

В.Ф. Рапута, Г.П. Королева, А.Г. Горшков, Т.В. Ходжер

Исследование процессов длительного загрязнения окрестностей Иркутска тяжелыми металлами

*ИВМиМГ СО РАН, г. Новосибирск
Институт геохимии СО РАН,
Лимнологический институт СО РАН, г. Иркутск*

Поступила в редакцию 29.11.2000 г.

На основе решений уравнения турбулентной диффузии предлагается модель восстановления загрязнения окрестностей города по данным маршрутных снегосъемок. Проведено сравнение восстановленных и измеренных выпадений в снег бериллия, меди, свинца. Обсуждается связь параметров моделей с климатической повторяемостью направлений ветра в пограничном слое атмосферы.

Введение

Проблема численного моделирования распространения примесей в атмосфере от большого количества источников города относится к числу наиболее сложных. Распространение примесей тесно связано с динамическим, термическим и влажностным режимом города, характером подстилающей поверхности, химическим составом примесей и др. Детальный учет всех этих факторов приводит к необходимости разработки сложных математических моделей, включающих в себя большое число параметров, требующих дальнейшего уточнения, что не всегда согласуется с имеющимися техническими и экономическими возможностями [1].

Такое положение требует более взвешенного анализа экспериментальных данных и теоретических исследований распространения примесей в приземном и пограничном слоях атмосферы. При моделировании длительного загрязнения местности стационарными источниками текущую метеорологическую информацию можно заменить климатической [2]. Существует возможность сравнительно простого математического описания процессов переноса примеси на больших удалениях от распределенных источников выбросов [3–5]. Применение методов теории подобия и размерности позволяет снизить количество определяющих параметров. Планирование наблюдений на основе теоретических представлений о протекающих процессах переноса примеси приводит к повышению информативности экспериментальных данных.

1. Постановка обратной задачи

Решение задач переноса и диффузии примеси в атмосфере требует их определенной стилизации и упрощения. В связи с этим полезно использовать зависимость между решениями для точечного и линейного источников. Если положить горизонтальный турбулентный обмен пропорциональным скорости ветра, то в стационарном случае будет иметь место соотношение [6, 7]:

$$q(x, y, z) = S(x, z) e^{-y^2/4k_0 x} / (2 \sqrt{\pi k_0 x}), \quad (1)$$

где $q(x, y, z)$, $S(x, z)$ – концентрации примеси от точечного и линейного источников соответственно; k_0 – коэффициент пропорциональности между скоростью ветра и горизонтальным турбулентным обменом; ось x совпадает со средним направлением ветра, ось y перпендикулярна оси z и расположена в горизонтальной плоскости.

Для расчета функции $S(x, z)$ воспользуемся уравнением переноса и турбулентной диффузии для бесконечно-го линейного источника [6, 7]:

$$u \frac{\partial S}{\partial x} - w \frac{\partial S}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} k_z \frac{\partial S}{\partial z} - \alpha S \quad (2)$$

со следующими граничными условиями:

$$uS|_{x=0} = Q\delta(z-H), \quad k_z \frac{\partial S}{\partial z} \Big|_{z=0, z=h} = 0, \quad (3)$$

где $u(z)$ – скорость ветра в слое перемешивания; w – скорость оседания в атмосфере частиц примеси; k_z – коэффициент вертикальной турбулентности; α – коэффициент, учитывающий процессы превращения и вымывания примеси; Q, H – мощность и высота линейного источника; h – высота слоя перемешивания.

Соотношения (2), (3) содержат большое число параметров, требующих в конкретных ситуациях своего задания или уточнения, и в таком виде неудобны для анализа данных наблюдений загрязнения местности. Для их дальнейшего упрощения необходимо привлечение дополнительной априорной информации о процессах, протекающих в приземном и пограничном слоях атмосферы, характеристиках примесей, пространственных масштабах и временах осреднения полей концентраций.

Согласно [6, 8] поле осредненной за длительный промежуток времени концентрации от точечного источника определяется по формуле

$$\bar{q}(r, \varphi, z) = \frac{S(R, z) g(\varphi)}{2 \sqrt{\pi k_0 r}} \int_{-\Delta}^{\Delta} e^{-r \sin^2 \psi / 4k_0} d\psi, \quad (4)$$

где r, φ – полярные координаты расчетной точки с началом в месте расположения источника; $g(\varphi)$ – вероятность противоположного φ направления ветра; Δ – некоторый малый угол, характеризующий расширение факела в поперечном к ветру направлении.

