

УДК 577.4

ДИСТАНЦИОННАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ НАЗЕМНЫХ ИСТОЧНИКОВ ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРЫ

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

Рассматривается процесс распространения примеси, загрязняющей атмосферу. Учитываются процессы диффузии, перенос ее ветром и движение в вертикальном направлении под действием силы тяжести. Найдена функция распределения содержания примеси в пространстве над поверхностью Земли. Оцениваются возможности дистанционного мониторинга на основе метода газокорреляционной ИК-радиометрии.

В связи с антропогенным влиянием на газовый состав атмосферы все более актуальной становится проблема оперативного контроля источников ее загрязнения в региональном и глобальном масштабах, т.е. как для больших городов, где имеет место скопление транспорта и экологически опасных производств, так и для обширных регионов с малой плотностью населения, где отсутствуют средства мониторинга опасных ситуаций природного и техногенного характера. Существенным вкладом в решение этой проблемы явилось развитие метода газокорреляционной радиометрии и его использование на самолетах и космических аппаратах, что позволяет измерять содержание примесей в пограничном слое атмосферы, наименее доступном для исследования с больших высот.

Источником зондирующего сигнала при этом является Солнце, излучение которого проходит через атмосферу и, отражаясь от земной поверхности, регистрируется измерительным прибором. Спектральная селекция излучения и, соответственно, конкретной составляющей газовой смеси осуществляется эталонным (корреляционным) газом, заполняющим ячейку газового фильтра внутри радиометра. За счет модуляции оптической толщины ячейки газового фильтра и вычитания сигналов в полупериодах модуляции спектр поглощения корреляционного газа превращается в спектр пропускания фильтра. Такая фильтрация, являющаяся основой метода газокорреляционной радиометрии, позволяет выделить из общего спектра ряда примесей линии только исследуемой

компоненты в заданном для измерений слое атмосферы. При этом на приемнике излучения суммируются сигналы одновременно от множества линий исследуемого газа, что дает существенный выигрыш в чувствительности. Как показывают результаты модельных расчетов, радиометры подобного типа позволяют измерять вариации малых составляющих атмосферы (например, CO и CH_4 [1, 2]) с точностью до единиц процентов от их фонового содержания в свободной атмосфере при времени единичного измерения, составляющем доли секунды.

Высокое быстродействие метода газокорреляционной ИК-радиометрии позволяет осуществлять оперативное картографирование (с высоким разрешением) горизонтального распределения примесей, что дает возможность определения местоположения, мощности, а в ряде случаев и размеров источников загрязнения. Существенное значение имеет построение и использование теоретических моделей процесса распространения примесей и, в частности, аналитических моделей, дающих простую возможность анализа процесса и его зависимости от основных физических параметров системы "атмосфера-подстилающая поверхность". Использование аналитических распределений позволяет также делать обобщенные (с отвлечением от мелких деталей рельефа, поля ветра и т.п.) оценки требований к чувствительности измерительной аппаратуры и параметрам полета для наиболее вероятного обнаружения источников примесей и определения их характеристик.

Аналитическая модель распространения легких примесей была рассмотрена ранее в работах [3, 4] (см. также [5, 6]). Далее рассматривается модель распространения как легких, так и тяжелых примесей. В ней учитываются процессы диффузии, переноса примеси ветром, скорость которого предполагается постоянной по величине и направлению. Принципиальным моментом здесь является дополнительный учет движения примеси в вертикальном направлении под действием силы тяжести. Модель дает возможность нахождения функции распределения содержания примеси в пространстве над поверхностью Земли.

Рассмотрим упрощенное уравнение для концентрации примеси n :

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

где u – скорость ветра, направленная вдоль оси Ox ; u_0 – скорость движения примеси по высоте z ; D – коэффициент диффузии, принятый изотропной и постоянной величиной; Q – мощность источника примеси, расположенного в начале координат; $\delta(\vec{r})$ – дельта-функция радиуса-вектора от источника, расположенного в начале координат.

Добавим следующие граничные и начальные условия

$$\left(D \frac{\partial n}{\partial z} + u_0 n \right)_{z=0, \infty} = 0, \quad n|_{x, y \rightarrow \pm \infty} = 0, \quad n|_{t=0} = 0.$$

Они соответствуют равному нулю потоку примеси на поверхности Земли и началу действия источника в момент времени $t = 0$.

