

ГЛАВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ  
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЙ СЛУЖБЫ  
ПРИ СОВЕТЕ МИНИСТРОВ СССР

ТРУДЫ  
ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ  
ГЛАВНОЙ ГЕОФИЗИЧЕСКОЙ ОБСЕРВАТОРИИ  
им. А. И. ВОЕЙКОВА

*Выпуск*

387

АТМОСФЕРНАЯ ДИФФУЗИЯ  
И ЗАГРЯЗНЕНИЕ ВОЗДУХА

Под редакцией д-ра физ.-мат. наук М. Е. БЕРЛЯНДА

529162

Ленинградский  
Гидрометеорологический ин-т  
БИБЛИОТЕКА  
Л-д 195196 Малоохтинский пр., 98



ГИДРОМЕТЕОИЗДАТ ЛЕНИНГРАД 1977

Рассматриваются результаты теоретических и экспериментальных исследований турбулентной диффузии примесей от наземных и высотных источников. Исследуется вопрос об определении неблагоприятных условий распространения примеси. Даются результаты изучения климатических характеристик загрязнения воздуха и методики прогнозирования и предотвращения высоких уровней загрязнения воздуха. Приводятся оценки поступления морских аэрозолей в атмосферу. Описывается способ оценки коррозионной агрессивности атмосферы в прибрежных районах.

Данный сборник является тринадцатым выпуском серии Трудов ГГО по вопросам атмосферной диффузии и загрязнения воздуха.

Рассчитан на специалистов, занимающихся вопросами метеорологии, гигиены атмосферного воздуха, вентиляции и газоочистки, физики и химии аэрозоля.

Results of theoretical & experimental investigations of pollutant turbulent diffusion from ground-level & elevated sources are considered in the publication. The problem of determination of unfavourable conditions for pollutant dispersion is examined. Investigation data on climatic characteristics of air pollution, prediction & prevention technique of high air pollution levels are given. Evaluations of sea aerosol entering into the atmosphere are presented. Evaluation method of corrosive aggressiveness of the atmosphere is described.

This publication is the thirteenth in the series of Proceedings of the Main Geophysical Observatory on atmospheric diffusion & air pollution.

*М. Е. Берлянд, Е. Л. Генихович, Р. И. Оникул*

## **К НОРМИРОВАНИЮ ВЫБРОСОВ ОТ НАЗЕМНЫХ ИСТОЧНИКОВ**

### **1. Введение**

Одним из основных приложений теории атмосферной диффузии является нормирование вредных выбросов. Задача, которая должна быть при этом решена, заключается в обеспечении необходимой чистоты атмосферы при наиболее неблагоприятных условиях погоды, когда в приземном слое воздуха могут достигаться максимальные концентрации. Эти вопросы подробно рассматривались авторами в ряде работ, итоги которых подведены в монографии [1].

В реальных условиях выбросы от промышленных предприятий осуществляются с некоторой начальной скоростью и перегревом по отношению к окружающему воздуху. В результате можно условно считать, что такие выбросы производятся на некоторой эффективной высоте. В подобных случаях имеется возможность установить неблагоприятные метеорологические условия, в том числе опасную скорость ветра, при которых наземная концентрация достигает наибольшего значения. Из требования, чтобы это наибольшее значение не превышало предельно допустимой концентрации (ПДК), устанавливается возможный выброс вредных примесей в атмосферу.

До настоящего времени не получил развития вопрос о нормировании выбросов от наземных источников, для которых начальный подъем отсутствует. Вместе с тем решение этого вопроса имеет большое научное и практическое значение. Мощные наземные источники могут создаваться, например, при авариях и неисправностях газопроводов, по которым транспортируется природный газ с большим содержанием сероводорода, промышленных трубопроводов для аммиака и других токсических веществ. Даже прорыв чистого природного газа иногда вызывает лесные пожары. Поэтому в районах газопроводов необходимо учитывать характер изменения концентрации примесей с удалением от источников и устанавливать границы безопасных зон. Сходные задачи возникают при изучении промышленных проливов легкокипящих и летучих жид-

костей (аммиака, растворителей и т. д.). В ряде случаев интенсивными наземными источниками являются неорганизованные промышленные выбросы на промплощадках, пруды-отстойники, выбросы автотранспорта, горных разработок и взрывных работ (в частности, в карьерах).

