

В.Ф. Рапута¹, С.Е. Олькин², И.К. Резникова²

Методы численного анализа данных наблюдений регионального загрязнения территорий площадным источником

¹Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН,
г. Новосибирск

²ФГУН ГНЦ ВБ «Вектор» Роспотребнадзора, пос. Кольцово, Новосибирская обл.

Поступила в редакцию 28.01.2008 г.

Проведено построение моделей оценивания длительного регионального загрязнения местности. Методами асимптотических разложений получены малопараметрические представления полей концентраций от площадных источников. Выполнен численный анализ результатов экспедиционных исследований загрязнения снегового покрова в окрестностях г. Новосибирска.

Введение

Проблема численного моделирования распространения примесей в атмосфере от площадных источников относится к числу наиболее сложных. Распространение загрязняющих веществ тесно связано с текущим динамическим, термическим и влажностным режимом атмосферы, характером подстилающей поверхности. Особо следует отметить трудности описания пространственного распределения и временной динамики выбросов примеси от площадного источника [1–5].

При использовании методов прямого моделирования процессов распространения примесей в атмосфере детальный учет всех этих факторов приводит к необходимости разработки весьма громоздких математических моделей, к тому же включающих в себя значительное число параметров, требующих дальнейшего уточнения, что не всегда согласуется с имеющимися техническими и экономическими возможностями. Такая ситуация приводит к необходимости более взвешенного совместного анализа экспериментальных данных и теоретических описаний распространения примесей в приземном и пограничном слоях атмосферы, учета априорной информации о характеристиках источников и пространственно-временных масштабах исследуемых процессов. В частности, при моделировании длительного загрязнения местности стационарными источниками текущую метеорологическую информацию вполне можно заменить климатическими данными о направлении и скорости ветра [6]. Существует возможность сравнительно простого математического описания процессов переноса примеси на больших удалениях от источников выбросов [7–9]. Применение методов теории подобия и размерности, асимптотических методов в ряде случаев

позволяет заметно снизить количество неизвестных параметров. Планирование наблюдений на основе теоретических представлений о протекающих процессах переноса примеси приводит к повышению информативности экспериментальных данных [10].

1. Модели оценивания регионального загрязнения

Описание полей концентраций примесей в атмосфере на значительных удалениях от источника допускает существенные упрощения. Экспериментальные и теоретические исследования показывают, что, начиная с расстояний порядка 7–10 км от источника, расположенного в пограничном слое атмосферы, распределение концентрации примеси выравнивается по высоте [9]. Для таких расстояний влияние ряда параметров становится не существенным. К ним следует отнести высоту источника, скорость оседания аэрозольных частиц, коэффициент вертикального турбулентного обмена и т.д.

Точечный источник. Поле осредненной за длительный промежуток времени концентрации от точечного источника описывается соотношением [7, 8]:

$$\bar{q}(r, \varphi) = \frac{Mg(\varphi)}{2\pi uhr}, \quad (1)$$

где r, φ – полярные координаты расчетной точки с началом в месте расположения источника; $g(\varphi)$ – вероятность противоположного φ направления ветра на высотах пограничного слоя атмосферы; M – мощность источника; u, h – средняя скорость ветра и толщина слоя перемешивания.

Полагая плотность аэрозольных выпадений пропорциональной концентрации примеси в воздухе, получим

$$\Phi(r, \varphi) = \frac{\theta g(\varphi)}{r}. \quad (2)$$

Здесь $\theta = \lambda M / (2\pi u h)$; λ – коэффициент взаимодействия примеси с подстилающей поверхностью.

Замечание 1. Соотношение (2) можно представить в несколько ином виде, учитывая, что в данном случае значения u и h имеют смысл некоторых средних характеристик пограничного слоя атмосферы. Действительно, если задать функцию $B(u', h')$, описывающую совместную плотность вероятности распределения u', h' в заданном направлении φ от источника за рассматриваемый промежуток времени, то для суммарной плотности осадка аэрозоля имеет место выражение

$$\Phi(r, \varphi) = \frac{\lambda M g(\varphi)}{2\pi r} \iint_{\Omega} \frac{B(u', h')}{u' h'} d\Omega = \frac{\theta' g(\varphi)}{r},$$

где

$$\theta' = \frac{\lambda M}{2\pi} \iint_{\Omega} \frac{B(u', h')}{u' h'} d\Omega.$$

Тогда в силу обобщенной интегральной теоремы о среднем для односвязной области Ω получим [11]:

$$\iint_{\Omega} \frac{B(u', h')}{u' h'} d\Omega = \frac{1}{u h} \iint_{\Omega} B(u', h') d\Omega = \frac{1}{u h}.$$

