

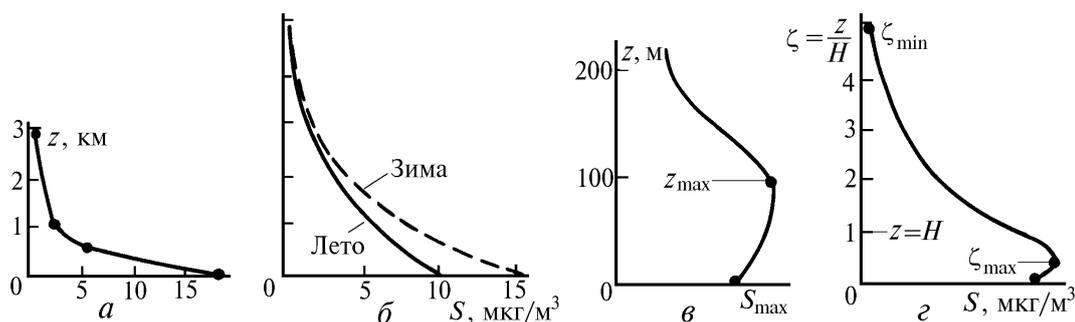
П.Н. Белов, В.С. Комаров

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПЕРЕНОСА ПРИМЕСЕЙ ИЗ ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ В ВЕРХНИЕ СЛОИ АТМОСФЕРЫ

Предлагается методика расчета распространения примесей из пограничного слоя в вышележащие слои атмосферы. Существенным моментом этой методики является гипотеза о вертикальном профиле примесей в нижней половине атмосферы (до высоты примерно 5 км). Приводятся результаты расчета изменений концентрации примесей под влиянием этого переноса.

Для расчета распределения примесей в атмосфере по какой-либо многоуровневой численной модели необходимы данные об их концентрации в некоторый начальный момент времени. Между тем таких данных не существует, и нет надежды на их получение в обозримом будущем. В связи с этим распределение в заданный момент времени необходимо представить в виде какой-либо модели. Такая модель нужна и при реализации однослойной схемы переноса примесей, ибо в ней существенным моментом являются граничные условия на верхней границе слоя, например на верхней границе планетарного пограничного слоя атмосферы (ППС). В атмосфере всегда существуют механизмы переноса примесей из самых нижних слоев атмосферы в ее высокие слои. Например, радионуклиды, выброшенные у самой земной поверхности при аварии на Сибирском химическом комбинате в г. Томск-7, были обнаружены в верхних слоях атмосферы в Швеции [6].

Пространственное распределение примесей является весьма сложным. Оно определяется многими факторами, такими как нахождение источников примесей, которые практически все находятся вблизи земной поверхности, горизонтальными и вертикальными движениями воздуха, стратификацией атмосферы и др. Трудности заключаются еще и в практическом отсутствии измерений концентрации примесей в самой атмосфере, они производятся у земной поверхности. Имеется лишь небольшое число измерений концентрации примесей на самолетах, а также на высотных башнях. На рис. 1, а, б приводятся примеры распределений концентрации сернистого газа до высоты 5 км [5, 8, 9].



Вертикальные профили концентрации примесей: а – по самолетным измерениям над территорией Венгрии [8]; б – по самолетным измерениям над территорией Германии [8]; в – над Москвой [5]; z – по предлагаемой методике в виде кривой третьей степени ($\zeta = z/H$, $H = \text{ВСП}$, ζ_{\max} – относительная высота с максимальным значением концентрации в ППС)

Из этих же примеров можно сделать предварительный вывод о том, что вертикальный профиль концентрации примесей может быть описан с помощью экспоненциальных функций вида $s(z) = s_0 e^{-\gamma z}$, где s_0 – концентрация у земной поверхности; γ – параметр.