Приближенно расчет концентраций от наземных источников может быть выполнен на основании известных аналитических решений уравнения турбулентной диффузии. Во многих случаях можно ограничиться расчетом поля концентрации для сравнительно малых расстояний. Тогда для расчета концентраций  $q$  от наземного источника применимо решение (см. [2]), полученное при степенных моделях для вертикального распределения скорости ветра и коэффициентов турбулентной диффузии:

$$u = u_1 z^n, \quad k_z = k_1 z^m \quad \text{и} \quad k_y = \varphi_0 x u; \quad (1)$$

$$q|_{y=z=0} = \frac{M}{\sqrt{2\pi} (2+n-m)^{1-2\mu} \Gamma(1-\mu) \varphi_0 u_1^\mu k_1^{1-\mu} x^{2-\mu}}, \quad (2)$$

где  $\mu = \frac{1-m}{2+m-n}$ ,  $M$  — мощность источника,  $\varphi_0$  — среднеквадратическое отклонение колебаний направления ветра.

Из (2), так же как и из аналогичных расчетных формул Сеттона, Пэсквилла и др., следует вывод, что при неблагоприятных метеорологических условиях, таких, как приземная инверсия температуры и ослабление скорости ветра до нуля, концентрация примеси неограниченно возрастает на всех расстояниях от источника. Следовательно, на основе этих формул нельзя установить предельную мощность источника, при которой наземная концентрация примеси не превышает ПДК. Такой результат является следствием неприменимости указанных решений для описания рассеяния примеси от наземного источника в случае, когда скорость ветра и коэффициенты обмена стремятся к нулю. Эти формулы получены в результате решения стационарного уравнения диффузии. В действительности же при малых скоростях ветра и слабом перемешивании, по существу, необходимо учитывать нестационарность процесса, поскольку требуется длительное время для переноса примеси от источника до точки наблюдения. Существенно также учитывать и то обстоятельство, что продолжительность неблагоприятных метеорологических условий ограничена во времени (обычно для приземного слоя воздуха продолжительность глубоких инверсий или полное безветрие продолжается не более нескольких часов). Иногда необходимо учитывать также и ограниченность времени действия источника. Так, например, в случае аварии газопровода ее можно ликвидировать в течение одного — двух часов.

В этой связи в настоящей работе развивается общий подход, связанный с учетом нестационарности распространения примеси. Такой подход может служить теоретической основой для разработки принципов нормирования выбросов от наземных источников.

## 2. Постановка и решение нестационарной задачи

Турбулентная диффузия примеси в атмосфере описывается в общем случае уравнением

$$\frac{\partial q}{\partial t} + u \frac{\partial q}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} k_x \frac{\partial q}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial y} k_y \frac{\partial q}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} k_z \frac{\partial q}{\partial z} + Q \quad (3)$$

с граничными условиями

$$k_z \left. \frac{\partial q}{\partial z} \right|_{z=0} = 0, \quad q|_{x^2 + y^2 + z^2 \rightarrow \infty} \rightarrow 0. \quad (4)$$

Здесь  $t$  — время,  $Q$  — функция, описывающая действие источника,  $u$  — скорость ветра,  $k_x$ ,  $k_y$  и  $k_z$  — коэффициенты турбулентной диффузии в направлении координатных осей, причем ось  $x$  выбрана вдоль приземного ветра, а ось  $z$  — по вертикали.

