

П.Н. Белов, В.С. Комаров

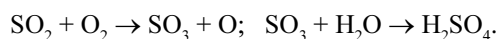
ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПЕРЕНОСА ПРИМЕСЕЙ В ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ АТМОСФЕРЫ

Рассматривается однослойная модель переноса примесей в пограничном слое атмосферы. Модель применяется для расчета распространения различных примесей на дальние (порядка 1000 км) и близкие (порядка 50 км) расстояния (региональная и локальная модели). Приводятся и обсуждаются примеры расчетов по моделям.

1. Введение

В результате производственной и жизненной деятельности общества в атмосферу <выбрасывается> большое количество газообразных (например, окись углерода – CO) и твердых (например, сажа) веществ [8, 9]. Испарение и выветривание приводит к тому, что часть <отходов> производства, выбрасываемых на земную поверхность и в водоемы, также попадает в атмосферу. В значительных объемах в атмосферу выбрасываются и продукты вулканических извержений.

Все это приводит к изменению состава атмосферы [7–9], все более значительную часть которой стали составлять атмосферные примеси антропогенного и естественного происхождения. В атмосфере примеси вступают в химические реакции с естественными составляющими воздуха (кислород O₂, вода H₂O и др.), а также между собой, образуя новые вещества. Например, сернистый газ SO₂, вступая в реакции с кислородом, а затем с водой, превращается в серную кислоту, что можно описать с помощью реакций:



Часть атмосферных примесей и особенно образующиеся в результате химической реакции кислоты являются губительными для живого и растительного мира (гибнет рыба, засыхают леса), для железобетонных конструкций (в кислотах металл растворяется) и вредными для здоровья человека.

Атмосферная диффузия (турбулентность) приводит к быстрому распространению примесей вблизи их источников, а воздушные потоки <переносят> примеси за многие сотни и тысячи километров. Для разработки мероприятий по предотвращению последствий загрязнения атмосферы примесями необходимо уметь рассчитывать их распространение на различные расстояния. Этой проблеме и посвящена данная статья.

2. Постановка задачи о расчете распространения примесей

Широкое распространение получили два основных подхода решения указанной задачи: статистический и гидродинамический [1 – 6, 11, 13 – 15]. Далее рассматривается только гидродинамический подход.

Основу гидродинамического подхода составляет уравнение переноса (баланса) примесей, которое возьмем в виде

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

где s – концентрация какой-либо примеси a ; $\varepsilon_a = \varepsilon_a(x, y, z, t)$ – источник (сток) этой примеси, т.е. скорость ее возникновения (уничтожения) в единице объема; k_x, k_y, k – коэффициенты тур-

булентности, соответствующие осям x, y, z ; w_a – собственная вертикальная скорость примеси.

В уравнение (1) кроме величины s входят составляющие скорости воздуха u, v, w , которые могут быть определены независимо от s либо с помощью измерений, либо путем решения уравнений гидротермодинамики. В данной статье считается, что u, v, w уже определены. Будем также считать функцию ε_a , величину w_a и коэффициенты k_x, k_y, k – заданными. В таком случае уравнение (1) содержит лишь одну неизвестную переменную – s . Для решения этого уравнения требуется задание начального и граничных условий.

Начальное условие возьмем в виде

$$\text{при } t = 0 \quad s = s^0(x, y, z), \quad (2)$$

где s^0 – заданная функция координат.

Уравнение (1) содержит вторые производные по трем координатам x, y, z . Следовательно, для его решения необходимо задать по два условия для каждой из трех координат. Рассмотрим вначале условия на <боковых> границах области расчета. Для простоты будем считать, что интегрирование уравнения (1) ведется над горизонтальной поверхностью $z = 0$, а область интегрирования имеет форму прямоугольного параллелепипеда, ограниченного плоскостями $x = x_1, x = x_2, y = y_1, y = y_2, z = z_1 = 0$ и $z = z_2$.

На боковых границах будем считать, что концентрация примеси является известной, т. е. примем, что при $x = x_1 \quad s = s_{x_1}; x = x_2 \quad s = s_{x_2}; y = y_1 \quad s = s_{y_1}; y = y_2 \quad s = s_{y_2}$.

В частном случае, когда интегрирование производится на бесконечном пространстве, принимается условие обращения концентрации примеси в ноль на бесконечности: при $x \rightarrow \pm\infty, y \rightarrow \pm\infty, z \rightarrow \infty \quad s \rightarrow 0$.

