

К.П. Куценогий, В.Ф. Рапута, А.И. Крылова

ПЛАНИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ НАБЛЮДЕНИЙ В ЗАДАЧАХ ОЦЕНИВАНИЯ ЗОН ВЛИЯНИЯ И ПАРАМЕТРОВ ИСТОЧНИКОВ ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРЫ

На основе моделей K -теории турбулентной диффузии, гауссова факела и аппроксимационных формул для конвективных условий рассмотрены обратные задачи восстановления полей концентраций и параметров стационарных источников примеси в пограничном слое атмосферы. Предложена процедура нахождения оптимальных планов наблюдений. Представлены результаты численного моделирования по оцениванию параметров источников и построению оптимальных планов измерений на данных лабораторных и натуральных экспериментов.

При проведении подфакельных наблюдений с целью выявления зоны влияния и оценивания параметров обследуемого источника возникает проблема интерпретации этих наблюдений и их оптимального размещения. Для ее решения целесообразно привлечение дополнительной информации о метеорологических условиях, процессах распространения примесей, характеристиках источников, возможностях измерительной сети и т.д.

В статье рассматриваются задачи восстановления поля приземной концентрации и параметров стационарных источников из данных лабораторных и натуральных экспериментов. Для описания процесса распространения примеси в приземном и пограничном слоях атмосферы используются модели K -теории градиентного переноса, статистическая гауссова модель и эмпирические аппроксимационные формулы опытных данных. Скорость ветра, коэффициенты турбулентного обмена и диффузионные параметры задаются на основе соответствующих параметризаций, а также вычисляются с помощью моделей пограничного слоя атмосферы.

Основными параметрами, которые требуется оценить, являются: точка максимальной приземной концентрации, ее значение в этой точке, коэффициент расширения факела в поперечном к ветру направлении, мощность выброса, эффективная высота источника. В случае тяжелой примеси оценке подлежат величины, учитывающие совместные эффекты оседания частиц и турбулентного перемешивания.

Апробация предлагаемых моделей оценивания проведена на данных лабораторных наблюдений, а также полевых исследований в окрестностях тепловых электростанций и аэрозольных источников с контролируруемыми параметрами. Показана эффективность выбора оптимального расположения точек отбора проб на точность восстановленных параметров.

1. Планирование наблюдений

Под планом эксперимента понимаем множество $\varepsilon_N = \{x_i, p_i, \}_{i=1}^N$, где p_i – число измерений в точке x_i ; N – общее число наблюдений. Оптимальный план e_N^* определяем из решения экстремальной задачи

$$|D(e_N^*, \hat{\theta}_N)| = \inf_{e_N} |D(\varepsilon_N, \hat{\theta}_N)|.$$

Здесь $D = M^{-1}$, M – информационная матрица Фишера; D – дисперсионная матрица оценок:

$$M(\varepsilon, \theta) = F F^T,$$

где

$$F = \left\| \left\| \mathbf{f}(x_1, \theta), \dots, \mathbf{f}(x_n, \theta) \right\| \right\|, \quad \mathbf{f}^T = \left\| \left\| \frac{\partial q}{\partial q_1}, \dots, \frac{\partial q}{\partial q_m} \right\| \right\|;$$

q – концентрация примеси, θ – вектор неизвестных параметров. Поскольку регрессионная зависимость $q(\mathbf{x}_i, \theta)$, вообще говоря, нелинейна по θ , то поиск оптимального плана проводится с помощью следующей итерационной процедуры последовательного анализа и планирования наблюдений [1].

- 1) Пусть проведен эксперимент на основе невырожденного плана ε_N (т.е. $|M(\varepsilon_N, \hat{\theta}_N)| \neq 0$).
- 2) Отыскиваем оценки $\hat{\theta}$ метода наименьших квадратов согласно этому плану.
- 3) Находим точку

$$\mathbf{x}_{N+1} = \arg \sup_{\mathbf{x} \in \Omega} d(\mathbf{x}, \varepsilon, \hat{\theta}_N),$$

где $d(\mathbf{x}, \varepsilon_N, \hat{\theta}_N) = \mathbf{f}^T(\mathbf{x}, \theta) M^{-1}(\varepsilon_N, \theta) \mathbf{f}(\mathbf{x}, \theta) \Big|_{\theta = \hat{\theta}_N}$ – дисперсия поля концентрации; Ω – область планирования.