Вопрос о применимости (2) для описания поля концентраций примеси связан с анализом соотношений между временными масштабами, характеризующими степень нестационарности решения уравнения (3). Эти временные масштабы определяются закономерностями изменения метеоусловий и функции  $Q$ . В простейшем случае можно считать, что источник включается в начальный момент и действует в течение времени  $T_1$ , после чего выключается. Введем также в рассмотрение время  $T_2$  сохранения метеоусловий, в течение которого коэффициенты уравнения диффузии можно считать не зависящими от  $t$ , и время стационарирования  $T_c$ , за которое решение задачи (3) — (4) с не зависящими от времени коэффициентами и функцией  $Q$  приближается с заданной точностью к решению соответствующей стационарной задачи. Тогда применимость стационарного решения уравнения диффузии связана с выполнением неравенства  $T_c \leq t < \min(T_1, T_2)$ . Если обозначить через  $k$  характерное значение коэффициентов турбулентности на фиксированном уровне, то из общих соображений следует, что в штилевых условиях на расстоянии  $x$  от наземного источника время стационарирования

$T_c \sim \frac{x^2}{k}$ . Отсюда ясно, что при ослабленном перемешивании (т. е. при  $k \rightarrow 0$ ) время  $T_c \rightarrow \infty$  и указанное неравенство выполняться не будет. В этом случае решениями стационарного уравнения диффузии нельзя пользоваться для описания поля концентрации примеси. В частности, как уже отмечалось, при  $k \rightarrow 0$  теряет смысл выражение (2), так как из него следует, что  $q \rightarrow \infty$  для любых  $x$  и при любой фиксированной мощности источника  $M$ .

Покажем, что можно получить решение нестационарного уравнения (3), свободное от указанного недостатка. С этой целью рассмотрим (3) на интервале  $0 < t \leq T$ , где  $T$  — минимальное из времени сохранения метеоусловий  $T_2$  и времени  $T_1$  действия источника фиксированной мощности  $M$ . При этом функция  $Q$  задается соотношением

$$Q = M \delta(x) \delta(y) \delta(z). \quad (5)$$

Предположим, что в начальный момент времени концентрация примеси во всех точках пространства постоянна, а под  $q$  будем понимать отклонение концентрации от начального значения. Тогда начальное условие для уравнения (3) примет вид

$$q|_{t=0} = 0. \quad (6)$$

В силу линейности концентрации относительно мощности источника решение задачи (3), (4), (5), (6) для интервала времени  $0 \leq t < T$  можно записать в виде

$$q = M \varphi(x, y, z, t), \quad (7)$$

где функция  $\varphi$  находится в результате интегрирования по времени решения нестационарной задачи о распространении примеси от мгновенного наземного источника.

Аналитическое решение нестационарного уравнения диффузии (3) удается найти только в случае простейших моделей. Например, для постоянных коэффициентов это решение имеет вид:

$$\varphi = \frac{e^{\frac{ux}{2k_x}}}{4 \pi^{3/2} (k_x k_y k_z)^{1/2}} \int_0^t s^{-3/2} e^{-as - \frac{b}{s}} ds, \quad (8)$$

где

$$a = \frac{u^2}{4k_x}; \quad b = \frac{x^2}{4k_x} + \frac{y^2}{4k_y} + \frac{z^2}{4k_z}. \quad (9)$$

Для штиля ( $u=0$ ) из (8) следует

$$\varphi = \frac{1}{2 \pi (k_x k_y k_z b)^{1/2}} \operatorname{erfc} \left( \sqrt{\frac{b}{t}} \right). \quad (10)$$

Если время установления  $T_c$  определить как промежуток, в течение которого концентрация достигает  $(1-\varepsilon)$  от своего стационарного значения, то из (10) для рассматриваемого штилевого случая получим

$$T_c = \lambda^{-2} b, \quad (11)$$

причем значение  $\lambda$  находится из уравнения

$$\operatorname{erfc}(\lambda) = 1 - \varepsilon.$$

Аналогичным образом можно получить решение задачи о диффузии от линейного источника:

$$\varphi = \frac{e^{\frac{ux}{2k_x}}}{2 \pi (2k_x k_z)^{1/2}} \int_0^t s^{-1} e^{-as - \frac{b}{s}} ds. \quad (12)$$

При  $u=0$  из (12) следует

$$\varphi = \frac{1}{2 \pi (2k_x k_z)^{1/2}} \Gamma \left( 0, \frac{b}{t} \right), \quad (13)$$

где  $\Gamma(n, x)$  — неполная  $\Gamma$ -функция.

