

П.Н. Белов, В.С. Комаров

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАДИОНУКЛИДОВ ПРИ ВОЗМОЖНЫХ ПРОМЫШЛЕННЫХ АВАРИЯХ

Излагается траекторная модель переноса примесей в пограничном слое атмосферы. В модели производится учет горизонтального и вертикального турбулентного рассеяния примеси, сухого и влажного ее осаждения на земную поверхность. Модель применима для расчета распространения любой примеси от точечных источников и радионуклидов при возможных аварийных выбросах из хранилищ радиоактивных отходов и на атомных электростанциях (АЭС). Приводятся и анализируются результаты соответствующих расчетов.

Современный этап развития экологических исследований природной среды характеризуется все более усиливающимся вниманием к проблеме оптимального оценивания пространственного распространения вредных загрязняющих веществ, выбрасываемых в атмосферу в результате промышленных аварий. Наибольшую опасность при этом представляют выбросы в атмосферу продуктов атомного распада – радионуклидов (изотопов плутония, цезия, рутения, циркония, ниобия и др. [1]), которые возникают чаще всего при авариях на атомных электростанциях (АЭС), на радиохимических заводах и хранилищах радиоактивных отходов. Важным отличием этих аварий является возможность выхода радионуклидов в атмосферу в виде залповых выбросов, как, например, во время аварий на Чернобыльской АЭС 26 апреля 1986 г. [2, 3] и на Сибирском радиохимическом заводе в г. Томске-7 6 апреля 1993 г. [4].

Поскольку существующая сеть экологических станций из-за своей малой плотности не позволяет осуществлять на требуемом уровне мониторинг атмосферных загрязнений, то для обеспечения экологической безопасности необходимо уметь рассчитывать распространение примесей от мест выбросов (источников) и их концентрацию в разных точках пространства. С этой целью обычно используются различные теоретические модели переноса примесей, реализуемые с помощью ЭВМ (см. например, [5, 6]). В настоящей статье рассматривается одна из подобных моделей, а именно траекторная модель переноса примесей.

Уравнение модели для пограничного слоя атмосферы получается путем интегрирования по высоте от $z = 0$ до $z = H$ (высота пограничного слоя) уравнения переноса примеси [5 – 7]

$$\frac{\partial s}{\partial t} = u \frac{\partial s}{\partial x} + v \frac{\partial s}{\partial y} + w \frac{\partial s}{\partial z} + \frac{\partial w_a s}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} k_1 \frac{\partial s}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} k_1 \frac{\partial s}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} k \frac{\partial s}{\partial z} + \varepsilon_a \quad (1)$$

при условиях на границах:

$$\begin{aligned} \text{при } z = 0 \quad (z = z_0) \quad k \frac{\partial s}{\partial z} - w_a s &= \beta s - f_0, \\ \text{при } z = H \quad (H_1) \quad w &= w_H, \quad k = k_H, \end{aligned} \quad (2)$$

где s – объемная концентрация примеси; w_a – собственная вертикальная скорость примеси a ; β – скорость сухого поглощения примеси земной поверхностью; k_1 – коэффициент турбулентности при перемещениях по горизонтали; k – коэффициент турбулентности при перемещениях по вертикали; k_H и w_a – коэффициент турбулентности и вертикальная скорость воздуха на высоте $z = H$; ε_a – скорость образования или уничтожения примеси в пограничном слое, обусловленная выбросом примеси источниками в слое, выпадением примеси с атмосферными осадками и химическими превращениями; f_0 – скорость выброса примеси в атмосферу наземными источниками.

В результате интегрирования уравнения переноса примеси (1) с учетом граничных условий (2) после введения средних для пограничного слоя величин по соотношениям вида

$$\bar{s} = \frac{1}{H} \int_0^H s(z) dz, \quad \bar{u} = \frac{1}{H} \int_0^H u(z) dz, \quad \bar{\varepsilon}_a = \frac{1}{H} \int_0^H \varepsilon_a(z) dz \text{ и т.д.}$$

получаем следующее уравнение модели для пограничного слоя (черта сверху у усредненных по слою величин опущена):

$$\frac{\partial s}{\partial t} + u \frac{\partial s}{\partial x} + v \frac{\partial s}{\partial y} = -\sigma s + \frac{\partial}{\partial x} k \frac{\partial s}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} k \frac{\partial s}{\partial y} + \varphi, \quad (3)$$