Площадный источник. С учетом (2) плотность осадка аэрозольной примеси в случае площадного источника S представляется в виде

$$Q(x, y) = \frac{\lambda}{2\pi u h} \iint_S \frac{m(\xi, \eta) g(\varphi)}{d} d\xi d\eta, \quad (3)$$

где (ξ, η) – текущие координаты источника; $(\xi, \eta) \in S$; $m(\xi, \eta)$ – эмиссия примеси из этой точки;

$$\varphi(\xi, \eta, x, y) = \arctg\left(\frac{y - \eta}{x - \xi}\right);$$

$$d = |\mathbf{M}_1 \mathbf{M}| = \sqrt{(x - \xi)^2 + (y - \eta)^2},$$

предполагается также, что точка (x, y) достаточно удалена от множества S .

На практике мощность эмиссии площадного источника $m(\xi, \eta)$, как правило, неизвестна либо может быть задана лишь весьма приближенно. В таких условиях интерпретация данных наблюдений с помощью соотношения (3) становится достаточно затруднительной. В этом случае целесообразно проводить оценивание (3) с использованием его асимптотических представлений и измеренных значений концентраций на различных удалениях от множества S .

Для

$$d = \sqrt{r^2 + r_1^2 - 2r r_1 \mu}, \quad \frac{1}{d} = \frac{1}{r \sqrt{1 + \alpha^2 - 2\alpha\mu}}, \quad (4)$$

где $r = |\mathbf{OM}|$, $r_1 = |\mathbf{OM}_1|$; $\alpha = r_1 / r$; $\mu = \cos\theta$, взаимное положение точек M , M_1 и площадного источника S представлено на рис. 1.

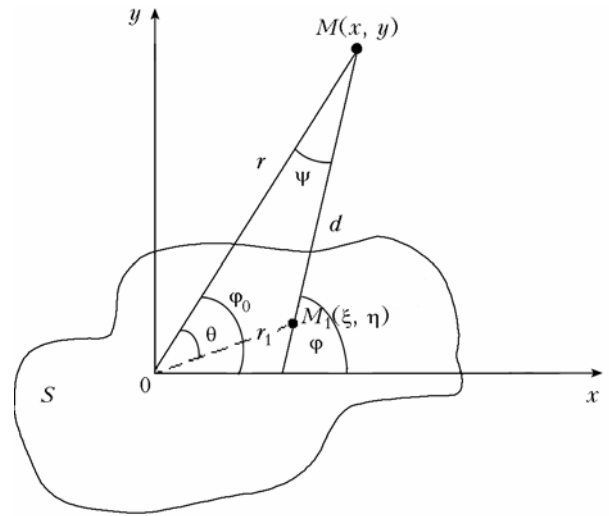


Рис. 1. Схема взаимного расположения точек M , M_1 и площадного источника S

Используя разложение функции (4) в ряд по полиномам Лежандра, получим [12]:

$$\frac{1}{d} = \frac{1}{r} \sum_{n=0}^{\infty} \alpha^n P_n(\mu), \quad (5)$$

где $P_n(\mu)$ – полином Лежандра n -го порядка.

Подставляя выражение (5) в формулу (3), будем иметь

$$Q(x, y) = \frac{c}{r} \sum_{n=0}^{\infty} \iint_S \alpha^n P_n(\mu) m(\xi, \eta) g(\xi, \eta, x, y) d\xi d\eta =$$

$$= Q_1 + Q_2 + Q_3 + \dots = \frac{c}{r} \iint_S m g P_0(\mu) d\xi d\eta +$$

$$+ \frac{c}{r^2} \iint_S m g r_1 P_1(\mu) d\xi d\eta + \frac{c}{r^3} \iint_S m g r_1^2 P_2(\mu) d\xi d\eta + \dots \quad (6)$$

Здесь $c = \lambda / (2\pi u h)$.

