

УДК 577.4

О КОНТРОЛЕ СОСТАВА ВОЗДУХА НАД ПРОТЯЖЕННЫМИ ИСТОЧНИКАМИ ЗАГРЯЗНЕНИЙ

Б. В. Дементьев, В. В. Иванов, С. А. Решетняк, Л. А. Шелепин, В. А. Щеглов

Построена теоретическая модель для оценки мощности протяженных источников, загрязняющих атмосферу примесей. На ее основе рассмотрены возможности дистанционного метода контроля примесей в атмосфере с помощью газокорреляционной ИК-радиометрии, включая конкретные способы проведения измерений.

В настоящее время все большую значимость приобретает оперативный контроль загрязняющих атмосферу примесей. В работе [1] рассмотрена возможность определения местоположения и мощности локальных источников загрязнения дистанционными методами анализа газового состава атмосферы. Проведены оценки требований к чувствительности измерительной аппаратуры и параметрам наблюдения с целью обнаружения и диагностики источников примесей. В работе [2] рассмотрена возможность метода газокорреляционной ИК-радиометрии, позволяющего осуществлять оперативное картографирование распределения метана в приземных слоях атмосферы. Аппаратура может размещаться на самолетах и космических аппаратах и обеспечивать контроль обширных территорий. Как показано в [1], газокорреляционный ИК-радиометр позволяет обнаружить утечки метана даже из небольших отверстий в магистральных газопроводах и определить местоположение повреждений.

В настоящее время весьма остро стоит проблема экологии городов и утилизации промышленных и бытовых отходов. Их ежегодный прирост в России составляет около 7 млрд. тонн. На полигонах и свалках уже накоплено около 80 млрд. тонн. Причем токсичных около 1.6 млрд. тонн. Особую опасность представляют твердые бытовые отходы (ТБО). Вокруг захоронений могут формироваться зараженные зоны. Ежегодно

в России каждый городской житель производит 200 – 300 кг ТБО. В ряде стран Запада накопление ТБО существенно больше, чем в России. Оно составляет для США, Австралии, Канады, Нидерландов, Германии соответственно 740, 680, 640, 500, 500 кг [3]. До настоящего времени подавляющее количество ТБО продолжают вывозить на полигоны (в России – 97%, США – 73%, в Германии – 70%, в Японии – 30%). В России под полигоны занято 40 тыс. гектаров пригородных земель и продолжают отчуждаться ежегодно порядка 10 тыс. гектаров, не считая множества несанкционированных свалок. Свалки и полигоны ТБО представляют собой значительную экологическую и эпидемиологическую опасность. Они являются мощным источником загрязнения почвы, подземных вод и водоемов, атмосферного воздуха. Производство отходов и уровень загрязнения окружающей среды непрерывно растут. Поэтому задачи идентификации и мониторинга захоронений ТБО приобретают все большую значимость. Эмиссия парниковых газов (CH_4 и CO_2) с полигонов была исследована в ряде работ. Так в работе [4] было проведено экспериментальное исследование эмиссии полигонами захоронений ТБО, расположенными в окрестностях Санкт-Петербурга. Брались пробы воздуха по периметру трех обследованных полигонов. Оказалось, что суммарная интенсивность эмиссии метана составила около 20 % от эмиссии всего региона Санкт-Петербурга с окрестностями. В работе [5] получены оценки эмиссии метана в различных районах Санкт-Петербурга, которые составляют порядка $1 \text{ г/км}^2\text{с}$.

В настоящей работе рассматриваются протяженные источники загрязнения. К ним относятся города, полигоны захоронений отходов, отстойники химических производств, области вулканического загрязнения земной поверхности, выделяющие метан болота, свалки и т.д. В предлагаемой модели распространения газа от таких источников аналогично [1, 6, 7] учитываются процессы диффузии, перенос примеси ветром, а также ее оседание или подъем в вертикальном направлении. Для повышения точности при анализе слабых источников дополнительно рассматривается горизонтальная (вдоль поверхности источника) геометрия наблюдений. В рамках модели находится функция распределения примеси в пространстве над протяженным наземным источником. Определяется также ее содержание на вертикальной и горизонтальной трассе зондирования атмосферы.