где

$$\varepsilon_a = F - \sigma_2 s - \sigma_3 s;$$

$$\varphi = \varphi(x, y, t) = F(x, y, t) + \frac{1}{H} f_0(x, y, t);$$

$$\sigma = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 + \sigma_4 + \sigma_5 + \sigma_6;$$

F – скорость выброса примеси высотными источниками; $\sigma_1 = \alpha_0 \beta / H$; $\sigma_2 = \alpha^* I$, I – интенсивность осадков; α^* – коэффициент; σ_3 – коэффициент, с помощью которого учитываются химические превращения примесей.

$$\sigma_4 = (\alpha_0 - \alpha_H) k_H / H^2; \quad \sigma_5 = \alpha_H w_H / H; \quad \sigma_6 = \alpha_H w_a / H$$

($\alpha_0 = s_0 / s$; $\alpha_H = s_H / s$, где s_0 и s_H – значения s при $z = 0$ и $z = H$) – полуэмпирические коэффициенты, определяемые на основе данных о вертикальном профиле загрязнений.

В зависимости от мощности источников примеси, а также от метеорологических условий интегрирование уравнения (3) производится во внутреннем (приземном) пограничном слое (ВПС) высотой $H = H_1 = 0,1 k_{1m} / l$ при малых мощностях выброса, либо в планетарном пограничном слое (ППС) высотой $H = \text{ВСП}$, определяемой согласно теории ППС по соотношению $H = 0,2 V_* / l$ [8] (или $\text{ВСП} = k_{1m} / l$) при значительных мощностях источников. Здесь ВСП – высота слоя перемешивания, $l = 2 \omega \sin \varphi$ – параметр Кориолиса, k_{1m} – коэффициент турбулентности на высоте 1 м от земной поверхности, V_* – динамическая скорость.

Параметры ВПС при наличии измерений скорости ветра на уровне z_1 (высота флюгера 10 – 12 м) согласно теории определяются по соотношениям (для стратификации, близкой к безразличной):

$$V_* = V(z_1) k / [\ln(z_1 + z_0) / z_0]; \quad V(z) = (V_* / k) \ln[(z + z_0) / z_0],$$

$$k = k(z) = k_2 + a z, \quad k_2 = k V_* z_0, \quad \bar{V} = \frac{V_k}{k} \ln\left(\frac{H_1}{z_0} - 1\right), \quad (4)$$

где $k = 0,40$ – постоянная Кармана; z_0 – параметр шероховатости. При этом во внутреннем пограничном слое направление ветра считается неизменным. Расчет распространения примесей в случае ВПС производится на близкие (порядка 100 км) расстояния (локальная модель).

При значительных мощностях источников в качестве пограничного слоя принимается ППС. Изменения скорости и направления ветра в этом слое определяются по теории планетарного пограничного слоя и по значению геострофического ветра [9]. Расчет распространения примесей в этом случае производится на дальние (порядка 1 тыс. км) расстояния (региональная модель) при одновременном определении траектории частиц от источников [6].

В обоих случаях мощность источников за время интегрирования считается неизменной.

Примеры расчета переноса примеси на близкие расстояния

Модель распространения примеси в ВПС была реализована с целью оценки уровня загрязнения воздуха на близких расстояниях (до 100 км) от единичного наземного источника, который, в частности, можно интерпретировать и как выбросы из наземных хранилищ ядерных отходов фик-

сированной мощности. При этом производилась оценка влияния различных параметров модели на концентрацию примеси (примесь может быть любой, в том числе и радиоактивной).

При интегрировании уравнения (3) принималось условие стационарности процесса ($\partial s / \partial t = 0, f_0 = \text{const}$); скорость ветра задавалась на уровне флюгера. Уравнение (3) в этом случае при направлении оси x вдоль вектора принимает вид

$$u \frac{\partial s}{\partial x} = -\sigma s + \frac{\partial}{\partial y} k_1 \frac{\partial s}{\partial y} + \varphi. \quad (5)$$

Решение этого уравнения подобно тому, как это было предложено М.Е. Берляндом [3], запишем в виде

$$s(x, y) = P(x, y) s'(x). \quad (6)$$

Для переменных P и s' получаем уравнения:

$$\frac{\partial P}{\partial x} = \frac{k_1}{u} \frac{\partial^2 P}{\partial y^2}, \quad u \frac{\partial s'}{\partial x} = -\sigma s' + \frac{\varphi}{P}. \quad (7)$$