На верхней границе области расчета при $z = z_2 = H$ задается значение концентрации примеси, ее вертикальный турбулентный поток и вертикальная скорость, что выражается в виде:

$$\text{при } z = z_2 = H \quad s = s_H, \quad k(\partial s / \partial z) = Q_H, \quad w = w_H. \quad (3)$$

Наиболее сложной является постановка условия на нижней границе. Это условие формулируется в зависимости от свойства подстилающей поверхности и других факторов. Наиболее простой вид условия на нижней границе получается для водной поверхности. Последняя обладает свойством полного поглощения поступающей к ней примеси. Это свойство описывается условием: при $z = z_1 = 0 \quad s = 0$.

В случае твердой подстилающей поверхности наблюдается два противоположных процесса: поглощение и отражение примеси. Рассмотрим вначале случай, когда $w_a = 0$. Тогда если земная поверхность отражает поступающую к ней примесь полностью, то условие запишется в виде:

$$\text{при } z = 0 \quad k_z(\partial s / \partial z) = 0.$$

Если же земная поверхность падающую на нее примесь отражает частично, то часть примеси должна поглотиться этой поверхностью (процесс <сухого поглощения>). Эта часть примеси равна βs , где β – коэффициент, учитывающий этот процесс (коэффициент <аккомодации>). В этом случае граничное условие примет вид:

$$\text{при } z = 0 \quad k_z(\partial s / \partial z) - \beta s = 0.$$

Рассмотрим теперь общий случай, когда происходит падение тяжелой примеси ($w_a < 0$) и существует наземный источник примеси $f_0(x, y)$. Граничные условия в этом случае записываются в виде:

$$\text{при } z = 0 \quad k_z(\partial s / \partial z) - w_a s_0 = \beta s_0 - f(x, y), \quad (4)$$

где s_0 – значение s при $z = 0$.

Уравнение переноса примесей (1) является нелинейным. Поэтому оно решается главным образом численными методами [3]. В результате его численного интегрирования получается пространственно-временное распределение концентрации рассматриваемой примеси $\bar{s}(x, y, z, t)$. Кроме этого, может быть получен поток примеси из воздуха к поверхности:

$$Q_0 = k(\partial s / \partial z) - w_a s = \beta s. \quad (5)$$

При наличии в атмосфере нескольких видов примесей интегрирование уравнения переноса производится для каждой из них.

3. Уравнение переноса примеси для пограничного слоя атмосферы

Основная масса различных примесей (порядка 70 – 90%) сосредоточена в планетарном пограничном слое атмосферы (ППС), высота которого $z = H$ составляет около 1 км. В то же время именно в этом слое, особенно в его самой нижней части – внутреннем (приземном) пограничном слое (ВПС) высотой $z = H_1$, которая составляет примерно 30 – 100 м, происходит жизнедеятельность общества. В верхнем слое почвы и в прилегающем непосредственно к ней слое воздуха производятся продукты питания. Ввиду этого значительное число работ, посвященных экологическим проблемам, относится к ППС.

Ниже предлагается специальная модель переноса и расчета концентрации примесей в этом слое. Получим вначале уравнение переноса примесей ППС.

Введем в рассмотрение осредненные по высоте от $z = 0$ до $z = H$ величины: $\bar{s} = \frac{1}{H} \int_0^H s(z) dz$, $\bar{u} = \frac{1}{H} \int_0^H u(z) dz$ и т. д.

Произведем интегрирование уравнения (1) по высоте и учтем граничные условия (3) и (4). В результате для осредненных величин получаем:

$$\frac{\partial \bar{s}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{s}}{\partial x} + \bar{u} \frac{\partial \bar{s}}{\partial y} + \frac{1}{H} w_H (s_H - \bar{s}) + \frac{1}{H} w_a s_H - \frac{1}{H^2} k_H (s_H - s_0) - \frac{\partial}{\partial x} k_x \frac{\partial \bar{s}}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial y} k_y \frac{\partial \bar{s}}{\partial y} + \frac{\beta}{H} s_0 = \bar{\varepsilon}_a + \frac{1}{H} f_0.$$