Видимо, такой тип распределения можно признать справедливым для некоторых усредненных условий, при которых все источники примесей находились бы непосредственно на земной поверхности. Однако наиболее крупные выбросы примесей осуществляются промышленными комплексами, у которых устья труб находятся на некоторой высоте z_{\max} . На этой высоте и должен находиться уровень с максимальным значением концентрации. Именно при таком распределении возможен турбулентный перенос примесей непосредственно к земле (член $k\partial s/\partial z$) в граничном условии у земной поверхности [3], а следовательно, и процесс сухого поглощения примеси земной поверхностью (член βs [3]).

Исходя из этих соображений, предлагается модель вертикального профиля концентрации примеси с ее максимумом на высоте z_{\max} и с дальнейшим убыванием вверх примерно по профилю экспоненциальной функции. Сказанному удовлетворяет полином третьей степени вида

$$s(z) = s(\zeta) = s_0 + a_1\zeta + a_2\zeta^2 + a_3\zeta^3, \quad (1)$$

$\zeta = z/H$, H – заданная высота (далее она принимается равной высоте слоя перемешивания – ВСП [7] или высоте ППС). Коэффициенты $a_1 - a_3$ находятся исходя из следующих условий:

1) известно отношение концентраций на некоторой высоте H_5 (далее принимается, что $H_5 = 5H$, примерно 5 км) к концентрации у земной поверхности s_0 , т.е. известно отношение $\alpha_s = s_{5H}/s_0$; на основании данных, приведенных в [8], можно принять, что $\alpha_s = 0,1$; это означает, что ниже этой высоты H_5 содержится 90% всей массы примесей;

2) известен уровень с максимальным в ППС значением концентрации $z_{\max}(\zeta_{\max})$; принимается, что этот уровень определяется высотами устьев труб, через которые производится основной объем выбросов; очевидно, что на этом уровне $\partial s/\partial z = \partial s/\partial \zeta = 0$;

3) на высоте H_5 имеет место минимальная концентрация примеси; следовательно, на этом уровне $\partial s/\partial \zeta = 0$ (при этом распределение примеси выше этого уровня не рассматривается).

Используя эти три условия, составляем систему из трех уравнений, решая которую находим коэффициенты уравнения (1), т.е. числа a_1, a_2, a_3 . При этом число s_0 не фиксируется; оно входит в найденные коэффициенты в качестве параметра.

Зная эти коэффициенты, можно определить с помощью (1) значение концентрации на любом уровне $z(\zeta)$, выраженное через пока произвольное число s_0 , в том числе определить s_H – концентрацию на высоте $z = H$. Дифференцируя (1) по $z(\zeta)$, получаем необходимые для дальнейшего производные

$$\partial s/\partial z = (1/H)(\partial s/\partial \zeta) = (1/H)(a_1 + 2a_2\zeta + 3a_3\zeta^2). \quad (2)$$

Проинтегрировав соотношение (1) по z от $z = 0$ до $z = H$, получаем среднюю концентрацию примеси в слое $0 - H$

$$\bar{s} = (1/H) \int_0^H s(z) dz = s_0 + \frac{a_1}{2} H + \frac{a_2}{3} H^2 + \frac{a_3}{4} H^3. \quad (3)$$

Теперь можно получить и значения коэффициентов $\alpha_0 = s_0/s$ и $\alpha_H = s_H/s$.

На рис. 1, z приведен схематично вертикальный профиль концентрации примеси согласно изложенным положениям.

После этих важных для дальнейшего сведений перейдем непосредственно к однослойной траекторной модели переноса примеси в пограничном слое атмосферы [1–3], в которую вводится учет вертикального переноса примеси через верхнюю границу ППС – H в вышележащие слои атмосферы.