Можно убедиться, что решение первого из этих уравнений при $k = a^2 u x$ и при условии, что $P \rightarrow 0$ при $y \rightarrow \pm \infty$, имеет вид

$$P(x, y) = (1/\sqrt{2\pi\sigma_y}) \exp(-y^2 / 2\sigma_y^2) \quad (8)$$

при $\sigma_y = a x$ ($a \approx 10^{-1} - 10^{-2}$),

а второго из них –

$$s'(x) = \exp\left(-\frac{\sigma}{u} x\right) \left(s'^0 + \int_0^x \exp\left(-\frac{\sigma}{u} x'\right) \frac{\varphi x'}{u P} dx' \right), \quad (9)$$

где s'^0 – значение s' при $x = 0$, $s'^0 = s^0 / P(0)$, s^0 значение s при $x = 0$.

В табл. 1 приведены результаты расчетов концентрации примеси на расстоянии до 100 км от наземного точечного источника мощностью $f = 0,2 \cdot 10^{-3}$ г/(м² · с) при различных параметрах модели: $V(z_1)$, z_0 , $s^0 = f_0 d / \bar{V} H_1$, где $d = \Delta y$, $\sigma_y = 0,01 x$ и $0,1 x$. Из данных таблицы хорошо видно, каким образом изменяется концентрация примеси в зависимости от указанных параметров.

Таблица 1

Концентрация примеси (мкг/м³) в единичном столбе воздуха во внутреннем пограничном слое высотой H_1 на оси <факела> при различных удалениях x от точечного наземного источника с интенсивностью выброса примеси вверх $f_0 = 10^{-3} \cdot 0,2$ г/(м² · с) при различных значениях параметров модели

Значения параметров							x, км				
V_1 , м/с	z_0 , м	V^* , м/с	H_1 , м	\bar{V} , м/с	s^0 , мкг/м ³	σ_y	0,1	1	10	50	100
5	0,1	0,40	14	4,2	3420	0,01 x	1340	116	2,5	0	0
						0,1 x	134	12	0,1	0	0
	0,5	0,61	167	7,1	169	0,01 x	68	7	0,6	0	0
						0,1 x	7	0,7	0,1	0	0
10	0,1	0,81	29	9,8	702	0,01 x	279	27	2	0,1	0
						0,1 x	28	2,7	0,2	0	0
	0,5	1,21	234	16,4	52	0,01 x	21	2,1	0,2	0	0
						0,1 x	2,1	0,2	0	0	0

Модель расчета переноса примесей на близкие расстояния (локальная модель) была применена для оценки распространения радиоактивности зараженного радионуклидами воздуха при аварии на Сибирском химическом комбинате в г. Томск-7 (в настоящее время г. Северск) 6 апреля 1993 года [4]. При этих расчетах предполагалось, что распространение и рассеяние радионуклидов, попавших в воздух при аварии, происходит так же, как и любой другой неветерообразной примеси.

По данным метеорологических наблюдений в районе г. Томска в момент аварии скорость юго-восточного ветра на уровне флюгера составляла 5 м/с; выпал небольшой дождь со снегом. При расчетах принималось, что $z_0 = 0,5$ м (что соответствует пересеченной местности с невысокими деревьями и строениями), $\beta = 1$ см/с. По расчетам высота ВПС H_1 составила 109 м. При этом процесс в течение суток считался стационарным.

В табл. 2 приведены рассчитанные по модели значения мощности дозы гамма-излучения (мкР/ч) [1] в единичном столбе воздуха ВПС высотой 109 м на оси <факела> при различных расстояниях от точки аварии (г. Северск) в направлении на северо-восток при мощности дозы излучения в зоне аварии $J_0 = 1100$ мкР/ч при учете турбулентности, рассеяния, поглощения поверхностью и выпадения примеси с осадками.

Таблица 2

Мощность дозы гамма-излучения

x, км	0	0,5	1	5	10	20	50	100
J, мкР/ч	1100	730	360	69	32	14,3	3,8	1,0

Из данных таблицы следует, что радиоактивность воздуха во внутреннем пограничном слое быстро убывает при удалении от точки аварии. Так, на расстоянии 1 км от источника радиоактивность составила около 360 мкР/ч или 33% от начальной радиоактивности, а на расстоянии 20 км – 14,3 мкР/ч или 1,3%; на расстоянии 100 км имели место лишь следы радиоактивности (1 мкР/ч или 0,1% от первоначального значения).