В общем случае решение нестационарного трехмерного уравнения (2) должно выполняться численно. Вопросы численного решения многомерного уравнения диффузии в последние годы разрабатывались рядом авторов. Будем следовать в данной статье изложению работы [3]. При этом воспользуемся простейшим вариантом метода расщепления, поскольку в дифференциальном операторе (2) коэффициенты не зависят от времени. Тогда разностную схему для уравнения (2) можно записать в виде:

$$\begin{aligned} \left(E + \frac{\tau}{2} A_1\right) \xi^{j+\frac{1}{3}} &= F^j, \\ \left(E + \frac{\tau}{2} A_2\right) \xi^{j+\frac{2}{3}} &= \xi^{j+\frac{1}{3}}, \\ \left(E + \frac{\tau}{2} A_3\right) \xi^{j+1} &= \xi^{j+\frac{2}{3}}, \\ q^{j+1} &= q^j + \tau \xi^{j+1}, \\ F^j &= Q^j - (A_1 + A_2 + A_3) q^j. \end{aligned} \quad (14)$$

Здесь  $j$  — номер, а  $\tau$  — величина шага по времени,  $Q^j$  — аппроксимация для источника,  $E$  — единичный оператор,  $A_1$ ,  $A_2$  и  $A_3$  — разностные аппроксимации дифференциальных операторов  $u \frac{\partial q}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial x} k_x \frac{\partial q}{\partial x}$ ,  $-\frac{\partial}{\partial y} k_y \frac{\partial q}{\partial y}$  и  $-\frac{\partial}{\partial z} k_z \frac{\partial q}{\partial z}$  — соответственно. Система (14) рассматривается в сеточной области внутри параллелепипеда

$$(X_1 \leq x \leq X_2) \times (0 \leq y \leq Y) \times (0 \leq z \leq Z),$$

причем при  $y=0$  можно поставить граничное условие  $\frac{\partial q}{\partial y} = 0$ , а значения  $X_1$ ,  $X_2$ ,  $Y$ ,  $Z$  выбираются таким образом, чтобы на соответствующих границах концентрации были близки к нулю. Для обращения матриц в левой части (14) используется метод прогонки.

Решение трехмерного нестационарного уравнения диффузии предъявляет довольно жесткие требования к объему памяти и быстродействию используемой ЭВМ. Эти требования могут быть снижены, если ограничиться рассмотрением линейных источников примеси, для которых размерность дифференциального оператора на единицу меньше. Для точечного источника при скоростях ветра, существенно больших нуля, можно также отбросить слагаемое

$\frac{\partial}{\partial x} k_x \frac{\partial q}{\partial x}$ , если не интересоваться значениями концентрации в момент прохождения диффузионного фронта через точку наблюдения. Однако и после таких упрощений объем вычислений остается большим.

Существенную информацию о характере распространения примеси от наземного источника можно получить и без решения урав-

нения (3). Для этого воспользуемся выражением (7) для концентрации примеси при  $t \leq T$ . Из него для осевой наземной концентрации следует

$$q|_{y=z=0} = M \varphi(t, x, u, k, h, a_1, a_2, a_3, \dots), \quad (15)$$

где  $h$  — высота приземного слоя,  $k$  — значение коэффициента вертикальной диффузии на верхней границе приземного слоя,  $u$  — характерное значение скорости ветра,  $a_1, a_2, a_3, \dots$  — безразмерные величины, определяющие профили коэффициентов турбулентности и скорости ветра (которые должны выбираться в классе допустимых функций, в частности быть неотрицательными и др.). Исследуем метеорологические условия, при которых через время  $t$  в точке  $x$  концентрация будет максимальной. Такие условия определяются из системы уравнений

$$\frac{\partial \varphi}{\partial u} = 0; \quad \frac{\partial \varphi}{\partial k} = 0; \quad \frac{\partial \varphi}{\partial h} = 0; \quad \frac{\partial \varphi}{\partial a_1} = 0; \quad \frac{\partial \varphi}{\partial a_2} = 0; \quad \dots \quad (16)$$