Рассмотрим первое слагаемое в (6), дающее начальное приближение для вычисления поля концентрации примеси при больших r . Представим функцию g следующим приближением:

$$g(\varphi) \cong g(\varphi_0) + g'(\varphi_0) \psi, \quad (7)$$

где

$$\varphi_0 = \arctg \frac{y}{x}; \quad \psi = \varphi - \varphi_0.$$

Далее заметим, что

$$\cos \psi = \frac{x(x - \xi) + y(y - \eta)}{r d} = \frac{r^2 - x\xi - y\eta}{r d}. \quad (8)$$

Тогда, учитывая тождество $\arcsin \psi + \arccos \psi = \frac{\pi}{2}$ и соотношение (5), получим

$$\psi = \arccos \frac{r^2 - x\xi - y\eta}{rd} \approx \frac{\pi}{2} - \frac{r^2 - x\xi - y\eta}{rd} =$$

$$= \frac{\pi}{2} - \frac{r^2 - x\xi - y\eta}{r^2} \sum_{n=0}^{\infty} \alpha^n P_n(\mu). \quad (9)$$

При небольших угловых размерах области S можно принять $d \approx r$. В этом случае приходим к следующему приближению:

$$\psi \approx \frac{\pi}{2} - \frac{r^2 - x\xi - y\eta}{r^2} = \frac{\pi}{2} - 1 - \frac{x}{r^2}\xi - \frac{y}{r^2}\eta. \quad (10)$$

С учетом (7), (10) получим

$$g(\varphi) \cong g(\varphi_0) + g'(\varphi_0) \left[\frac{\pi}{2} - 1 - \frac{x}{r^2}\xi - \frac{y}{r^2}\eta \right]. \quad (11)$$

Подставляя (11) в первый член разложения (6), будем иметь

$$Q_1(x, y) = \frac{c}{r} \iint_S m(\xi, \eta) \times$$

$$\times \left\{ g(\varphi_0) + \left(\frac{\pi}{2} - 1 \right) g'(\varphi_0) - g'(\varphi_0) \left(\frac{x}{r^2}\xi + \frac{y}{r^2}\eta \right) \right\} d\xi d\eta =$$

$$= \theta_1 \frac{g(\varphi_0) + \left(\frac{\pi}{2} - 1 \right) g'(\varphi_0)}{r} + \theta_2 \frac{g'(\varphi_0)x}{r^3} + \theta_3 \frac{g'(\varphi_0)y}{r^3}, \quad (12)$$

$$\theta_1 = c \iint_S m(\xi, \eta) d\xi d\eta, \quad \theta_2 = -c \iint_S \xi m(\xi, \eta) d\xi d\eta,$$

$$\theta_3 = -c \iint_S \eta m(\xi, \eta) d\xi d\eta.$$

Замечание 2. При равномерной розе ветров $g'(\varphi) = 0$. В этом случае в зависимости (12) оцениванию подлежит лишь параметр θ_1 . Это свойство может быть использовано также и при оценке полей аэрозольных выпадений примеси в секторах, где изменения функции $g(\varphi)$ не очень значительны.

2. Экспериментальные исследования загрязнения снегового покрова в окрестностях г. Новосибирска

Исследование снежного и почвенного покрова является удобным и экономичным способом получения данных о поступлении загрязняющих веществ из атмосферы на подстилающую поверхность. Особый интерес эти исследования представляют при изучении процессов длительного загрязнения. Интенсивность и конфигурация поля концентрации определяются величиной выброса, длительностью периода накопления, размещением источников, повторяемостью направлений ветра и т.д. [13–15].

В конце зимних сезонов 2005/06 г. и 2006/07 г. в окрестностях Новосибирска проведены экспедиционные исследования аэрозольного загрязнения снегового покрова пылью, тяжелыми металлами, полиароматическими углеводородами (схема отбора проб снега показана на рис. 2).

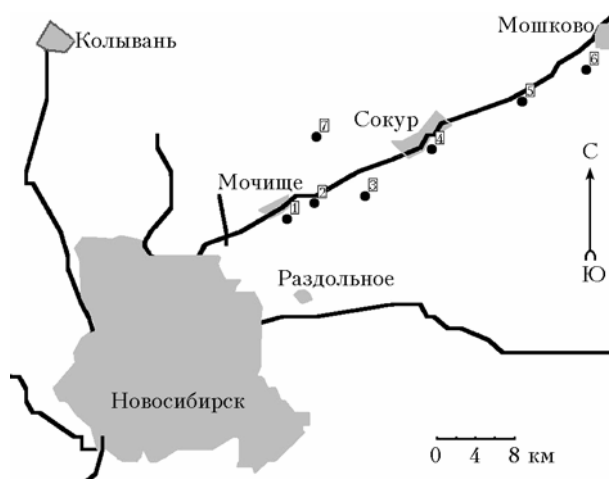


Рис. 2. Схема отбора проб снега в окрестностях г. Новосибирска. Точками обозначены места отбора проб

Маршруты отбора проб выбирались с учетом направлений преобладающих выносов городских примесей и системы дорог. В данном случае этим требованиям в наибольшей степени удовлетворяет томская трасса, расположенная северо-восточнее города. Зимняя повторяемость ветров юго-западного и западного направлений на высотах пограничного слоя атмосферы составляет около 60% [16].