Значения радиоактивности, превышающие 12 мкР/ч (величина естественного фона земной поверхности), отмечаются по расчетам на расстояниях до 22 км от точки аварии. Радиоактивность быстро убывает по нормали к осевой линии <факела>. Например, при $x = 10$ км на расстоянии 0,2 км от оси <факела> радиоактивность составляет около 10% от ее значения на оси <факела>.

Рассчитанные по модели величины мощности дозы гамма-излучения не противоречат данным аэроземки, приведенным в [4].

Пример расчета переноса примеси на дальние расстояния

Модель дальнего переноса примеси от единичных источников является траекторной [6, 10], поэтому вначале рассчитываются траектории частиц от источников, а затем интегрируется уравнение переноса примеси на срок до 24 ч с шагом по времени, равным 2 ч.

Расчет средних величин ветра в планетарном пограничном слое производится по теории ППС [8] с учетом изменения ветра с высотой. Траектории рассчитываются для движущихся объемов воздуха в ППС. Интегрирование уравнения переноса производится вдоль траектории. В каждой точке траектории ось x направляется вдоль траектории, а ось y – по нормали к ней, поэтому уравнение переноса примеси записывается в виде

$$\frac{d_r s}{dt} = -\sigma s + k_0 u \frac{\partial^2 s}{\partial y^2} + \varphi, \quad (10)$$

где $\frac{\partial_r s}{\partial t} = \frac{\partial s}{\partial t} + u \frac{\partial s}{\partial x}$ – индивидуальная производная при движении вдоль траектории r ;
 $k_0 = k_1 / u$ – постоянная.

Решение ищется в виде

$$s(x, y, t) = P(x, y) \cdot s'(x, t).$$

Для функции P и s' получаем уравнение

$$\frac{\partial P}{\partial x} = k_0 \frac{\partial^2 P}{\partial y^2}, \quad \frac{d_r s'}{dt} = -\sigma s + \frac{\phi}{P}.$$

Решение уравнения для P имеет вид [3]

$$P(x, y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi k_0 x}} \exp(-y^2 / 4 k_0 x). \quad (11)$$

Уравнение же для s' решается численно путем замены интегрирования по времени интегрированием по траектории. Аппроксимируем это уравнение следующим образом:

$$s'^{(n)} = s'^{(n-1)} - \Delta t \sigma s'^{(n, n-1)} + \Delta t \frac{1}{P} \phi^{(n, n-1)}, \quad (12)$$

где n – номер шага по времени ($n = 1, 2, \dots$); $s'^{(n-1)}$ – значение s' в момент времени $(n-1)$, а s'^n – в последующий момент времени n . Эти моменты соответствуют начальной и конечной точке траектории в течение шага по времени Δt .

Функции $\sigma s'^{(n, n-1)}$ и $(1/P) \phi^{(n, n-1)}$ – средние значения $\sigma s'$ и $(1/P) \phi$ на траектории за данный шаг по времени. Эти средние величины могут быть представлены двумя схемами:

явная схема:

$$\overline{\sigma s'^{(n, n-1)}} = \sigma s'^{(n-1)}, \quad \overline{\frac{1}{P} \phi^{(n, n-1)}} = \frac{1}{P} \phi^{(n-1)},$$

неявная схема:

$$\overline{\sigma s'^{(n, n-1)}} = \frac{1}{2} [\sigma s'^{(n)} + \sigma s'^{(n-1)}], \quad \overline{\frac{1}{P} \phi^{(n, n-1)}} = \frac{1}{2} \left[\frac{1}{P} \phi^n + \frac{1}{P} \phi^{n-1} \right].$$

Тогда для значения s'^n в конце шага будет иметь:

по явной схеме:

$$s'^{(n)} = (1 - \sigma \Delta t) s'^{(n-1)} + \Delta t \frac{1}{P} \phi^{n-1},$$

по неявной схеме:

$$s'^{(n)} = \frac{1 - \sigma \Delta t / 2}{1 + \sigma \Delta t / 2} s'^{(n-1)} + \frac{\Delta t / 2}{1 + \sigma \Delta t / 2} \left[\frac{\phi^n}{P} + \frac{\phi^{n-1}}{P} \right].$$

Полученные выражения при условии, что траектория движения на каждом шаге известна, дают решение поставленной задачи. Испытания двух схем интегрирования показали, что неявная схема интегрирования имеет преимущества. Заметим еще, что функция $P(x, y)$ описывает распределение примеси вдоль осей x и y от точечного источника (в м^{-1}), а функция $s'(x, t)$ – распределение примеси от бесконечного линейного источника, находящегося на оси (в $\text{кг} \cdot \text{м}^2$).