4) Проводим дополнительное наблюдение в точке \mathbf{x}_{N+1} . Затем повторяются операции, перечисленные в пп. 1–3.

2. Восстановление поля приземной концентрации от газоаэрозольного источника

Пусть процесс распространения примеси от стационарного источника высотой H описывается уравнением

$$u(z) \frac{\partial q}{\partial x} - w \frac{\partial q}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} k(z) \frac{\partial q}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial y} v(z) \frac{\partial q}{\partial y} \quad (1)$$

с граничными условиями

$$k \frac{\partial q}{\partial z} \Big|_{z=0} = 0, q \Big|_{|\mathbf{x}| \rightarrow \infty} \rightarrow 0, uq \Big|_{x=0} = Q \delta(y) \delta(z - H), \quad (2)$$

где $\mathbf{x} = (x, y, z)$, ось x направлена по ветру, ось z – вертикально вверх; $u(z)$ – скорость ветра; $\delta(z)$ – дельта-функция.

Аппроксимируя профили ветра и коэффициенты турбулентного обмена степенными функциями высоты, из (1), (2) получаем выражение для приземной концентрации в виде нелинейной функции регрессии

$$q(\mathbf{x}, \theta) = \frac{\theta_1}{x^{3/2}} \exp\left(-\frac{\theta_2}{x} - \frac{\theta_3 y^2}{x}\right) \sum_{i=1}^K p_i \frac{\theta_2^{\theta_4 w_i}}{\Gamma(1 + w_i \theta_4) x^{\theta_4 w_i}}, \quad (3)$$

где $\theta = (\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4)^T$ – вектор искомых параметров. В качестве дополнительной информации использованы данные измерений приземной концентрации

$$r_k = q(\mathbf{x}_k, \theta) + \xi_k, \quad k = \overline{1, N}. \quad (4)$$

Вектор искомых параметров θ и функция регрессии (3) определяются из условия минимума функционала

$$I_N(\theta) = \sum_{k=1}^N \sigma_k^{-2} (r_k - q(\mathbf{x}_k, \theta))^2. \quad (5)$$

На рис. 1 представлены результаты восстановления по модели (3) – (5) осевой приземной концентрации от точечного источника оседающей примеси высотой $H = 100$ м для трех вариантов планов наблюдений. Из рисунка следует, что наибольшая точность восстановления достигается на оптимальном плане [2].

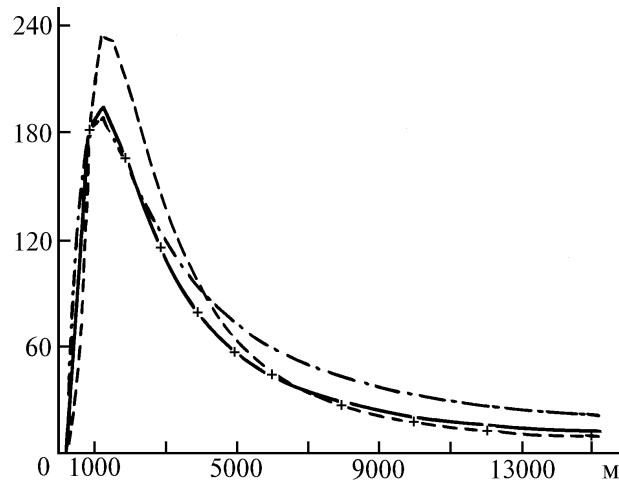


Рис. 1. Восстановленная осевая концентрация ($\text{см}^{-5/2}$) монодисперсной примеси для $w = 20$ см/с. Сплошная линия – по локально D -оптимальному плану; штриховая – по равномерному плану; штрих-пунктирная – по двухточечному плану; крестики – концентрация, рассчитанная по модели (1)–(2)

3. Обратная задача оценивания параметров источника

На основе модели (1) – (2), гауссовой модели факела и данных наблюдений приземной концентрации через решение обратной задачи определяются мощность Q и эффективная высота источника H [3]. В качестве данных наблюдений используются результаты натурных экспериментов о состоянии пограничного слоя атмосферы и концентрациях двуокиси серы в окрестностях ТЭЦ г. Диккерсон (Канада) [4]. В табл. 1 приведены результаты оценивания параметров Q и H .