Отбор проб проводился на всю глубину снежного покрова. Химический анализ проб снега на содержание в них тяжелых металлов, полиароматических углеводородов (ПАУ) выполнялся в аналитических лабораториях институтов СО РАН, ГНЦ ВБ «Вектор».

3. Численный анализ данных натуральных наблюдений

Количественная интерпретация данных экспедиционных и лабораторно-аналитических исследований проводилась на основе регрессионного соотношения (12) применительно к северо-восточному сектору регионального выноса примесей от источников города. Начало координат располагалось в центре Новосибирска (Оперный театр). С учетом замечания 2 в этом случае достаточно оценить в зависимости (12) только один неизвестный параметр θ_1 . Для его оценки в качестве опорной точки наблюдения выбиралась точка № 1, расположенная перед пос. Мочище и удаленная от центра города на 18 км. Результаты численной интерпретации данных экспериментальных исследований для рассматриваемых зимних сезонов представлены на рис. 3, 4.

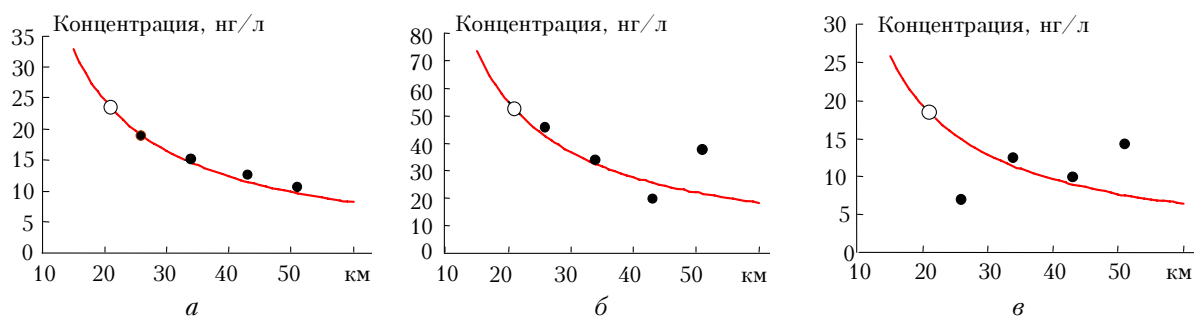


Рис. 3. Измеренные и восстановленные концентрации: *a* – флуорена; *б* – фенантрена; *в* – бенз(а)пирена в северо-восточном направлении от Новосибирска за зимний период 2005/06 г.: \circ – опорные точки, \bullet – контрольные точки наблюдений; — — восстановленная по модели (12) концентрация

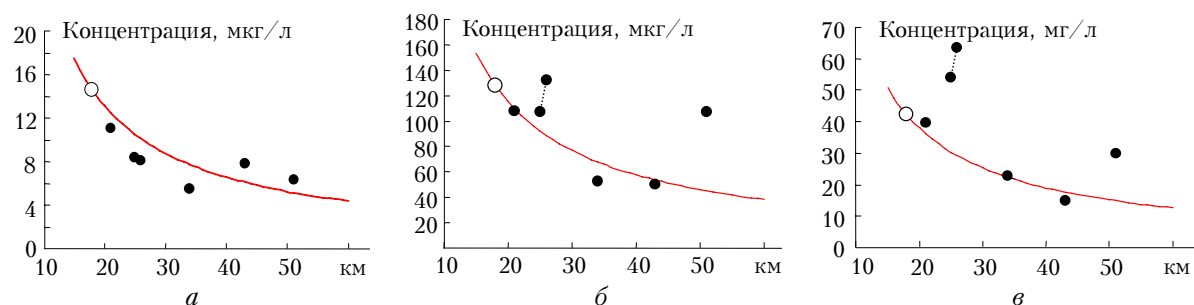


Рис. 4. Измеренные и восстановленные уровни выпадений: *a* – цинка; *б* – железа; *в* – пыли в северо-восточном направлении от Новосибирска за зимний период 2006/07 г.

