию примеси для таких расстояний от стационарного источника с достаточной точностью можно оценить по следующей формуле [2,3]:

$$g(x, y) = Q/(\sqrt{2\pi} u H \sigma_y(x)) e^{-y^2/2\sigma_y^2}, \quad (1)$$

где  $q(x, y)$  – приземная концентрация;  $Q$  – мощность источника;  $u$  – скорость ветра вдоль оси  $x$ ;  $H$  – высота слоя перемешивания;  $\sigma_y(x)$  – функция, описывающая поперечную диффузию примеси.

Соотношение (1) выражает асимптотическое поведение решения полуэмпирического уравнения турбулентной диффузии легкой примеси на больших удалениях от источника при условиях отражения примеси от подстилающей поверхности и верхней границы пограничного слоя, отсутствии процессов трансформации. В стационарных условиях изменение концентрации на значительных расстояниях происходит лишь за счет расширения факела примеси в поперечном к ветру направлении.

При больших временах усреднения концентрации (месяц, сезон, год) становится возможным использование климатических данных о скорости ветра вместо текущей метеорологической информации. В этом случае с учетом (1) концентрация будет определяться следующим соотношением [4, 5]:

$$g(r, \varphi) = P(\varphi) Q/(2\pi r u H). \quad (2)$$

Здесь  $r, \varphi$  – полярные координаты, начало которых совпадает с положением источника;  $P(\varphi)$  – вероятность противоположного  $\varphi$  направления ветра.

Для случая  $M$  источников суммарное поле концентрации представляется следующим образом:

$$g(x, y) = \frac{1}{2\pi u H} \sum_{k=1}^M \frac{Q_k P(\varphi_k(x, y))}{r_k(x, y)}, \quad (3)$$

где

$$\varphi_k(x, y) = \arctg \frac{y - y_k}{x - x_k}; \quad (4)$$

$$r_k(x, y) = \sqrt{(x - x_k)^2 + (y - y_k)^2}, \quad k = \overline{1, M};$$

$x_k, y_k$  – горизонтальные декартовы координаты источников. Для больших расстояний от города обыч-

но принимают значения концентрации, описываемые соотношением типа (2), в котором  $Q$  представляет суммарный выброс;  $r$  – расстояние от центра тяжести выбросов примеси до точки наблюдения.

Полагая, что поле плотности осадка  $G(r, \varphi)$  пропорционально концентрации в воздухе, приходим с учетом сказанного выше к следующей простой регрессионной зависимости:

$$G(r, \varphi) = \theta P(\varphi)/r, \quad (5)$$

где

$$\theta = \lambda Q / (2\pi uH);$$

$\lambda$  – коэффициент, отражающий взаимодействие примеси с подстилающей поверхностью. Оценка неизвестного параметра  $\theta$  может быть найдена по данным наблюдений плотности осадка.

**Замечание 1.** Исходя из вида регрессионной зависимости (5), оптимальная точка наблюдения, обеспечивающая максимальную точность оценивания параметра [6], должна располагаться достаточно близко от территории города с учетом наибольшей повторяемости направлений ветра и не попадать под непосредственное влияние локальных источников.

**Замечание 2.** Формула (3) допускает также непосредственное обобщение на случай непрерывно распределенных по территории выбросов примеси. Сходство выражения (3) с точностью до обозначений с потенциалом системы материальных точек позволяет воспользоваться математическими методами теории потенциала для исследования его асимптотических свойств [7].

## 2. Анализ данных маршрутных наблюдений

Отбор проб снега зимнего периода 1995/96 г. проводился по следующим маршрутам: 1) Иркутск–Листвянка, 2) Иркутск–Баяндай, 3) Иркутск–Слюдянка.

Предварительное рассмотрение данных наблюдений показало в целом монотонное убывание скоростей выпадений ПАУ по маршрутам 1 и 2. На маршруте 3 значительная часть точек пробоотбора попала под непосредственное влияние локальных источников г. Шелехова. В связи с этим в дальнейшем ограничимся изучением данных измерений на маршрутах 1 и 2.