Таблица 1

Оценки приведенной мощности Q и эффективной высоты источника H по смешанной модели

N реализации	Точки плана x , м	$q_{\text{расч}}/q_{\text{экс}}$	Оценки		$H_{\text{экс}}$, м
			Q	H , м	
1	2111	1,3	0,6	120	145
	8129	1,7			
2	1724	1,1	0,8	110	130
	5660	1,2			
3	5660	0,6	0,9	190	135
	14600	1,1			
4	3106	1,1	0,5	95	124
	8670	1,9			
5	3106	1,1	1,0	130	125
	5293	0,9			
6	3106	1,1	0,8	120	124
	5600	1,2			

В случае конвективного пограничного слоя атмосферы для описания приземной концентрации использована аппроксимационная формула Бригса [5]

$$q(X, Z_h, Q) = Q \Psi(X, Z_h)$$

$$\Psi(X, Z_h) = \frac{0,9 (X/Z_h)^{9/2}}{[1 + 0,4 (X/Z_h)^{5/6, 9/2, 4/3}]^2} + [1 + 3 Z_h^{1/2} X^{-3/2} + 50 X^{-9/2}]^{-1}, \quad (6)$$

являющаяся согласно рис. 2 достаточно адекватной данным лабораторных экспериментов [6]. В (6) q – приземная концентрация примеси; h и $Z_h = h/z_i$ – реальная и относительная высоты источника; z_i – высота слоя перемешивания; Q – мощность линейного источника.

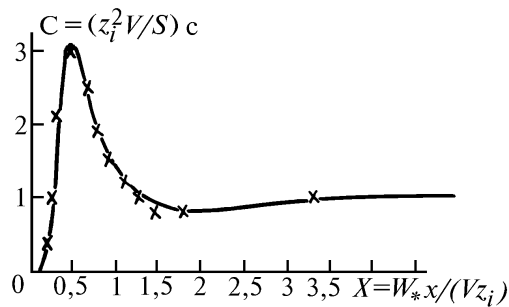


Рис. 2. Осеваая приземная концентрация от источника выброса высотой $Z_h = 0,24$; сплошная линия – по формуле Бригса; крестики – лабораторные результаты (Willis – Deardorff)

В табл. 2 приведены результаты восстановления Q и Z_h по регрессионной зависимости (6) на множестве планов, образованных всевозможными парами точек наблюдения $X_i, i = 1, 12$. Из табл. 2 вытекает, что при относительно близком соответствии измеренных и вычисленных по (6) концентраций лучшим оценкам в основном отвечают планы с меньшими значениями определителя дисперсионной матрицы.

Таблица 2

Распределение относительной ошибки оценивания параметров \hat{Z}_h и \hat{Q} на множестве планов ϵ_j при $Z_h = 0,24$