Совместное решение уравнений системы (16) формально позволяет определить значения неблагоприятных с точки зрения переноса примеси от наземного источника метеорологических параметров:

$$u_M = u_M(x, t); \quad k_M = k_M(x, t); \quad h_M = h_M(x, t); \quad a_i^M = a_i^M(x, t). \quad (17)$$

Поскольку единственными независимыми размерными величинами в (17) являются  $x$  и  $t$ , то из соображений размерности решение (16) имеет вид:

$$u_M = c_1 \frac{x}{t}; \quad k_M = c_2 \frac{x^2}{t}; \quad h_M = c_3 x; \quad a_i^M = \lambda_i, \quad (18)$$

где  $c_1, c_2, c_3, \lambda_i$  — константы. Из (18) можно также найти неблагоприятное значение параметра  $k_1$  как отношение  $k_M$  и  $h_M$ :

$$k_{1M} = c_4 \frac{x}{t}. \quad (18')$$

Следует иметь в виду, что определение максимальных значений функции (15) связано с решением задачи на условный экстремум, поскольку реальные значения рассматриваемых метеорологических параметров не меняются произвольно, а локализованы в определенной области (например, ограничены сверху). Поэтому будем считать, что проведенные рассуждения справедливы, пока какой-либо из определяемых в (18) параметров не выйдет из области реально наблюдаемых значений. Однако только для  $u_M, k_M$  и  $h_M$  условия применимости формул (18) зависят от времени диффузии  $t$  и координаты  $x$ . Все остальные величины — безразмерные, и если они не попали в область допустимых значений, то замена их на реально наблюдаемые не введет новых размерных аргументов в выражения для первых трех характеристик в (16), т. е. не изменит вида функциональной зависимости от  $x$  и  $t$  (измениться могут только числовые



коэффициенты  $c_1, c_2, c_3, c_4$ ). В то же время требование, чтобы рассчитанные из (16) значения  $u_M, h_M, k_M$  и  $k_{1M}$  не превосходили реально наблюдаемых, приводит при заданном времени диффузии  $t$  к ограничению

$$x < x_*, \quad (19)$$

где  $x_*$  определяется максимальными возможными значениями скорости ветра, коэффициента турбулентности и толщины приземного слоя и растет при увеличении времени диффузии.

Соотношения (18) показывают, что при заданном  $t$  каждой точке  $x$  соответствуют свои неблагоприятные метеорологические условия. При этом сочетание малых скоростей ветра и ослабленного турбулентного обмена приводит к максимальным значениям наземной концентрации только вблизи источника. Для больших  $x$  неблагоприятные условия рассеяния примеси связаны с усиленным перемешиванием и значительными скоростями.

Подстановка (18) в (15) дает формулу, описывающую распределение максимальных на расстоянии  $x$  концентраций при времени диффузии  $t$ :

$$q_M = M \varphi(t, x, u_M, k_M, h_M, a_i^M).$$

Из соображений размерности эту формулу можно переписать в виде

$$q_M = \frac{AMt}{x^3}, \quad (20)$$

где  $A$  — константа.

При фиксированном  $t$  уравнение (20) есть уравнение огибающей, под которой должны быть расположены все значения концентрации от наземного источника, рассчитанные для произвольных условий погоды.

Из (10) следует, что при постоянных коэффициентах турбулентности для штилевого случая константы  $A$  и  $c_2$  определяются выражениями

$$A = \frac{2\eta^2}{\pi} \operatorname{erfc}(\eta),$$

$$c_2 = \frac{1}{4\eta^2}, \quad (21)$$

где  $\eta$  — корень уравнения

$$\sqrt{\pi} e^{\eta^2} \operatorname{erfc}(\eta) = \eta. \quad (22)$$

Расчеты показывают, что  $\eta \approx 0,84$ , так что  $c_2 \approx 0,35$ ;  $A \approx 0,11$ . Очевидно также, что для случая слабого перемешивания из (9) получим  $c_1 \approx 1$ . Более точные значения констант могут быть определены в процессе численного решения (14).