При определении концентрации примеси исходим из уравнения "газовой атаки":

$$\frac{\partial n}{\partial t} + u \frac{\partial n}{\partial x} - u_0 \frac{\partial n}{\partial z} = D \Delta n + q(x, y) \delta(z), \quad (1)$$

где ось Ox выбрана в направлении скорости ветра u , u_0 – скорость оседания (или подъема) примеси по высоте, D – коэффициент турбулентной диффузии, $q(x, y)$ – мощность

распределенного источника примеси или число ее частиц, выделяемых за единицу времени с элемента площади $dx dy$ в точке с координатами x, y . Величины u, u_0, D считаем постоянными. Источник включается в момент времени $t = 0$.

В уравнении (1) можно ввести в рассмотрение вектор потока примеси \mathbf{J} с граничными условиями

$$J_x = \left(un - D \frac{\partial n}{\partial x} \right)_{x,y \rightarrow \pm\infty} = 0, \quad J_y = \left(-D \frac{\partial n}{\partial y} \right)_{x,y \rightarrow \pm\infty} = 0, \quad J_z = \left(-u_0 n - D \frac{\partial n}{\partial z} \right)_{z=0,\infty} = 0.$$

Решение задачи (1) имеет вид:

$$n = \iint_S G(x - x_0, y - y_0, z, t) q(x_0, y_0) dx_0 dy_0, \quad (2)$$

где G – функция Грина для единичного источника или решение задачи (1) с $q(x, y) = \delta(x - x_0) \cdot \delta(y - y_0)$, S – область распределенного на поверхности Земли источника загрязнения. Функция G получена в работе [1] и имеет вид:

$$G(x, y, z, t) = \frac{\exp(\alpha x - \beta z)}{4(\pi D)^{3/2}} \times \int_0^t \exp\left(-\frac{r^2}{4D\tau} - \gamma\tau\right) \left[1 + \beta \int_0^\infty \exp\left(\beta\omega - \frac{\omega^2 + 2z\omega}{4D\tau}\right) d\omega \right] \frac{d\tau}{\tau^{3/2}}, \quad (3)$$

где $\alpha = u/2D$, $\beta = u_0/2D$, $\gamma = D(\alpha^2 + \beta^2)$, $r^2 = x^2 + y^2 + z^2$. Практический интерес представляет стационарное распределение концентрации примеси в атмосфере. Рассматривая именно этот случай и переходя в (3) к пределу $t \rightarrow \infty$, получаем

$$G_{st}(x, y, z) = \frac{\exp(\alpha x - \beta z)}{2\pi D} \left[\frac{1}{r} \exp(-\alpha_0 r) + \beta \int_0^\infty \exp\left(\beta\omega - \alpha_0 \sqrt{\rho^2 + (\omega + z)^2}\right) \frac{d\omega}{\sqrt{\rho^2 + (\omega + z)^2}} \right], \quad (4)$$

где $\rho^2 = x^2 + y^2$, $\alpha_0 = \sqrt{\alpha^2 + \beta^2}$.

Для не очень близких расстояний от источника и скорости u_0 оседания (или подъема) примеси, существенно меньшей скорости ветра u , второе слагаемое в (4) дает заметный вклад на расстояниях от источника порядка α/β^2 , т.е. там, где концентрация примеси близка к нулю. Поэтому для $\rho \ll \alpha/\beta^2$ этим членом можно пренебречь,

и функция Грина, определяющая с точностью до размерного множителя (c^{-1}) стационарное распределение концентрации примеси в случае точечного источника, принимает вид:

$$G_{st} \cong \frac{1}{2\pi D r} \exp(\alpha x - \beta z - \alpha_0 r). \quad (5)$$

В области высот $z \ll \rho$

$$G_{st} \cong (2\pi D \rho)^{-1} \exp \left[\alpha(x - \rho) - \frac{\alpha}{2\rho} \left(z + \frac{\beta}{\alpha} \rho \right)^2 \right] \quad (6)$$

и распределение концентрации примеси по высоте имеет гауссов характер. Причем, в случае тяжелой примеси ($\beta > 0$) ее концентрация наибольшая у поверхности Земли с характерным масштабом убывания по высоте $\rho/\alpha^{1/2}$. Для легкой примеси $\beta < 0$ наибольшее значение концентрации достигается на высоте $u_0\rho/u$. Чем дальше от источника, тем выше расположен максимум концентрации.