Введем полуэмпирические коэффициенты

$$\alpha_0 = s_0 / \bar{s}, \quad \alpha_H = s_H / \bar{s}$$

и перепишем с их учетом предыдущее уравнение в виде

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{s}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{s}}{\partial x} + \bar{u} \frac{\partial \bar{s}}{\partial y} - \frac{1}{H} w_H (1 - \alpha_H) \bar{s} + \frac{1}{H} \alpha_H w_a \bar{s} + \frac{\alpha_0 - \alpha_H}{H^2} k_H \bar{s} - \frac{\partial}{\partial x} k_x \frac{\partial \bar{s}}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial y} k_y \frac{\partial \bar{s}}{\partial y} + \frac{\alpha_0 \beta}{H} \bar{s} = \\ = \bar{\varepsilon}_a + \frac{1}{H} f_0. \end{aligned} \quad (6)$$

Входящая в соотношение (6) функция ε_a определяется интенсивностью выбросов в воздух от различных источников (например, труб производственных комплексов) F , <вымыванием> примеси атмосферными осадками W и уничтожением данной примеси при химических реакциях R . Так что можно записать:

$$\varepsilon_a = F - W - R. \quad (7)$$

В свою очередь, принимается

$$W = -\sigma_2 s; \quad R = -\sigma_3 s, \quad (8)$$

где σ_2 и σ_3 – полуэмпирические коэффициенты.

Величина σ_3 связывается с интенсивностью осадков I (мм/ч) по соотношению $\sigma_2 = \alpha^* I$, где α^* – постоянная. Для окислов серы и азота принимается, что $\sigma_2 = 0,01 \text{ ч}^{-1}$. При превращении сернистого газа в ион - сульфат SO_4^{2-} $\sigma_3 = 0,05 \text{ ч}^{-1}$.

С учетом сказанного уравнение (6) запишем иначе:

$$\frac{\partial \bar{s}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{s}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{s}}{\partial y} + \sigma \bar{s} - \frac{\partial}{\partial x} k_x \frac{\partial \bar{s}}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial y} k_y \frac{\partial \bar{s}}{\partial y} = \varphi, \quad (9)$$

где $\varphi = \varphi(x, y, t) = F - \frac{1}{H} f_0$, $\sigma = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 + \sigma_4 + \sigma_5 + \sigma_6$,

$$\sigma_1 = \frac{\alpha_0 \beta}{H}, \quad \sigma_4 = -\frac{1 - \alpha_H}{H} w_H, \quad \sigma_5 = \frac{\alpha_H}{H} w_a, \quad \sigma_6 = \frac{\alpha_0 - \alpha_H}{H^2} k_H \quad (10)$$

4. Региональная однослойная траекторная модель

Введем так называемые натуральные координаты. Для этого вначале определим траекторию движения частиц по среднему в ППС ветру. В каждой точке траектории ось x направлена по движению, а ось y – по нормали к траектории. Новые координаты можно обозначить через l и m соответственно. Однако для ясности изложения будем пользоваться прежними обозначениями, считая, что в каждой точке траектории $x = l, y = m$, а $\bar{u} = \bar{u}_l, \bar{v} = 0$.

Сопоставляя порядки величин второго и пятого членов левой части уравнения (9), можно сделать вывод, что последний мал. С учетом сказанного и того, что $\bar{v} = 0$, уравнение (9) запишется короче (черта сверху далее опущена):

$$\frac{\partial s}{\partial t} + u \frac{\partial s}{\partial x} + \sigma s - \frac{\partial}{\partial y} k_y \frac{\partial s}{\partial y} = \varphi \quad (11)$$

или

$$\frac{d_r s}{dt} + \sigma s - \frac{\partial}{\partial y} k_y \frac{\partial s}{\partial y} = \varphi, \quad (12)$$

где $\frac{d_r s}{dt} = \frac{\partial s}{\partial t} + u \frac{\partial s}{\partial x}$ – индивидуальная производная при движении по траектории.

Следуя М.Е. Берлянду [6], для коэффициента турбулентности при пульсациях поперек потока примем

$$k_y = k_0 u, \quad (13)$$

где k_0 – коэффициент, зависящий от стратификации воздуха. Тогда вместо уравнения (12) получим

$$\frac{d_r s}{dt} + \sigma s - k_0 \frac{\partial^2 s}{\partial y^2} = \varphi. \quad (14)$$

Далее (14) запишем в виде

$$s(x, y, t) = s'(x, t) P(x, y). \quad (15)$$

Разделяя переменные для функций P и s' , получим

$$\frac{\partial P}{\partial x} - k_0 \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} = 0, \quad (16)$$

$$\frac{\partial_t s'}{dt} + \sigma s' = \varphi/P. \quad (17)$$

Последние уравнения будем решать для случаев, когда источники примеси являются единичными и выражаются с помощью δ -функции (функции Дирака).