Для задачи о рассеянии примеси от наземного линейного источ-

ника можно провести рассуждения, аналогичные предыдущим, и показать, что неблагоприятные метеорологические условия описываются соотношениями вида (18). Однако для максимальных наземных концентраций будет иметь место формула

$$q'_M = \frac{A' M t}{x^2}, \quad (23)$$

где  $A'$  — константа, а  $M$  — мощность выброса с единицы длины источника.

При постоянных коэффициентах турбулентности из (13) для штилевого случая следует

$$A' = \frac{V\sqrt{2}}{\pi} \eta e^{-\eta}; \quad (24)$$

$$c_2 = \frac{1}{4\eta}, \quad (25)$$

где  $\eta$  — корень уравнения

$$e^\eta \Gamma(0, \eta) = 1. \quad (26)$$

Для числовой оценки достаточно принять  $\eta \approx 1$ , так что  $c_2 \approx 0,25$ ,  $A' = 0,17$ .

Зависимость от времени концентрации, полученной при численном решении задачи о распространении примеси от наземного ли-

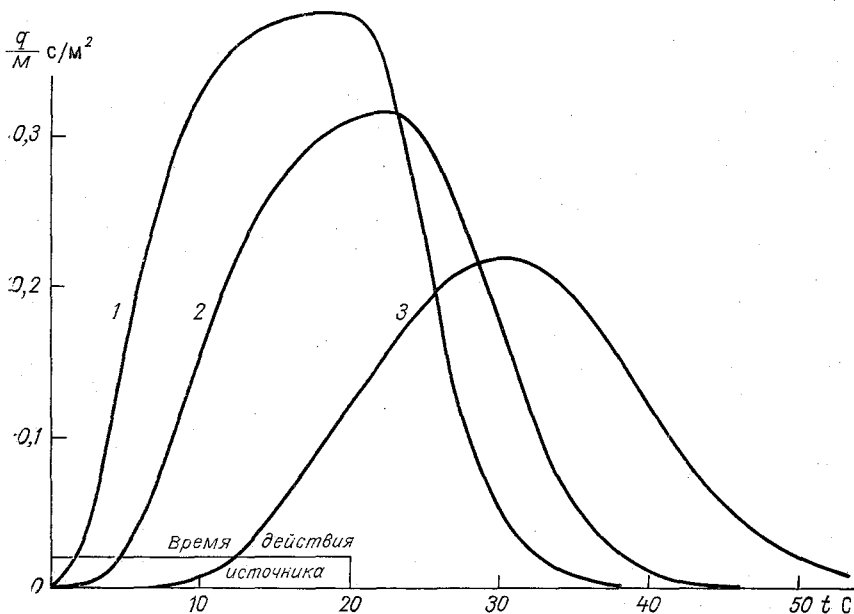


Рис. 1. Зависимость от времени наземной концентрации на расстояниях 10 м (1), 20 м (2) и 40 м (3) от наземного источника.

нейного источника, действовавшего в течение 20 секунд, показана на рис. 1 (расчеты были выполнены при следующих значениях параметров:  $u_1=2$  м/с,  $k_1=0,2$  м/с,  $h=50$  м).

При  $x > x_*$  соотношения (18) приводят к нереально большим значениям коэффициента турбулентности, скорости ветра или толщины приземного слоя воздуха. Поэтому для расчета уравнения огибающей распределений наземной концентрации нужно анализировать на экстремум решения уравнения (2), перебирая различные реальные комбинации метеорологических параметров, определяющих его коэффициенты. Однако легко понять, что величина экстремума, найденного при учете реально существующих ограничений на метеоусловия, может быть только меньше, чем рассчитанная по формулам (18) или (23), которые характеризуют «глобальный» максимум концентраций (без учета добавочных связей). Поэтому можно быть уверенными, что при любых расстояниях  $x$  и временах диффузии  $t$ , для которых метеорологические условия и характеристики выброса остаются постоянными, соотношения (20) и (23) дают оценку сверху величины наземных концентраций от точечного и линейного источников соответственно.