Уравнение (1) с помощью замены

$$n = \tilde{n} \exp(-\gamma t + \alpha x - \beta z), \quad \alpha = \frac{u}{2D}, \quad \beta = \frac{u_0}{2D}, \quad \gamma = D(\alpha^2 + \beta^2),$$

приводится к обычному уравнению диффузии с источником

$$\frac{\partial \tilde{n}}{\partial t} = D \Delta \tilde{n} + Q \delta(\vec{r}) \exp(\gamma t),$$

$$\left(\frac{\partial \tilde{n}}{\partial z} + \beta \tilde{n} \right)_{z=0, \infty} = 0, \quad \tilde{n}|_{x, y \rightarrow \pm \infty} = 0, \quad \tilde{n}|_{t=0} = 0,$$

решение которого легко получить и найти функцию распределения примеси в пространстве

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

где $r^2 = x^2 + y^2 + z^2$.

Если измерительный прибор фиксирует общее содержание примеси в достаточно высоком столбе атмосферы, то наблюдаемой величиной является $N = \int_0^\infty n dz$. Интегрирование концентрации (2) по высоте дает

$$N = \frac{Q \exp(\alpha x)}{4\pi D} \int_0^t \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{4D\tau} - \tilde{\gamma}\tau\right) \frac{d\tau}{\tau}, \quad (3)$$

где $\tilde{\gamma} = \frac{u^2}{4D}$. Видно, что содержание примеси в столбе атмосферы не зависит от скорости u_0 движения в вертикальном направлении.

Формулу (3) можно также получить путем решения следующего уравнения

$$\frac{\partial N}{\partial t} + u \frac{\partial N}{\partial x} = D \Delta_{x,y} N + Q \delta(x) \delta(y), \quad (4)$$

которое следует из (1) после интегрирования по z . В отсутствие ветра функция распределения (3), как и должно быть, является симметричной в горизонтальной плоскости относительно точки положения источника примеси. Уравнение (4) и его решение (3) не изменятся, если источник расположен над поверхностью Земли или распределен в вертикальном направлении.

Интерес представляет стационарное распределение концентрации (3), которое возникает при $t \rightarrow \infty$ и имеет вид

$$N_{st} = \frac{Q \exp(\alpha x)}{2\pi D} K_0[\alpha(x^2 + y^2)^{1/2}], \quad (5)$$

где $K_0(z)$ – модифицированная функция Бесселя, имеющая для больших значений аргумента следующую асимптотику:

$$K_0(z) = \sqrt{\frac{\pi}{2z}} \exp(-z), \quad z \gg 1.$$

При этом стационарное распределение концентрации (5) принимает вид:

$$N_{st} = \frac{Q}{2\sqrt{\pi D u}} \frac{\exp[-\alpha(\sqrt{x^2 + y^2} - x)]}{(x^2 + y^2)^{1/4}}. \quad (6)$$

Остановимся на условиях, при которых справедливо решение (6). Предварительно заметим, что формулу (6) можно также получить, вычисляя интеграл в (3) методом "перевала". Следовательно, текущий момент времени t должен быть больше перевального значения $\tau_0 = \sqrt{x^2 + y^2}/u$. Отсюда $\sqrt{x^2 + y^2} < ut$, т.е. область, в которой формируется стационарное распределение, удалена от фронта распространения примеси. Кроме этого распределение (6) справедливо для больших значений аргумента функции $K_0(z)$, поэтому $\frac{u}{2D} \sqrt{x^2 + y^2} \gg 1$.

Видно, что для малых скоростей ветра последнее условие нарушается. Это вполне понятно, так как при $u = 0$ стационарной функции распределения вообще не существует из-за того, что при действующем источнике примеси отсутствует канал ее отвода. При этом интеграл в (3) для $t \rightarrow \infty$ логарифмически расходится.

Далее обратим внимание на то, что при $y = 0$ функция распределения (6) с ростом x монотонно убывает по закону $x^{-1/2}$. Однако в любой другой плоскости с $y \neq 0$ и параллельной скорости ветра максимум распределения содержания расположен вдали от источника. Рассмотрим формулу (6) в области $y \ll x$. Здесь (6) принимает вид

$$N_{st} = \frac{Q}{2\sqrt{\pi D u x}} \exp\left(-\frac{\alpha y^2}{2x}\right) \quad (7)$$

и для всех фиксированных y имеет максимальное значение при $x = \alpha y^2$. Отметим, что данный максимум содержания можно назвать ложным, так как он не соответствует истинному положению источника загрязнения в точке $(0, 0)$.