В табл. 1 и 2 приведены оценки скоростей накопления ПАУ на этих маршрутах с использованием регрессионной зависимости (5). В качестве агрегированного центра выбросов ПАУ был выбран центр г. Иркутска. При проведении расчетов использовались следующие дополнительные обозначения:

$$\theta_{\text{Л}} = \theta P(\varphi_{\text{Л}}), \quad \theta_{\text{Б}} = \theta P(\varphi_{\text{Б}}), \quad (6)$$

где  $\varphi_{\text{Л}}$ ,  $\varphi_{\text{Б}}$  – углы, характеризующие соответственно направления маршрутов на Листвянку и Баяндай.

Таблица 1

Скорости накопления ПАУ на маршруте Иркутск–Листвянка (мкг/м<sup>2</sup>-неделя)

N точки	Расстояние от центра города, км	ПАУ			
		фенантрен	флуорантен	пирен	бенз(а)-пирен
1	7	4,4*/4,4	2,1*/2,1	2,9*/2,9	0,4/0,86
2	12	2,3/2,6	1,3/1,22	1,7/1,69	0,5*/0,5
3	23	0,9/1,3	0,7/0,64	0,7/0,88	0,2/0,26
4	31	0,9/1,0	1/0,47	0,5/0,65	0,3/0,2
5	45	1,1/0,7	1/0,33	1/0,45	0,4/0,13
Оценка параметра $\theta_{\text{Л}}$		30,8	14,7	20,3	6

Примечание. В числителе стоит измеренное значение скорости накопления, в знаменателе – расчетные значения; \* – данные наблюдений использовались для оценки параметра  $\theta_{\text{Л}}$ .

Таблица 2

Скорости накопления ПАУ на маршруте Иркутск–Баяндай (мкг/м<sup>2</sup>-неделя)\*

N точки	Расстояние от центра города, км	ПАУ			
		фенантрен	флуорантен	пирен	бенз(а)-пирен
1	15,3	0,8*/0,8	0,5*/0,5	0,6*/0,6	0,2*/0,2
2	32,5	0,3/0,38	0,1/0,24	0,3/0,28	0,1/0,09
3	65,5	0,4/0,19	0,2/0,12	0,2/0,14	0,02/0,05
4	89,5	0,2/0,14	0,1/0,09	0,1/0,1	0,02/0,03
5	114,5	0,4/0,1	0,3/0,06	0,4/0,08	0,2/0,02
Оценка параметра $\theta_{\text{Б}}$		12,2	7,7	9,2	3,1

См. примечание к табл. 1.

Анализ табл. 1 показывает в целом неплохое соответствие расчета наблюдениям в контрольных точках N 2–N 4, кроме бенз(а)-пирена. Заметное расхождение в точке N 5 объясняется дополнительным вкладом ПАУ от п. Большая Речка.

Из анализа табл. 2 вытекает хорошее соответствие оценок по пирену и бенз(а)-пирену в точках N 2–N 4, по фенантрону и флуорантену в точке N 4. Рост скоростей выпадений ПАУ в точке N 5 объясняется близостью населенного пункта Баяндай. Выяснение причин значительного расхождения (с точностью до наоборот) оценок наблюдения в точках N 2 и N 3 по фенантрону и флуорантену требует дальнейшего изучения.

На рисунке представлены результаты оценивания и измерения скоростей выпадений пирена для маршрутов 1 и 2.