При исследовании содержания примеси на протяженных трассах в атмосфере измеряемыми величинами являются

$$N_1 = \int_0^H n_{st} dz, \quad N_2 = \int_0^L n_{st} dx,$$

где H и L – длины трасс при вертикальной и горизонтальной геометриях наблюдения. Оценим эти величины, рассматривая сначала случай измерений на вертикальных трассах в атмосфере. При этом будем считать, что измерительный прибор расположен достаточно высоко над поверхностью Земли, и можно заменить верхний предел H на ∞ . Тогда после преобразований, приведенных в работе [7], можно представить величину N_1 в виде:

$$N_1 \iint_S q(x_0, y_0) \int_0^\infty G_{st}(x - x_0, y - y_0, z) dz dx_0 dy_0$$

и после интегрирования по высоте z получаем

$$N_1 = \frac{1}{2\pi D} \iint_S q(x_0, y_0) \exp[\alpha(x - x_0)] K_0 \left[\alpha \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2} \right] dx_0 dy_0,$$

где $K_0(\xi)$ – модифицированная функция Бесселя.

Пусть область S протяженного источника загрязнения имеет вид круга радиуса R . Будем интересоваться общим содержанием примеси непосредственно над протяженным источником, так как именно в этой области она наибольшая. Точку наблюдения с координатами x, y при вертикальном трассировании считаем внутренней точкой области S . Переходя к полярным координатам, имеем

$$N_1(x, y) = \frac{q}{2\pi D} \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{r(\varphi)} d\rho \rho K_0(\alpha\rho) \exp(-\alpha\rho \cos \varphi), \quad (7)$$

где $r(\varphi) = -x \cos \varphi - y \sin \varphi + [R^2 - (x \sin \varphi - y \cos \varphi)^2]^{1/2}$ – уравнение границы протяженного источника в полярных координатах, φ отсчитывается от направления ветра. Из общих соображений ясно, что концентрация примеси в точке наблюдения в основном будет определяться действием точечных источников, расположенных с наветренной стороны области S . Этот же результат непосредственно вытекает из формулы (7), так как основной вклад в N_1 дает область интегрирования вдоль луча с $\varphi = \pi$. Поэтому, представляя угловую часть подынтегральной функции в виде ряда Тейлора по степеням φ и используя асимптотику $K_0(\xi)$ для больших значений аргумента, получаем:

$$N_1(x, y) = \frac{q}{2D\sqrt{2\pi\alpha}} \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{r(\varphi)} \exp\left[-\frac{\alpha\rho}{2}(\varphi - \pi)^2\right] \sqrt{\rho} d\rho \cong \frac{qr(\pi)}{u}, \quad (8)$$

где $r(\pi) = x + (R^2 - y^2)^{1/2}$ – расстояние от точки наблюдения до границы области S с наветренной стороны. Аналогичный результат получается и для области S прямоугольной формы. Отсюда, для всякой области источника загрязнения, размеры которой существенно превышают величину α^{-1} , общее содержание примеси N_1 при измерениях на вертикальных трассах в атмосфере определяется расстоянием l от точки наблюдения до наветренной границы области, т.е.

$$N_1 \cong \frac{ql}{u}. \quad (9)$$

Обратимся к оценке общего содержания примеси N_2 при наблюдениях на горизонтальных трассах с учетом того, что ее концентрация наибольшая вблизи поверхности Земли. Используя стационарную функцию распределения (5) для $z = 0$ при трассе измерения, направленной параллельно скорости ветра, имеем:

$$N_2 = \int_0^L dx \iint_S G_{st}(x - x_0, y - y_0, 0) q(x_0, y_0) dx_0 dy_0 =$$

$$= \frac{q}{2\pi D} \int_0^L dx \iint_S \exp[\alpha(x - x_0 - \rho_{MM_0})] \frac{dx_0 dy_0}{\rho_{MM_0}}, \quad (10)$$