Для решения уравнения (16) примем следующие граничные условия:

$$\text{при } x = 0 \quad P = \delta(y), \text{ при } y \rightarrow \pm\infty \quad P \rightarrow 0. \quad (18)$$

Для этих условий имеем

$$P(x, y) = (1/\sqrt{2\pi k_0 x}) \exp(-y^2/4 k_0 x). \quad (19)$$

Интегрирование уравнения (17) с шагом по времени Δt и по x с шагом Δx производится вдоль известной траектории движения. Применяя явную схему для очередного шага с номером n , имеем

$$s'^{(n)} = (1 - \sigma \Delta t) s'^{(n-1)} + \Delta t (\varphi/P)^{(n-1)}, \quad (20)$$

где индекс $(n-1)$ относится к предыдущему шагу.

Высота ППС H может быть определена по теории пограничного слоя [3, 12]. В простейшем случае принимается

$$H = \sqrt{k/l},$$

где $l = 2 \omega \sin \varphi$ – параметр Кориолиса, по Г.А. Пановскому [12].

$$H = 0,2 u_* / l,$$

где $u_* = \kappa V / \ln z/z_0$; $\kappa=0,4$; V – скорость ветра; z_0 – параметр шероховатости.

Иногда вместо высоты ППС берется высота слоя перемешивания (ВСП) [10], равная k_{1m}/l , где k_{1m} – коэффициент турбулентности на высоте 1 м.

По различным оценкам значения H и ВСП, являющиеся близкими, имеют значение: летом и днем 1500 м и выше, зимой и ночью 400 м и ниже.

Траектории частиц рассчитываются с помощью соотношений

$$\frac{dx}{dt} = \bar{u}(x, y, t), \quad \frac{dy}{dt} = \bar{v}(x, y, t)$$

численным методом шагами по времени по значениям скорости ветра в узлах сетки точек.

Средние для слоя H составляющие скорости ветра в узлах сетки рассчитываются по значениям давления на уровне моря и высоте изобарической поверхности 850 гПа на основе теории пограничного слоя [4].

Модель была применена для расчета распространения примеси от различных точечных источников на срок до 1 суток и ее концентрации в точках траектории за сутки.

В табл. 1 в качестве примера приведены результаты такого расчета для одного источника, мощность которого создавала концентрацию в начальной точке траектории, равную 100 мкг/м³. Эти данные могут быть отнесены к любому загрязняющему веществу, например, сернистому газу, выбрасываемому в атмосферу Норильским горно-металлургическим комбинатом, или к радиоактивным веществам, образовавшимся в результате ядерного взрыва. Различаться эти ситуации будут лишь мощностью источника и траекторией переноса примесей, а также используемыми параметрами модели.

Из данных таблицы видно, каким образом изменяется концентрация вещества при движении по траектории на <оси струи> и поперек нее.

Значение концентраций примеси ($\text{мкг} / \text{м}^3$) в зависимости от длины траектории движения от единичного источника l и расстояния по нормали к траектории m в момент времени t

$t, \text{ч}$	$l, \text{км}$	$m, \text{м}$			
		0	100	500	1000
0	0	100	–	–	–
2	70	0,142	0,137	0,058	0,004
6	201	0,074	0,073	0,055	0,021
12	434	0,042	0,042	0,037	0,024
18	690	0,028	0,028	0,025	0,019
24	997	0,020	0,019	0,018	0,015

Примечание. $s^0 = 100 \text{ мкг} / \text{м}^3$, $H = 1000 \text{ м}$, $\beta = 1 \text{ см/с}$, $\sigma = 0,88 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$.

Например, концентрация вещества через 24 ч при удалении от источника загрязнения на расстояние 997 км уменьшилась до 0,02 мкг/м³ и составила 0,02% от первоначального значения. Интересно также отметить, что концентрация вещества при поперечном рассеянии через 24 ч на расстоянии 1 км от <оси струи> практически не отличается от ее значения на оси.