x1	x2										
	a2	a3	a4	a5	a6	a7	a8	a9	a10	a11	a12
a1	$\frac{146}{\Delta}$	$\frac{94}{\Delta}$	$\frac{2}{\bullet}$	$\frac{5}{\bullet}$	$\frac{5}{\bullet}$	$\frac{8}{\bullet}$	$\frac{7}{\bullet}$	$\frac{8}{\bullet}$	$\frac{13}{\bullet}$	$\frac{2}{\bullet}$	$\frac{7}{\bullet}$
a2		$\frac{76}{\bullet}$	$\frac{3}{\bullet}$	$\frac{6}{\bullet}$	$\frac{5}{\bullet}$	$\frac{9}{\bullet}$	$\frac{6}{\bullet}$	$\frac{7}{\bullet}$	$\frac{13}{\bullet}$	$\frac{2}{\bullet}$	$\frac{8}{\bullet}$
a3			$\frac{6}{\bullet}$	$\frac{7}{\bullet}$	$\frac{5}{\bullet}$	$\frac{7}{\bullet}$	$\frac{5}{\bullet}$	$\frac{6}{\bullet}$	$\frac{11}{\bullet}$	$\frac{3}{\bullet}$	$\frac{7}{\bullet}$
a4				$\frac{10}{\bullet}$	$\frac{4}{\bullet}$	$\frac{7}{\bullet}$	$\frac{4}{\bullet}$	$\frac{5}{\bullet}$	$\frac{107}{\bullet}$	$\frac{2}{\bullet}$	$\frac{13}{\bullet}$
a5					$\frac{76}{\Delta}$	$\frac{62}{\Delta}$	$\frac{51}{\Delta}$	$\frac{42}{\Delta}$	$\frac{32}{\Delta}$	$\frac{16}{\Delta}$	$\frac{8}{\Delta}$
a6						$\frac{56}{\Delta}$	$\frac{5}{\Delta}$	$\frac{34}{\Delta}$	$\frac{22}{\Delta}$	$\frac{33}{\Delta}$	$\frac{96}{\Delta}$
a7							$\frac{45}{\Delta}$	$\frac{26}{\Delta}$	$\frac{8}{\Delta}$	$\frac{48}{\Delta}$	$\frac{153}{\Delta}$
a8								$\frac{15}{\Delta}$	$\frac{13}{\Delta}$	$\frac{113}{\Delta}$	$\frac{226}{\Delta}$
a9									$\frac{31}{\Delta}$	$\frac{170}{\Delta}$	$\frac{299}{\Delta}$
a10										$\frac{290}{\Delta}$	$\frac{46}{\Delta}$
a11											$\frac{27}{\Delta}$

Примечание. Числитель: $\max \left\{ \frac{|Z_h - \hat{Z}_h|}{Z_h}, \frac{|Q - \hat{Q}|}{Q} \right\}$ 100%, знаменатель: $\bullet - |D(\epsilon_{ij})| \leq 0,2$; $\Delta - |D(\epsilon_{ij})| > 0,2$.

На рис. 3 приведены результаты численного моделирования оптимальных планов измерений согласно процедуре пп. 1–4 в зависимости от искомой высоты источника Z_h при условии, что область планирования принадлежит отрезку $[0,6; 4]$. Из рисунка видно, что до определенной высоты Z_h более информативны концы отрезка. Резкое изменение в положении точек плана наступает, когда $X_{\max}(Z_h) > 0,6$. Здесь $X_{\max}(Z_h)$ – точка максимальной приземной концентрации.

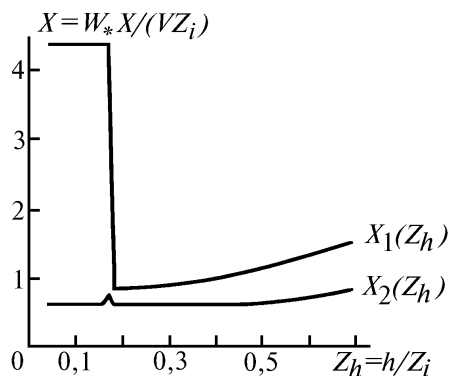


Рис. 3. Локально D -оптимальные планы наблюдений в обратной задаче оценивания Q , Z_h для конвективного планетарного пограничного слоя

4. Определение суммарного выброса

В ряде случаев значительный интерес представляет оценка суммарного выброса примеси с определенной территории.

Пусть в трехмерной ограниченной области Ω находятся M источников выброса загрязняющей примеси с мощностями θ_m , $m = \overline{1, M}$. Процесс распространения примеси от каждого из источников описывается соответствующей моделью (1)–(2). Тогда при наличии данных измерений концентрации в области Ω можно сформулировать следующие задачи определения максимального и минимального возможного в этих условиях суммарного выброса.