где $\rho_{MM_0} = [(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2]^{1/2}$. Будем считать, что наблюдение ведется по касательной к поверхности источника и длина трассы L совпадает с его геометрическим размером вдоль скорости ветра. Заметим, что подынтегральная функция в (10) имеет почти гауссово распределение по переменной y_0 . Поэтому, интегрируя по y_0 , получаем следующую оценку для общего содержания примеси на горизонтальной трассе над поверхностью источника:

$$N_2 = \frac{q}{2\pi D} \int_0^L dx \iint_S \exp\left[-\frac{\alpha(y - y_0)^2}{x - x_0 + \rho_{MM_0}}\right] \frac{dx_0 dy_0}{\rho_{MM_0}} \cong \\ \cong \frac{q}{\sqrt{\pi D u}} \int_0^L dx \int_0^x \frac{dx_0}{\sqrt{x - x_0}} = \frac{qL^{3/2}}{(Du)^{1/2}}, \quad (11)$$

где интегрирование по переменной x_0 ограничено координатой x , так как для всех $x_0 > x$ подынтегральная функция в (10) экспоненциально убывает с ростом x_0 . Очевидно, что оценка (11) справедлива для размеров L области источника, существенно превышающих величину α^{-1} .

Полученные формулы (9) и (11) для общего содержания примеси на вертикальных и горизонтальных трассах зондирования можно использовать для определения мощности q источника примеси по результатам измерения ее содержания N_1 или N_2 . При использовании для этой цели газокорреляционного ИК-радиометра [6], предназначенного для измерения содержания метана в атмосфере, возможны следующие варианты:

- наземные измерения прямого солнечного излучения (наземные вертикальные трассы НВ);
- наземные измерения отраженного от топографических объектов солнечного излучения (наземные горизонтальные трассы НГ);
- самолетные измерения отраженного от земной поверхности солнечного излучения при визировании в надир (СВ).

В табл. 1 представлены значения порога σ обнаружения содержания метана для различных вариантов измерений, превышение над фоном содержания метана N на пути луча и отношение сигнала к шуму $C/\Pi = N/\sigma$. В качестве исходных для расчета σ использованы данные [6] об аппаратурной составляющей ошибки измерений при наблюдениях с высоты 20 км. Время единичного измерения 1 с. Величины N рассчитаны

на основании выражений (9) и (11). При этом использовались данные контактных измерений [4] плотности потока метана q на ПТБО "Южный" под г. Санкт-Петербургом ($l = L \sim 150$ м, $q = 1.15$ мг/м²с). Расчетная величина коэффициента диффузии составляет $D \sim 0.1$ м²/с при скорости ветра на стандартной величине флюгера $u = 1$ м/с и уровне шероховатости поверхности 0.1 м, имевшими место в процессе измерений. Используются также данные [5] для всего г. С-Петербурга ($l \sim 30$ км, $q = 10^{-3}$ мг/м²с). Для городского района ($L \sim 3$ км, $q = 10^{-3}$ мг/м²с) также принята величина $D \sim 0.1$ м²/с.

Т а б л и ц а 1

Значения σ , N и $C/Ш$ для различных вариантов газокорреляционных измерений с постоянной времени 1 с

Вариант измерений	σ , мг/м ²	ПТБО		Городской район		Город в целом	
		N , мг/м ²	$C/Ш$	N , мг/м ²	$C/Ш$	N , мг/м ²	$C/Ш$
НВ	5 – 15	170	~ 10 – 30	–	–	30	2 – 6
СВ	15 – 150	170	~ 1 – 10	–	–	30	≤ 2
НГ	30 – 300	7000	~ 20 – 200	540	2 – 20	–	–

Интервалы значений σ , приведенные в табл. 1, соответствуют диапазонам изменений зенитного угла Солнца 30 – 80° и альбедо отражающей поверхности 0.1 – 0.25 в рабочей области спектра прибора 2.2 – 2.3 мкм.

Как видно из таблицы, измерения на горизонтальных трассах по сравнению с измерениями на вертикальных трассах обеспечивают большее отношение сигнал/шум. Однако требуемый для определения мощности источника коэффициент турбулентной диффузии D в (11) зависит от состояния атмосферы и подстилающей поверхности, высоты трассы и меняется в очень широких пределах. Для его определения можно использовать измерения содержания примеси N_2 от искусственного точечного источника с известной скоростью выделения примеси в атмосферу.