5. Локальная модель переноса примеси во внутреннем (приземном) слое

В самой нижней части планетарного пограничного слоя имеется так называемый внутренний приземный слой (ВПС), толщина которого составляет примерно 30–100 м. Согласно теории приземного пограничного слоя направление ветра в нем неизменно, а величина скорости выражается соотношением

$$u(z) = (u_*/\kappa) \ln (z + z_0)/z_0,$$

где $\kappa = 0,4$; z_0 – параметр шероховатости; $u_* = l \, d u / d z$ – динамическая скорость; $l = \kappa(z + z_0)$ – путь смешения (для стратификации, близкой к безразличной), $k = l^2 \, d u / d z$ – коэффициент турбулентности.

Если известна скорость на каком-либо уровне z_2 (например, $z_2 = z_{10} = 10 \text{ м}$ – высота флюгера), то будем иметь

$$u(z) = u_{10} \ln [(z + z_0)/z_0] / \ln [(z_{10} + z_0)/z_0];$$

$$k(z) = k_0 + a z, \quad k_0 = a z_0, \quad a = \kappa^2 u_{10} / \ln [(z_{10} + z_0)/z_0]. \quad (21)$$

Согласно [10] высота ВСП $H_{\text{ВСП}} = H_1$:

$$H_1 = H_{\text{ВСП}} = k_1 / 10 l,$$

где k_1 – коэффициент турбулентности на высоте 1 м, зависящий от устойчивости, причем для дневной (нейтральной) стратификации $k_1 \sim 0,1 \text{ м}^2/\text{с}$, а для ночной (устойчивой) – $k_1 \sim 0,05 \text{ м}^2/\text{с}$. Например, при $\varphi = 70^\circ$, $l = 0,139 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$ и $k_1 = 0,1 \text{ м}^2/\text{с}$ высота $H_1 = 72 \text{ м}$. Более точные характеристики ВПС могут быть определены на основе теории Монина – Обухова.

Далее будет рассматриваться мезомасштабная область с горизонтальными размерами $L \sim 50 \text{ км}$. В такой области направление ветра можно принять постоянным.

Направим ось x вдоль ветра и проинтегрируем уравнение переноса примеси от z_0 до H_1 . Введем осредненные по ВПС величины:

$$\bar{s} = \frac{1}{H_1} \int_{z_0}^{H_1} s(z) \, dz, \quad \bar{u} = \frac{1}{H_1} \int_{z_0}^{H_1} u(z) \, dz.$$

Интегрируя выражение для $u(z)$, для средней по слою скорости получаем:

$$\bar{u} = u_{10} \ln \frac{H_1 + z_0}{z_0} / \ln \frac{z_{10} + z_0}{z_0}, \quad (22)$$

где u_{10} – скорость ветра на уровне флюгера. Далее, действуя так же, как и в региональной модели для осредненных по ВПС величин, получаем уравнение, аналогичное уравнению (14), которое с помощью подстановки (15) переходит в уравнение (16) и (17) для функций P и s' .

Решение уравнения для функции P в случае единичных источников, описываемых с помощью δ -функции, выражается в виде (19).

Решение же уравнения для переменной s' в случае постоянного направления ветра находится в аналитическом виде.

Рассмотрим вначале стационарный случай ($\partial s/\partial t = 0$). В этом случае уравнение для s' получает вид

$$\frac{\partial s'}{\partial x} + \frac{\sigma}{\bar{u}} = \frac{\varphi(x)}{\bar{u}P}$$

Решение этого уравнения при условии, что $x = 0, s' = s^{0'} = s^0/P$, имеет вид

$$s'(x) = \exp(-\sigma x/\bar{u}) \left[s^{0'} + \int_0^x [\exp(\sigma x'/\bar{u})] \frac{\varphi(x')}{\bar{u}P} dx' \right]. \quad (23)$$

Решение соответствующего нестандартного случая для функции сводится к решению для стационарного случая с помощью введения новых переменных

$$x_1 = x - t, \quad t_1 = t.$$

Соответствующее решение для s' запишется в виде

$$s'(t_1) = \exp(-\sigma t_1) \left[s^{0'} + \int_0^{t_1} [\exp(\sigma t_1')] \varphi(t_1') dt_1' \right].$$

Решение (23) с учетом (19), (15) было применено для расчета концентрации условной примеси (сернистого газа, например) при наличии по движению нескольких единичных наземных источников. В начале координат, т. е. при $x = 0$, было принято, что $s^0 = 0$.