При резкой зависимости скорости ветра u и коэффициента диффузии D от высоты необходимо анализировать следующее уравнение для концентрации примеси

$$\frac{\partial n}{\partial t} + u \frac{\partial n}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial z}(u_0 n) = D \Delta_{x,y} n + \frac{\partial}{\partial z} \left(D \frac{\partial n}{\partial z} \right) + Q \delta(\vec{r}) \quad (8)$$

с граничными и начальным условиями к (1).

Для произвольных $u(z)$ и $D(z)$, в отличие от (1), уравнение (8) не допускает аналитического решения. Однако задача резко упрощается, если учесть, что измерительный прибор фиксирует интегральное по высоте содержание примеси. При этом интегрирование (8) по z приводит к уравнению

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\bar{u} N) = \Delta_{x,y} \bar{D} N + Q \delta(x) \delta(y), \quad (9)$$

где введены эффективные по высоте значения скорости ветра и коэффициента диффузии

$$\bar{u} = N^{-1} \int_0^{\infty} u n dz, \quad \bar{D} = N^{-1} \int_0^{\infty} D n dz, \quad (10)$$

которые можно вычислять методом последовательных приближений.

На нулевом шаге данного метода полагаем $u = 0$. Тогда решение стационарного уравнения (8) допускает разделение переменных и приводит к следующему распределению концентрации по высоте:

$$n^{(0)} = n(x, y) \exp\left(-\int_0^z u_0 D^{-1} dz'\right). \quad (11)$$

В первом приближении эффективные значения (10) находятся путем осреднения по функции распределения (11) и являются постоянными величинами. Во втором приближении осреднение в (10) следует проводить по стационарному распределению (2) с учетом найденных значений \bar{u} и \bar{D} на первом шаге и т.д. Поскольку (2) зависит от скорости ветра, то от нее также зависит и эффективный коэффициент диффузии \bar{D} . Отметим, что использование второго и более высоких приближений, на наш взгляд, приведет к превышению точности вычислений по сравнению с точностью задания реального поля скоростей ветра. Поэтому в полученных выше формулах для концентрации примеси под u и D следует понимать их эффективные значения, полученные в первом приближении

$$\bar{u} = C^{-1} \int_0^{\infty} u(z)h(z)dz, \quad \bar{D} = C^{-1} \int_0^{\infty} D(z)h(z)dz,$$

где $C = \int_0^{\infty} h(z)dz$, $h(z) = \exp(-\int_0^z u_0 D^{-1} dz')$.

Таким образом, на основании полученных соотношений можно дать следующие рекомендации к маршруту полета или выборкам из измеренных картограмм распределения примеси для определения координат источника загрязнения. Учитывая, что в любой плоскости $y \neq 0$ существует ложный максимум содержания примеси, для локализации источника загрязнения необходимо сначала найти максимум содержания в любой плоскости, перпендикулярной скорости ветра, а в последующем измерении определить максимум в плоскости, параллельной скорости ветра. Выполнение измерений в другой последовательности может привести к ошибке.

Газокорреляционный радиометр фиксирует массовое содержание примеси (или общее число ее частиц) в вертикальном столбе исследуемого слоя атмосферы с единичной площадью основания. Точность измерений характеризуется некоторым пороговым значением содержания примеси ρ_{nop} . Оно зависит как от собственного шума измерительного прибора, так и от "шума" исследуемого объекта, обусловленного вариациями содержания посторонних газов, а также исследуемого газа выше заданного для измерений слоя атмосферы.

В работе [2] на базе радиационной модели системы "атмосфера – земная поверхность" в диапазоне спектра 2.1 – 2.6 мкм и прямых расчетов отраженного поверхностью солнечного излучения произведены оценки величины ρ_{nop} для случая измерений содержания метана в пограничном слое атмосферы с самолетов. Показано, что точность газокорреляционного метода надирных измерений в данном случае может составлять $\rho_{nop} = 200 - 400 \text{ мг/м}^2$ при поле зрения прибора 2° , альбедо подстилающей поверхности 0.1 – 0.25, зенитных углах Солнца $30^\circ - 70^\circ$ и времени одного измерения 0.5 с.