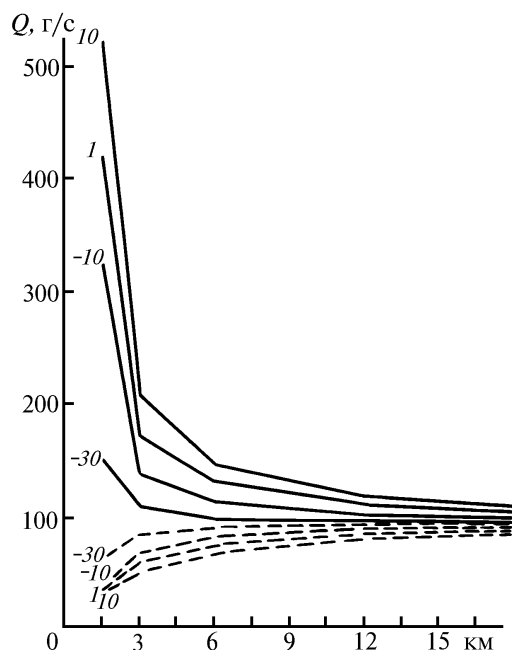


Рис. 4. Поведение оценок верхней Q_{\max} и нижней Q_{\min} границ суммарного выброса при $\mu = 10; 1; -10; -30$ и в зависимости от расстояния x (для приземного уровня). Сплошная линия – Q_{\max} , штриховая – Q_{\min}

Найти вектор $\theta = (\theta_1, \dots, \theta_M)^T$ такой, что

$$R(\theta) = \sum_{m=1}^M \theta_m \rightarrow \max_{\theta \in D} (\min_{\theta \in D}),$$

при ограничениях

$$\sum_{m=1}^M a_{nm} \theta_m \leq r_n (\geq r_n), \quad n = \overline{1, N};$$

$$D = \{ \theta : 0 \leq A_m \leq \theta_m \leq B_m, \quad m = \overline{1, M} \}.$$

Здесь a_{nm} – концентрация от единичного выброса m -го источника в точке x_n ; r_n – измеренная концентрация в точке x_n ; A_m, B_m – нижняя и верхняя границы допустимых значений мощности m -го источника.

На примере промплощадки комбината химического волокна г. Барнаула проведены численные эксперименты по оцениванию верхней и нижней границ суммарной мощности выброса сероводорода от 17 источников по данным маршрутных наблюдений в зависимости от показателя устойчивости μ_0 пограничного слоя атмосферы [7].

Результаты численного моделирования, приведенные на рис. 4, показывают вполне удовлетворительное соответствие оценок с искомой суммарной мощностью 95 г/с для неустойчивой стратификации атмосферы.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 95–05–15575).

1. Успенский А.Б., Федоров В.В. // Кибернетика. 1974. N 4. С. 123–128.
2. Крылова А.И., Рапута В.Ф., Суторихин И.А. // Метеорология и гидрология. 1993. N 5. С. 5–13.
3. Рапута В.Ф., Крылова А.И. // Метеорология и гидрология. 1995. N 3. С. 49–58.
4. Venkatram A. // Atmosph. Environ. 1980. V. 14. P. 1–10.
5. Briggs A.G. // J. Clim. and Appl. Meteorol. 1985. V. 24. P. 1167–1186.
6. Willis G.E., Deardorff J.W. // Atmosph. Environ. 1978. V. 12. P. 1305–1311.
7. Лайхтман Д.Л. Физика пограничного слоя. Л.: Гидрометеиздат, 1970. 341 с.

ВЦ СО РАН, ИХКиГ СО РАН,
Новосибирск

Поступила в редакцию
26 января 1996 г.

K. P. Koutsenogii, V. F. Raputa, A. I. Krylova. Design and Analysis of Observations for Estimation of Influence Zones and Atmosphere Pollution Sources' Parameters.

The inverse problems on reconstruction of pollutant concentration fields and the parameters of stationary sources in the atmospheric boundary layer are examined on the basis of the diffusion models of K -theory, Gaussian plume, approximation formulas for the convective mixing. The procedure for the optimum designing of observations is proposed. The numerical results on estimating the source parameters and on searching the optimum designs for observations are presented using measured and laboratory data.