Для типичных $k_0 = 0,5 \div 1$ м, $\Delta < 10 \div 15^\circ$ при $r > 1$ км

$$\bar{q}(r, \varphi, z) = F S(r, z) g(\varphi)/r. \quad (5)$$

Здесь F – величина, практически не зависящая от r .

Соотношение (5) допускает дальнейшие упрощения, если положить в уравнении (2) $\alpha = 0$ и $w = 0$. Тогда при удалении от источника примеси на расстояния порядка 7–10 км функция $S(r, z)$ слабо зависит от z [3, 7]. В этом случае с учетом (5) для плотности выпадений примеси на подстилающую поверхность получим [5]:

$$\bar{q}(r, \varphi) = \theta g(\varphi)/r, \quad (6)$$

где

$$\theta = \lambda Q/(2\pi uh); \quad (7)$$

λ – коэффициент взаимодействия примеси с подстилающей поверхностью.

Оценка неизвестного параметра θ проводится по экспериментальным данным. При расстояниях от источника меньше 7–10 км учет функции $S(r, z)$ необходим. Для коэффициента k_z достаточно типична его параболическая аппроксимация следующего вида [9]:

$$k_z = c u_* z (1 - z/h), \quad (8)$$

где u_* – динамическая скорость; параметр c зависит от распределения температуры в слое перемешивания.

С учетом (8) решение задачи (2), (3) представляется явно в виде ряда Фурье по полиномам Лежандра [9]:

$$S(r, z) = \frac{Q}{hu} \left[1 + \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) P_n \left(2 \frac{H}{h} - 1 \right) P_n \left(\frac{z}{h} - 1 \right) \times \right. \\ \left. \times \exp \left(-n(n+1) \frac{c u_* r}{h u} \right) \right]. \quad (9)$$

При $r > 0$ ряд (9) обладает высокой скоростью сходимости. В силу этого свойства для эффективного описания поля приземной концентрации достаточно ограничиться небольшим числом его членов разложения. В результате приходим к следующей регрессионной зависимости:

$$S(r, 0, \theta) \approx \theta_1 \left[1 + \sum_{n=1}^N (2n+1) P_n(-1) P_n(\theta_2) e^{-n(n+1)\theta_3 r} \right], \quad (10)$$

где $\theta = (\theta_1, \theta_2, \theta_3)$ – вектор агрегированных параметров,

$$\theta_1 = \frac{Q}{hu}, \theta_2 = 2 \frac{H}{h} - 1, \theta_3 = \frac{c u_*}{hu}. \quad (11)$$

Соотношение (11) позволяет провести корректировку полей выпадений примеси для более близких расстояний от источника, хотя это потребует дополнительных экспериментальных данных.

2. Анализ выпадений тяжелых металлов

В конце зимних сезонов 1994–1996 гг. проводился отбор проб снега для определения в нем содержания тяжелых металлов (ТМ) по следующим маршрутам [10]: 1. Иркутск – Баяндай. 2. Иркутск – Листвянка. 3. Иркутск – Слюдянка.

Предварительное изучение данных измерений показало в целом монотонное убывание выпадений Ве, Си, Рб на маршрутах 1 и 2 для всех трех зимних сезонов. Для цинка подобная закономерность просматривается слабо. На маршруте 3 значительная часть точек пробоотбора попала под непосредственное влияние локальных источников г. Шелехова, что затрудняет оценивание региональной составляющей выноса ТМ на этом маршруте и требует привлечения большего объема информации.

В табл. 1, 2 и на рис. 1 приведены оценки уровней накопления Ве, Си, Рб в снежном покрове на маршрутах 1 и 2. Оценивание проводилось с помощью модели (6). Расстояния на маршрутах определялись относительно центра Иркутска, который был принят за эффективный суммарный источник выброса.

Анализ табл. 1 показывает в целом неплохое соответствие расчета наблюдениям ТМ в восьми контрольных точках. Следует отметить, что для бериллия уровень соответствия оказался наиболее высоким.