Уравнение для усредненной по ППС примеси \bar{s} запишем при условии направления оси x вдоль траектории частиц, которая определена заранее [2], в виде [9]

$$\frac{\partial \bar{s}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{s}}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial y} k_y \frac{\partial \bar{s}}{\partial y} + \sigma \bar{s} = \bar{\varphi}, \quad (4)$$

где $\varphi = \varphi(x, t) = F - (1/H)f$; F – приток примеси в атмосферу от высотных источников; f – поток примеси вверх от наземных площадных источников (например, от автотранспорта); предпола-

гаются учет источников, находящихся только в зоне траектории частиц. В этом уравнении член σs (черта сверху далее опускается) представим в виде

$$\sigma s = \sigma_1 s + \sigma_2 s + \sigma_3 s + \sigma_4 s + \sigma_5 s + \sigma_6 s. \quad (5)$$

Члены $\sigma_1 s$ и $\sigma_2 s$ описывают процессы сухого осаждения примесей на земную поверхность и выведения примесей из атмосферы осадками, член $\sigma_3 s$ описывает процессы химических превращений примесей, член $\sigma_6 s$ учитывает выпадение тяжелых примесей. Все эти процессы далее не обсуждаются.

Здесь же рассмотрим члены $\sigma_4 s$ и $\sigma_5 s$, описывающие вертикальный перенос примеси через горизонтальную поверхность $z = H$, т.е. перенос примеси между ППС и вышележащими слоями воздуха путем турбулентного обмена и вертикальных движений.

При выводе уравнения (4), исходя из основного (неусредненного) уравнения переноса примеси при граничных условиях $z = 0$ и $z = H$ [3], для параметров $\sigma_4 s$ и $\sigma_5 s$ получены следующие выражения:

$$\sigma_4 = \frac{1}{H} \left. \frac{\partial s}{\partial z} \right|_H k_H, \quad \sigma_5 = \frac{1}{H} \left. \frac{\partial s}{\partial z} \right|_H w_H, \quad (6)$$

где k_H и w_H – коэффициенты турбулентности и вертикальная скорость на уровне $z = H$. Под вертикальной скоростью здесь понимаются крупномасштабные упорядоченные вертикальные движения, определяемые из основной системы уравнений гидротермодинамики, и орографические движения, рассчитанные по специальной методике, изложенной, например, в [1]. Конвективные вертикальные движения здесь не учитываются.

Входящая в соотношение (6) производная $\partial s / \partial z | H$ находится с помощью соотношения (2). При этом величина s_0 , связанная с величиной s соотношением (3), войдет в качестве параметра.

Так как при $z = H$ согласно рис. 1, $\partial s / \partial z > 0$, то при $k_H > 0$ концентрация примеси в ППС под влиянием этого фактора будет уменьшаться, а в вышележащих слоях – увеличиваться, т.е. здесь происходит перенос примеси вверх.

Член $\sigma_5 s$ будет приводить к уменьшению примеси, т.е. к переносу примеси из ППС в верхние слои только при восходящих вертикальных движениях ($w_H > 0$).

Обратимся теперь к решению уравнения (4) с целью получения формул для расчетов изменений концентраций примеси за счет этих двух факторов. Будем рассматривать стационарный процесс ($\partial s / \partial t = 0$) при известном значении коэффициента k_y .

Решение этого уравнения получим при условиях, что $u = \text{const}$, что все источники примеси находятся вдоль траектории движения частиц (которая была определена ранее независимо), и при условиях, что

$$s \rightarrow 0 \text{ при } x \rightarrow \infty \text{ и } y \rightarrow \pm\infty, \quad s = s_0 \text{ при } x = y = 0. \quad (7)$$

Полученное решение запишем в виде.

$$s(x, y) = P(x, y) \exp\left(-\frac{\sigma}{u} x\right) \left(s'_0 + \int_0^x \left[\exp\left(\frac{\sigma}{u}\right) \right] x' \frac{\varphi(x')}{uP} dx' \right), \quad (8)$$

где $s'_0 = s_0 l_1$ (l_1 – единица длины);

$$P(x, y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_y} \exp(-y^2 / 2\sigma_y^2), \quad (9)$$

$\sigma_y = ax$ (a – коэффициент, имеющий значение порядка 10^{-2}). Для коэффициента k_y при выводе решения (8) было принято $k_y = a^2 u x$.