Используя результаты работы [2] и полученные формулы, можно оценить минимальную мощность источника метана, которую зафиксирует газоанализатор подобного типа. Пусть облако газа в районе источника находится в поле зрения прибора, охватывающего участок поверхности площадью S . Тогда из (5) находим общее число частиц в поле зрения:

$$K = \frac{Q}{2\pi D} \int \int_S \exp(\alpha x) K_0(\alpha \sqrt{x^2 + y^2}) dx dy.$$

Переходя к полярным координатам, получаем

$$K = \frac{Q}{D\alpha^2} \int_0^{\alpha R} K_0(\vartheta) I_0(\vartheta) \vartheta d\vartheta, \quad (12)$$

где R – радиус поля зрения на земной поверхности, $I_0(\vartheta)$ – функция Бесселя, имеющая для больших значений аргумента следующую асимптотику:

$$I_0(\vartheta) \cong \frac{\exp(\vartheta)}{\sqrt{2\pi\vartheta}}, \quad \vartheta \gg 1.$$

Для типичных значений скорости ветра u , турбулентного коэффициента диффузии D и размера R параметр $\alpha R \gg 1$. При этом основной вклад в интеграл (12) дают большие значения ϑ . Учитывая приведенные асимптотики Бесселевых функций, получаем

$$K \cong \frac{QR}{2\alpha D} = \frac{QR}{u}.$$

Сравнивая массовое содержание метана в данном столбе с пороговым значением, находим минимальную мощность источника

$$q_{min} = mQ_{min} = \pi R u \rho_{пор} \approx \phi H u \rho_{пор},$$

где m – масса молекулы метана, ϕ – угол поля зрения прибора, H – высота точки наблюдения.

Используя это соотношение, в качестве примера можно сделать оценку размеров повреждений магистральных газопроводов, обнаружимых методом газокорреляционной ИК-радиометрии с самолетов. Для $H = 100 - 1000$ м, $u = 5$ м/с, $\rho_{пор} = 300$ мг/м³ и $\phi = 2^\circ$ получаем $q_{min} = 5 - 50$ г/с. При давлении метана в трубе газопровода порядка 50 атм и звуковой скорости истечения из отверстия $4 \cdot 10^4$ см/с при $T = 300$ К площадь отверстия составляет величину порядка 10^{-1} см² и 10^{-2} см², если точка наблюдения располагается на высоте 1000 м и 100 м соответственно. Таким образом, с помощью газокорреляционного ИК-радиометра обнаруживаются утечки газа даже из отверстий весьма небольших размеров при высотах точки наблюдения, обеспечивающих широкий охват контролируемой территории.

Данная модель непосредственно обобщается на случай нескольких источников и более сложную динамику атмосферных потоков. В общем случае необходимо моделирование с учетом рельефа местности, поскольку понижения, впадины на местности становятся мощными концентраторами загрязнений. При этом картограмма распределения

примеси коррелирует с картой рельефа местности. Здесь целесообразно использование полуэмпирического подхода, дополняющего модельные данные. Помимо наблюдений с самолетов может быть использована сеть наземных пунктов с дистанционными газоанализаторами. Оптимальное расположение этих пунктов также может быть определено с использованием теоретических моделей, обобщающих рассмотренную в настоящей статье.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант N 01-05-65392).

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Р а н L., E d w a r d s D. P., G i l l e J. C., et al. Appl. Opt., **34**, No. 30, 6976 (1995).
- [2] В и р о л а й н е н Я. А., Д е м е н т ь е в Б. В., И в а н о в В. В.,
П о л я к о в А. В. "Оптимизация параметров газокорреляционного ИК-радиометра для измерения содержания метана в пограничном слое атмосферы с аэрокосмических платформ", Исслед. Земли из космоса, 2002 (в печати).
- [3] И в а н о в В. В., Р е ш е т н я к С. А., Ш е л е п и н Л. А., Щ е г л о в В. А. "Модель стационарного распределения потока газа от наземного источника в пограничном слое атмосферы", Труды VI Международной научно-технической конференции "Оптические методы исследования потоков", Москва, 27 – 29 июня 2001 г., Москва, изд. Московского энергетического института, с. 356 (2001).
- [4] И в а н о в В. В., Р е ш е т н я к С. А., Ш е л е п и н Л. А.,
Щ е г л о в В. А. "О возможностях аэромониторинга наземных источников загрязнения атмосферы методом газокорреляционной ИК-радиометрии", Материалы III Всероссийской научной конференции "Молекулярная физика неравновесных систем", г. Иваново-Плес, 28 мая – 1 июня 2001 г., изд. Ивановского государственного химико-технологического университета, с. 128 (2001).
- [5] У о р к К., У о р н е р С. "Загрязнение воздуха. Источники и контроль", М., Мир, 1980, 539 с.
- [6] Д е т р и Ж. "Атмосфера должна быть чистой. Загрязнение атмосферы и борьба с ними", М., Прогресс, 1979.

Поступила в редакцию 28 марта 2002 г.