Рассмотрим пример расчета переноса примеси. В табл. 3 приведены значения концентрации условной примеси в ППС вдоль траектории через каждые 2 ч (до 24 ч) на оси <факела> и на расстоянии 1 км от оси. Значение концентрации условной примеси s^0 в точке выброса было принято равным 1000 мкг/м^3 .

Расчеты производились при отсутствии вертикальных движений и при вертикальной скорости на верхней границе ППС $w_H = 0,5 \text{ см/с}$. Из табл. 3 хорошо видно, что концентрация примеси быстро уменьшается с увеличением расстояния от точки выброса. Так, через 2 ч от начала движения частиц на расстоянии около 70 км от точки выброса концентрация примеси равнялась $1,42 \text{ мкг/м}^3$, что составляло 0,14% от первоначальной концентрации. Восходящие движения на верхней границе ППС уменьшают концентрацию в ППС, так как переносят часть примеси в верхние слои атмосферы.

Концентрация примеси ($\text{мкг}/\text{м}^3$) в единичном столбе воздуха ППС высотой 980 м при различных удалениях по траектории от наземного точечного мгновенного источника при различных параметрах модели ($s^0 = 1000 \text{ мкг}/\text{м}$)

Значения параметров, см/с		$t, \text{ч}$				
		2	6	12	18	24
		$x, \text{км}$				
β	w_H	70	201	434	690	997
на оси <факела>						
1	0	1,42	0,74	0,42	0,28	0,20
0	0	1,51	0,89	0,61	0,48	0,40
1	+ 0,5	1,41	0,73	0,41	0,27	0,18
1 км от оси<факела>						
1	0	0,04	0,21	0,24	0,19	0,15

Таковы результаты использования траекторной модели в задаче численного оценивания переноса примеси на дальние расстояния.

1. Политехнический словарь. / М.: Советская энциклопедия. 1989. 656 с.
2. Израэль Ю. А., Петров В. Н., Северов Д. А. // Метеорология и гидрология. 1989. №6. С. 5 – 14.
3. Чернобыль: радиоактивное загрязнение природных сред / Израэль Ю. А. и др. / Л.: Гидрометеиздат, 1990. 296 с.
4. Израэль Ю. А., Артемов Е. Н., Назаров И. М. и др. // Метеорология и гидрология. 1993. №6. С. 1275.
5. Берлянд М. Е. Прогноз и регулирование загрязнения атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1985. 272 с.
6. Белов П. Н., Комаров В. С. // Оптика атмосферы и океана. 1994. Т. 7. № 2. 1994. С. 195 – 203.
7. Environmental pollution monitoring and research program. N 49. Technical document WMO/TD N 187. September. 1987. 543 p.
8. Пановский Г. А. // Динамика погоды. Л.: Гидрометеиздат, 1988. 420 с.
9. Белов П. Н., Борисенков Е. П., Панин Б. Д. Численные методы прогноза погоды. Л.: Гидрометеиздат, 1989. 316 с.
10. Борзилов В. А., Клепикова Н. В., Костриков А. А. // Метеорология и гидрология. 1989. № 11. С. 5 – 11.

Институт оптики атмосферы СО РАН, Томск
Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова

Поступила в редакцию
29 декабря 1994 г.

P. N. Belov, V. S. Komarov. Simulation of Radionuclides Propagation in Case of Possible Emergency.

A trajectory model of pollutants transfer inside ground atmospheric layer is described. Horizontal and vertical turbulent scatter of impurities, as well as dry and moist fallout of them on the Earth surface are taken into account by the model. The model can be usable for calculation of any type of impurity propagated from a point source as well as radionuclides propagation in the case of emergency at radioactive wastes stores or atomic power stations. The corresponding calculative results are presented and analysed.