В качестве примера расчета приводятся данные в табл. 2.

Таблица 2

Значения концентрации примеси ($\text{мкг}/\text{м}^3$) в зависимости от расстояния x от начала координат и от расстояния y от <оси струи> при наличии трех наземных точечных источников

$x, \text{ км}$	$f_0, \text{ мкг}/\text{м}^2\cdot\text{с}$	$y, \text{ м}$				
		0	50	100	300	500
0	0	–	–	–	–	–
6	500	15,10	13,54	9,91	0,35	0
12	0	8,88	8,43	7,21	1,36	0,49
16	400	13,13	12,63	11,23	3,22	0,26
18	0	11,66	11,26	10,15	5,34	0,36
20	500	17,41	16,93	15,42	5,67	0,77
32	0	9,63	9,45	8,91	4,77	1,37
50	0	4,49	4,47	4,27	2,86	1,27

Примечание. $s^0 = 0, H_1 = 100 \text{ м}, \beta = 1 \text{ см}/\text{с}, \bar{u} = 10 \text{ м}/\text{с}, z_0 = 10 \text{ см}$.

Из таблицы следует, что при движении воздуха над наземными источниками концентрация примеси над ними резко возрастает. Так, над первым наземным источником мощностью $500 \text{ мкг}/\text{м}^3$ (источник типа небольшой ТЭЦ) концентрация примеси составила на <оси струи> 15,1, а над третьим источником – $17,5 \text{ мкг}/\text{м}^3$. По мере удаления от источников концентрация быстро уменьшается. При удалении от последнего источника на 30 км концентрация умень-

шилась до $4,5 \text{ мкг/м}^3$. Из таблицы видно, что хотя значения концентрации при удалении от оси струи заметно уменьшаются, тем не менее они остаются значительными.

1. Алоян А.Е., Йорданов Д.Л., Пененко В.В. // Метеорология и гидрология. 1981. N 8. С. 32 – 43.
2. Белов П.Н. // Вестник МГУ. Сер. 5. 1990. N 5. С. 16 – 24.
3. Белов П.Н., Борисенков Е.П., Панин Б.Д. Численные методы прогноза погоды. Л.: Гидрометеоздат, 1989. 376 с.
4. Белов П.Н., Карлова З.Л. Траекторная модель переноса загрязнений. Метеорология и гидрология, 1990, N 12. С. 67 – 74.
5. Берлянд М.Е. Прогноз и регулирование загрязнения атмосферы. Л.: Гидрометеоздат, 1985. 272 с.
6. Борзилов В.А., Вельтищева Н.С., Клепикова Н.В. и др. // Метеорология и гидрология. 1988. N 4. С. 57 – 65.
7. Зуев В.Е., Комаров В.С. Статистические модели температуры и газовых компонент атмосферы. Л.: Гидрометеоздат, 1986. 264 с.
8. Израэль Ю.А. Экология и контроль состояния природной среды. Л.: Гидрометеоздат, 1984. 560 с.
9. Кислотные дожди / Ю.А. Израэль и др. Л.: Гидрометеоздат, 1983. 206 с.
10. Климатические характеристики условий распространения примесей в атмосфере. Л.: Гидрометеоздат, 1983. 293 с.
11. Мониторинг трансграничного переноса загрязняющих воздух веществ / Ю.А. Израэль и др. Л.: Гидрометеоздат, 1987. 257 с.
12. Пановский Г.А. // Динамика погоды. Л.: Гидрометеоздат, 1988. С. 351 – 382.
13. Eliassen A. // J. Appl. Met. 1980. V. 19. N 3. P. 231 – 240.
14. Elinton B.L., Misra P.K. // Atmos. Environ. 1985. V. 19. N 5. P. 727 – 737.
15. Environmental pollution monitoring and research programme. N 49 / Technical document WMO / TD. N 187. September 1987. 543 p.

Московский государственный университет
Институт оптики атмосферы СО РАН, Томск

Поступила в редакцию
15 ноября 1993 г.

P.N. Belov, V.S. Komarov. Theoretical Model of a Contaminant Transport in the Boundary Atmospheric Layer.

A single layer model of a contaminant transport in the boundary atmospheric layer is analyzed in this paper. The model has been used for calculations of a contaminants dispersal at long (on the order of 1000 km) and short (on the order of 50 km) distances, so called regional and local models. Some calculational results obtained using these models are also discussed in the paper.