Пусть данный источник расположен на поверхности Земли с координатами $x = y = 0$. При этом из (6) распределение концентрации примеси имеет вид

$$n_{st} = \frac{Q}{2\pi D\rho} \exp \left[\alpha(x - \rho) - \frac{\alpha}{2\rho} \left(z + \frac{\beta}{\alpha} \right)^2 \right],$$

где Q – скорость выделения примеси искусственным источником.

Предположим, что измерение ведется на высоте h вдоль направленной по ветру оси координат Ox . Пусть L – длина трассы, φ – угловое поле зрения прибора, а $\Delta = L\varphi$ ($\Delta \ll h, L$). Тогда общее содержание примеси на трассе

$$N_2 = \int_0^L dx \int_{-\Delta/2}^{\Delta/2} dy \int_{h-\Delta/2}^{h+\Delta/2} dz G_{st}(x, y, z) = \frac{Q\Delta}{2\pi D} \int_{h-\Delta/2}^{h+\Delta/2} dz \int_0^L \exp \left[-\frac{\alpha}{2x} \left(z + \frac{\beta}{\alpha} x \right)^2 \right] \frac{dx}{x}.$$

Для протяженных трасс ($L > \beta^2/\alpha$) внутренний интеграл вычисляется с помощью метода "перевала". В результате для $h \ll \beta^{-1}$ получаем

$$N_2 \cong \frac{Q\Delta}{D\sqrt{2\pi\beta}} \int_{h-\Delta/2}^{h+\Delta/2} \frac{dz}{\sqrt{z}} = \frac{Q\Delta^2}{d\sqrt{2\pi\beta h}} \cong \frac{Q\Delta^2}{\sqrt{\pi D u_0 h}}. \quad (12)$$

При известной длине трассы формула (12) позволяет оценить коэффициент турбулентной диффузии D по измерениям N_2 .

Таким образом, дистанционные измерения содержания примесей в атмосфере (в частности, методом газокорреляционной ИК-радиометрии) в сочетании с предложенными моделями их распространения могут служить эффективным средством бесконтактной диагностики источников загрязнения. Представляется также перспективным мониторинг экологического состояния городов, в том числе обнаружение несанкционированных свалок. В этих случаях отсутствует априорная информация о положении и размерах источников. Поэтому требуется решение обратной задачи восстановления их характеристик по измерениям пространственного распределения содержания примесей.

В заключение отметим, что в настоящее время наряду с контролем источников загрязнения и мониторингом аварийных ситуаций все большую роль приобретают исследования процессов глобального переноса примесей [8]. Прогноз экологического состояния атмосферы должен учитывать и эти процессы, изучение которых возможно только дистанционными методами.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант N 01-05-65392).

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Иванов В. В., Решетняк С. А., Шелепин Л. А., Щеглов В. А. Краткие сообщения по физике ФИАН, N 4, 35 (2002).

- [2] Виротайнен Я. А., Дементьев Б. В., Иванов В. В., Поляков А. В. Исследование Земли из космоса, N 6, 39 (2002).
- [3] Кулагин Ю. А. Проблемы переработки бытовых и обезвреживания промышленных отходов. В сб.: Стратегия жизни в условиях планетарного экологического кризиса, III, 165, С-Пб., "Гуманистика", (2002).
- [4] Зинченко А. В., Решетняков А. И., Парамонова Н. Н., и др. Труды Научно-исследовательского центра дистанционного зондирования атмосферы (филиал ГГО), вып. 4, 552 (2002).
- [5] Зинченко А. В., Парамонова Н. Н., Привалов В. И., Решетняков А. И. Метеорология и гидрология, N 5, 35 (2001).
- [6] Иванов В. В., Решетняк С. А., Шелепин Л. А., Щеглов В. А. Труды 3-й Всероссийской научной конференции "Молекулярная физика неравновесных систем", 128, Иваново-Плес, изд. ИВГУ, (2001).
- [7] Дементьев Б. В., Иванов В. В., Решетняк С. А., и др. Труды 7-й Международной конференции. "Оптические методы исследования потоков". М., изд. МЭИ (2003).
- [8] Марчук Г. И. Математическое моделирование в проблеме окружающей среды. М., Наука, 1982.

Поступила в редакцию 10 октября 2003 г.