Для количественной оценки вклада в перенос примеси через поверхность $z = H$ указанных двух факторов, т.е. членов $\sigma_4 s$ и $\sigma_5 s$, в решении (8) примем, что

$$\sigma = \sigma_4 + \sigma_5 = \frac{1}{H} \left. \frac{\partial s}{\partial z} \right|_H k_H + \frac{1}{H} \left. \frac{\partial s}{\partial z} \right|_H w_H$$

и что $\varphi(x') = 0$. Тогда решение (7) при условии, что $x = y = 0s = s_0$, для оси «факела» ($y = 0$) примет вид

$$s(x) = s_0 \frac{l_1}{\sqrt{2\pi} \sigma_y} \exp\left(-\frac{\sigma_4}{u} x\right) \exp\left(-\frac{\sigma_5}{u} x\right). \quad (10)$$

В таблице приведены рассчитанные с помощью (10) относительные величины уменьшения концентрации примеси в ППС под влиянием турбулентного обмена и восходящих вертикальных движений. Как следует из данных таблицы, вклад указанных факторов в изменение концентрации примеси при расстояниях до 200 км от источника является значительным. При этом вклад вертикальных движений превышает вклад турбулентного обмена. Уменьшение концентрации примеси в ППС сопровождается ее увеличением в вышележащих слоях атмосферы.

Относительное уменьшение концентрации примеси в ППС ($s(x)/s_0$, %) при различных расстояниях от единичного источника под влиянием турбулентного обмена (член $\sigma_4 s$) и вертикальных восходящих движений (член $\sigma_5 s$) ($u = 10$ м/с, $k_h = 10$ м²/с, $w_H = 5$ см/с)

x , км	36	72	196	392	784
t , ч	1	2	6	12	24
$\sigma_4 s$	70	49	14	2	0,1
$\sigma_5 s$	84	70	38	16	2

1. Белов П. Н. Учет орографии в траекторной модели переноса примеси в пограничном слое атмосферы // Метеорология и гидрология. 1983. N 9. С. 14–19.
2. Белов П. Н., Карлова З. Л. Траекторная модель переноса загрязнителя // Метеорология и гидрология. 1990. N 12. С. 67–74.
3. Белов П. Н., Комаров В. С. Теоретическая модель переноса примесей в пограничном слое атмосферы // Оптика атмосферы и океана. 1994. Т. 7. N 2. С. 195–203.
4. Берлянд М. Е. Прогноз и регулирование загрязнений атмосферы. Л.: Гидрометеоздат, 1985. 272 с.
5. Ежегодник состояния загрязнения воздуха и выбросов вредных веществ в атмосферу городов и промышленных центров Советского Союза. 1984. Т. 1. Л.: ГГО, 1985. 355 с.
6. Известия. 8 апреля 1993, 17 апреля 1993, 20 апреля 1993 г.
7. Климатические характеристики условий распространения примесей в атмосфере. Л.: Гидрометеоздат, 1983. 328 с.
8. Мониторинг трансграничного переноса загрязняющих воздух веществ. Л.: Гидрометеоздат, 1987. 303 с.
9. Ровинский Ф. Е. и др. Озон, окислы азота и серы в нижней атмосфере. Л.: Гидрометеоздат, 1986. 183 с.

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

Поступила в редакцию
18 декабря 1995 г.

P. N. Belov, V. S. Komarov. Theoretical Model of Admixtures Transportation from Boundary Layer into Upper Layers of the Atmosphere.

A procedure is proposed for calculation of the admixtures transportation from the boundary atmospheric layer into upper layers. An important point of the procedure is the hypothesis on the vertical profile of the admixtures within lower atmosphere (to 5 km). The results of calculation of the admixtures concentration variations caused by the transportation are presented.