Таблица 1

Измеренные (числитель) и восстановленные (знаменатель) уровни накопления тяжелых металлов на маршруте Иркутск – Баяндай за зимний период 1995/96 гг.

Элемент	Оценка параметра θ	Уровень накопления, г/км ²									
		19*	16,9	8,9	6	5,5	3,6	3,9	2,6	2,6	
Бериллий	304	19	11,3	8,9	5,8	4,3	3,3	3,1	2,7	2,4	
Медь	5798	362*	297	224	67	112	110	62	89	51	
		362	215	171	111	82	64	59	52	46	
Свинец	7408	463*	289	94	202	81	101	76	43	35	
		463	274	218	141	104	81	76	67	58	
Расстояние от центра города, км		16	27	34	52,4	71	91	98	111,3	127	

* Использовались для оценки параметра θ .

Измеренные (числитель) и восстановленные (знаменатель) уровни накопления бериллия на маршруте Иркутск – Листвянка

Зимний сезон, гт.	Оценка параметра θ	Уровень накопления, г/км ²					
		7	12	25	35	50	65
1993/94	1477	211,1*	131,6	60,4	68,9	54,8	45,5
		211,1	123,1	59,1	42,2	29,5	22,7
1994/95	1145	163,5*	62,5	38	55,8	58,8	107,9
		163,5	95,4	45,8	32,7	22,9	17,6
1995/96	509	72,7*	40,8	20,1	23,6	20,7	30,3
		72,7	42,4	20,4	14,5	10,2	7,8
Расстояние от центра города, км		7	12	25	35	50	65

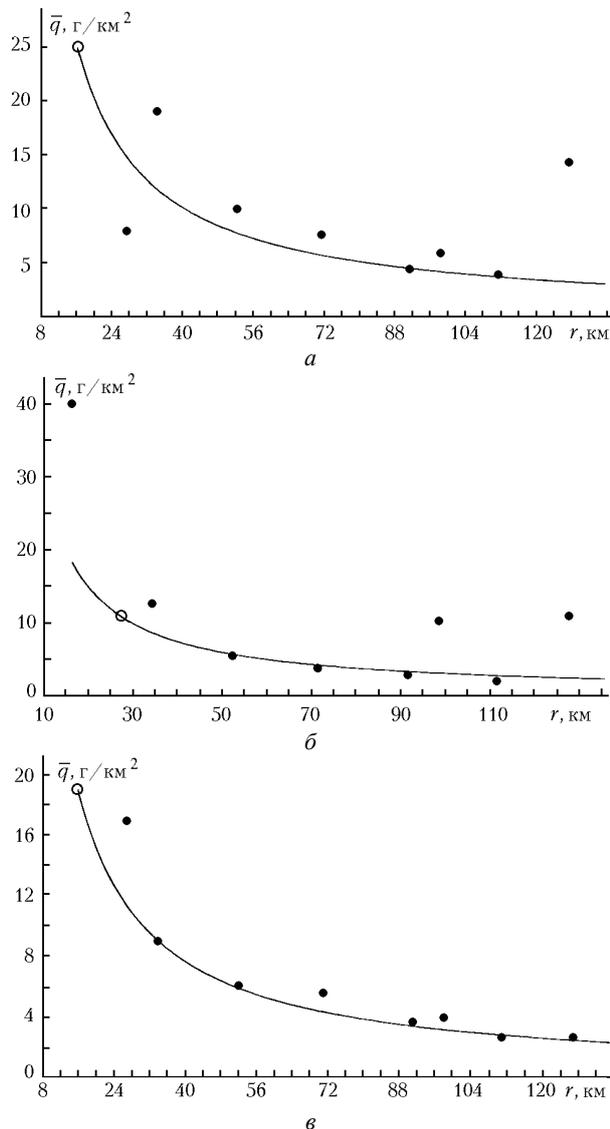


Рис. 1. Уровни выпадений бериллия на маршруте Иркутск – Байдай за зимний период 1993/94 гт. (а); 1994/95 гт. (б); 1995/96 гт. (в). о, ● – опорные и контрольные точки наблюдений

В табл. 2 отражена динамика накопления бериллия за три зимних сезона на маршруте 2. Во второй и третьей