Анализ этих результатов показывает удовлетворительное согласие расчета наблюдениям в контрольных точках. Несмотря на значительный разброс в некоторых точках сравниваемых значений концентраций тяжелых металлов и ПАУ, в целом преобладает вклад в загрязнение снегового покрова источников, расположенных на территории Новосибирска. Весьма высокими являются выпадения пыли, а также компонентов ПАУ, в частности бенз(а)пирена, оказывающего существенное влияние на заболеваемость населения города. Следует также отметить реальную возможность использования выпадений пыли в качестве трассера, что при дальнейших исследованиях позволит существенно уменьшить количество относительно дорогих химических анализов, ограничившись определением концентраций рассматриваемых химических элементов и соединений лишь в ряде опорных точек.

Заключение

Результаты экспериментальных исследований загрязнения снегового покрова в конце зимних сезонов 2005–2007 гг. и численного анализа полученных данных наблюдений позволили установить количественные закономерности регионального выноса пыли, тяжелых металлов и полиароматических углеводородов с территории г. Новосибирска. Восстановленные поля плотности выпадений загрязняющих примесей на снеговой покров в окрестностях города являются интегральной характеристикой длительного воздействия площадного источника на окружающую среду.

Полученные закономерности указывают на возможность создания экономичной системы мониторинга и получения на ее основе оценки состояния длительного загрязнения атмосферы города и определения эмиссии характерных примесей с его территории.

Работа выполнена при финансовой поддержке Программы фундаментальных исследований Президиума РАН, проект 16.6.

1. Смирнов В.В. Генезис и геофизические последствия пылевых бурь // Вопросы физики атмосферы. СПб.: Гидрометеоиздат, 1998. С. 171–206.
2. Возженников О.И., Нестеров А.В. О переносе примеси в атмосфере при ветровом подхвате с подстилающей поверхности // Метеорол. и гидрол. 1988. № 11. С. 63–70.
3. Горчаков Г.И., Копров Б.М., Шукуров К.А. Исследование выноса субмикронного аэрозоля с подстилающей поверхности // Оптика атмосф. и океана. 2000. Т. 13. № 2. С. 166–170.
4. Трансурановые элементы в окружающей среде. М.: Энергоатомиздат, 1985. 344 с.
5. Семенов О.Е., Шапов А.П. Геоморфологические условия развития дефляционных процессов и дисперсный состав песков Восточного Приаралья // Гидрометеорол. и экология. 1995. № 4. С. 76–98.
6. Берлянд М.Е., Генихович Е.Л., Чичерин С.С. Теоретические основы и методы расчета поля среднегодовых концентраций примесей от промышленных источников // Тр. ГГО. Л.: Гидрометеоиздат, 1984. Вып. 479. С. 102–110.
7. 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.: Гидрометеониздат, 1991. С. 86–92.
8. *Рапута В.Ф.* Модели реконструкции полей длительных выпадений аэрозольных примесей // Оптика атмосф. и океана. 2007. Т. 20. № 6. С. 506–511.
 9. *Бызова Н.Л., Гаргер Е.К., Иванов В.Н.* Экспериментальные исследования атмосферной диффузии и расчеты рассеяния примеси. Л.: Гидрометеониздат, 1991. 279 с.
 10. *Успенский А.Б., Федоров В.В.* Вычислительные аспекты метода наименьших квадратов при анализе и планировании регрессионных экспериментов. М.: Изд-во МГУ, 1975. 168 с.
 11. *Камынин Л.И.* Курс математического анализа. М.: Изд-во МГУ, 1995. Т. 2. 624 с.
 12. *Тихонов А.Н., Самарский А.А.* Уравнения математической физики. М.: Наука, 1972. 735 с.
 13. *Василенко В.Н., Назаров И.М., Фридман Ш.Д.* Мониторинг загрязнения снежного покрова. Л.: Гидрометеониздат, 1985. 182 с.
 14. *Прокачева В.Г., Усачев В.Ф.* Снежный покров в сфере влияния города. Л.: Гидрометеониздат, 1989. 176 с.
 15. *Королева Г.П., Горшков А.Г., Виноградова Т.П., Бутаков Е.В., Мариняйте И.И., Ходжер Т.В.* Исследование загрязнения снегового покрова как депонирующей среды (Южное Прибайкалье) // Химия в интересах устойчивого развития. 1998. Т. 6. С. 327–337.
 16. *Климат Новосибирска.* Л.: Гидрометеониздат, 1979. 221 с.

V.F.Raputa, S.E. Ol'kin, I.K.Resnikova. Numerical analysis of regional pollution from area source.
 Estimation models for long-term regional pollution were worked out. Small parameter representation of emission concentration fields from area source was received by asymptotic expansion methods. Numeric analysis of field survey of snow cover pollution in the vicinity of Novosibirsk was performed.