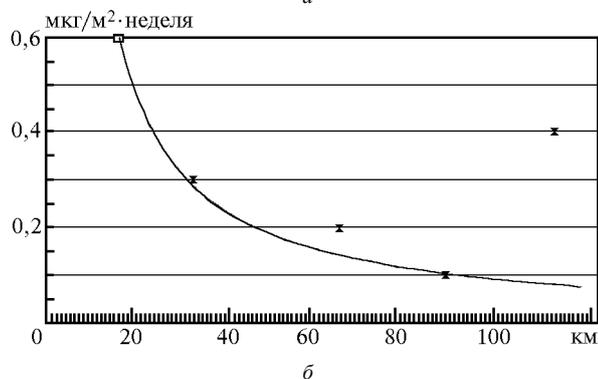
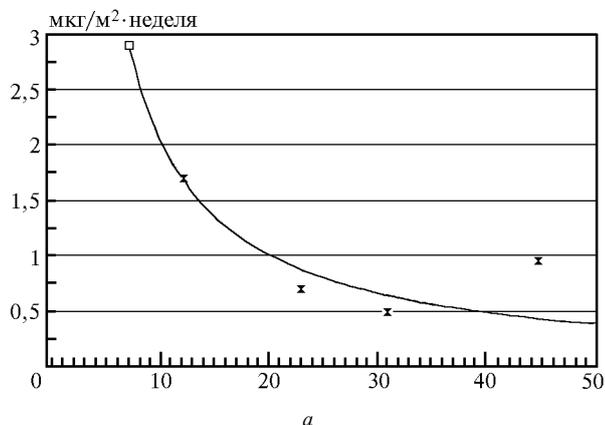
Таблица 3

Зимняя повторяемость (%) направлений ветра на разных высотах [8]

Направление ветра	Высота, м				
	флюгер	100	200	500	1000
ю	5	15	23	18	12
юз	2	4	7	11	11
з	7	8	7	11	15
сз	25	30	32	37	44

Из сопоставления оценок  $\theta_{\text{Л}}$  и  $\theta_{\text{Б}}$  и климатических данных, приведенных в табл. 3, вытекает связь уров-

ней загрязнения с повторяемостью направлений ветра на высотах свыше 100 м. Скорости выпадений ПАУ по второму маршруту примерно в два раза ниже, чем по первому.



Скорости выпадений пирена на маршрутах Иркутск–Листвянка (а) и Иркутск–Баяндай (б)

ИВМ и МГ СО РАН, Новосибирск,  
ЛИН СО РАН, Иркутск,  
ИХКГ СО РАН, Новосибирск

Поступила в редакцию  
4 февраля 1998 г.

*V.F. Raputa, T.V. Khodzher, A.G. Gorshkov and K.P. Koutsenogii. Some Regularities of Irkutsk Area Pollution by Polycyclic Aromatic Hydrocarbons.*

A simple regression model of environmental pollution is proposed based on the solution to the semiempirical equation of turbulent diffusion. The model is evaluated using the data of route snow photography. A relation is established between the levels of pollution en route and the mean winter recurrence of wind directions.

### Заключение

Проведенное исследование показало, что предложенная модель для определенных расстояний вполне удовлетворительно описывает загрязнение снегового покрова источниками ПАУ г. Иркутска. Полученные зависимости позволяют также провести оценку суммарного поступления ПАУ за пределы города. В плане дальнейшего развития модели представляется важным установление связей между процессами локального и регионального загрязнения.

Авторы выражают свою благодарность В.Л. Макухину за оказанную помощь и полезные обсуждения.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (95–05–15575) и гранта СО РАН по интеграционным проектам (N 117).

1. Бызова Н.Л., Гаргер Е.К., Иванов В.Н. Экспериментальные исследования атмосферной диффузии и расчеты рассеяния примеси. Л.: Гидрометеоздат, 1991. 279 с.
2. Атмосферная турбулентность и моделирование распространения примесей / Под ред. Ф.Т.М. Ньюстадта и Х. Ван Допа. Л.: Гидрометеоздат, 1985. 351 с.
3. Учет дисперсионных параметров атмосферы при выборе площадок для атомных электростанций // Руководство по безопасности АЭС. Международное агентство по атомной энергии. Вена, 1980. 106 с.
4. Кудрявцева Л.В., Устинова С.Н. // Мониторинг и оценка состояния Байкала и Прибайкалья. Л.: Гидрометеоздат, 1991. С. 86–92.
5. Fisher В.Е.А. // Atmosph. Envir. 1983. V. 17. P. 1865–1880.
6. Федоров В.В. Теория оптимального эксперимента. М.: Наука, 1971. 312 с.
7. Тихонов А.Н., Самарский А.А. Уравнения математической физики. М.: Наука. 1972. 736 с.
8. Климат Иркутска. Л.: Гидрометеоздат, 1981. 247 с.