контрольных точках (12 и 25 км) рассчитанные и измеренные значения практически совпали. Далее в контрольных точках 4–6 для всех трех периодов наблюдается систематическое превышение измеренных значений над рассчитанными. Это обстоятельство указывает на наличие дополнительных источников поступления. В первую очередь к ним, по-видимому, следует отнести выбросы бериллия алюминиевым заводом г. Шелехова. Определенную роль в этих поступлениях играет также зимняя повторяемость направления ветра в слое перемешивания. Следует также отметить падение уровней накопления бериллия от сезона к сезону, что объясняется происходившими в эти годы снижением и остановкой промышленного производства.

Анализ полей ветра в зимнее время над Иркутском показывает, что величина параметров θ , полученных для маршрутов 1 и 2, непосредственно соответствует климатической повторяемости направлений ветра на высотах пограничного слоя атмосферы [5, 11].

Заключение

Проведенное исследование показало, что процессы длительного регионального загрязнения бериллием, медью, свинцом окрестностей Иркутска вполне удовлетворительно описываются в рамках регрессионной модели (6), полученной на основе решения полуэмпирического уравнения турбулентной диффузии. Лучшее соответствие расчета наблюдениям для бериллия указывает на более компактное расположение источников его выброса, чем источников меди и свинца. Динамика снижения выбросов ТМ за зимние периоды 1993/96 гт. непосредственно связана с уровнем падения промышленного производства.

Для описания загрязнения ТМ г. Иркутска и его ближайших окрестностей следует провести корректировку модели (6), вводя дополнительные члены разложения ряда (10), что потребует соответствующего увеличения объема и детализации входной информации.

1. Ландсберг Г.Е. Климат города. Л.: Гидрометеиздат, 1983. 248 с.
2. Рапута В.Ф., Садовский А.П., Олькин С.Е. Реконструкция выпадений бенз(а)пирена в окрестностях Новосибирского электродного завода // Метеорол. и гидрол. 1997. № 2. С. 33–41.
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. Оценка вклада дальнего переноса соединений серы и азота в их поступление в оз. Байкал

- // Мониторинг и оценка состояния Байкала и Прибайкалья. Л.: Гидрометеоздат, 1991. С. 86–92.
5. *Рапута В.Ф., Ходжер Т.В., Горшков А.Г., Куценогий К.П.* Некоторые закономерности загрязнения окрестностей Иркутска полиароматическими углеводородами // Оптика атмосф. и океана. 1998. Т. 11. № 6. С. 650–653.
 6. *Берлянд М.Е.* Современные проблемы атмосферной диффузии и загрязнения атмосферы. Л.: Гидрометеоздат, 1975. 448 с.
 7. *Бызова Н.Л., Гаргер Е.К., Иванов В.Н.* Экспериментальные исследования атмосферной диффузии и расчеты рассеяния примеси. Л.: Гидрометеоздат, 1991. 279 с.
 8. *Лайхтман Д.Л.* Физика пограничного слоя атмосферы. Л.: Гидрометеоздат, 1961. 254 с.
 9. *Атмосферная турбулентность и моделирование распространения примесей* / Под ред. Ф.Т.М. Ньистадта, Х. Ван Доппа. Л.: Гидрометеоздат, 1985. 352 с.
 10. *Королева Г.П., Горшков А.Г., Виноградова Т.П., Бутаков Е.В., Маринайте И.И., Ходжер Т.В.* Исследование загрязнений снегового покрова как депонирующей среды (Южное Прибайкалье) // Химия в интересах устойчивого развития. 1998. Т. 6. С. 327–337.
 11. *Климат* Иркутска. Л.: Гидрометеоздат, 1981. 247 с.

V.F. Raputa, G.P. Koroleva, A.G. Gorshkov, T.V. Khodzher. Investigation of the processes of long-term heavy metal pollution of the Irkutsk environments.

A model of pollution reconstruction from data of route snow observations in the Irkutsk environments is proposed. The model is based on solutions of the turbulent diffusion equation. A comparison between the reconstructed and measured data on the beryllium, copper and lead fall-out in snow is made. The dependence of the model parameters on the climatic repetition of wind directions in the atmospheric boundary layer is discussed.