Остановимся теперь на практическом использовании полученных результатов. В силу математической стилизации задачи (аппроксимации реального источника идеально точечным) полученные решения не описывают фактическое поле концентраций в источнике, поскольку обращаются в этой точке в бесконечность. Однако реальные концентрации в источнике, как правило, весьма высоки и поэтому нормирование выброса из наземных источников связано с определением ширины санитарно-защитной зоны  $l$ , вне которой и должно быть обеспечено выполнение гигиенических стандартов, т. е. условие  $q \leq \text{ПДК}$ , где ПДК — предельно допустимая концентрация данной примеси в атмосферном воздухе.

Из (20) для точечного источника мощности  $M$  получим

$$l = \left( \frac{AMT}{\text{ПДК}} \right)^{1/3}, \quad (27)$$

где под  $T$  для непрерывных источников следует понимать максимальное время сохранения неблагоприятных метеоусловий в данном пункте.

Аналогично для линейного источника получим

$$l = \left( \frac{A'MT}{\text{ПДК}} \right)^{1/2}. \quad (28)$$

При заданной ширине санитарно-защитной зоны можно нормировать мощность выброса от точечного источника из условия

$$M \leq \frac{\text{ПДК} \cdot l^3}{AT}. \quad (29)$$

Аналогичное соотношение для линейного источника имеет вид

$$M \leq \frac{\text{ПДК} \cdot l^2}{A'T}. \quad (30)$$

В заключение следует подчеркнуть, что приведенные в работе значения констант  $A$  и  $A'$  являются оценочными и могут быть уточнены по результатам численных расчетов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Берлянд М. Е. Современные проблемы атмосферной диффузии и загрязнения атмосферы. Л., Гидрометеиздат, 1975. 448 с.
2. Берлянд М. Е. К теории турбулентной диффузии. — «Тр. ГГО», 1963, вып. 139, с. 31—37.
3. Марчук Г. И. Методы вычислительной математики. Новосибирск, «Наука», 1975. 381 с.

*М. Е. Берлянд, Е. Л. Генихович, М. Н. Зашихин,  
Р. И. Оникул*

## **К ОЦЕНКЕ ОПАСНЫХ СКОРОСТЕЙ ВЕТРА ДЛЯ ВЫСОКИХ ИСТОЧНИКОВ**

Основным принципом ограничения промышленных выбросов в атмосферу является их нормирование по максимально возможным в приземном слое концентрациям при неблагоприятных условиях погоды [1]. В связи с этим в действующих строительных нормах по расчету загрязнения атмосферы [4] одним из главных показателей является максимальная приземная концентрация  $c_m$ , которая достигается при неблагоприятных метеорологических условиях, в том числе при некотором значении скорости ветра  $u_m$ . Поскольку  $u_m$  соответствует наибольшей концентрации, ее принято называть опасной скоростью ветра. Часто наряду с максимально возможной концентрацией  $c_m$  требуется одновременное указание расстояния  $x_m$  от источника, к которому эта концентрация относится. Существенно и определение максимально возможных концентраций на разных расстояниях от источника в первую очередь по оси факела. В [2] излагаются основные особенности определения этих величин для наземных источников.

В настоящей работе рассчитываются скорости ветра  $u_{mx}$ , опасные на заданных расстояниях от высоких источников, и соответствующие им максимальные концентрации  $c_{mx}$ . Рассматривается также случай большого числа источников выброса. Для него до настоящего времени расчеты величин концентраций производились при среднезвешенной опасной скорости ветра  $u_{мс}$  и ряде других значений скорости ветра в возможном интервале ее изменения. После этого во внимание принималось максимальное из найденных в каждой точке значений [1, 4]. Такой подход нашел сравнительно широкое применение при проектных расчетах в связи с возрастающим распространением ЭВМ [3]. Точность вычислений при этом зависит от величин скоростей ветра, выбранных для расчета, или, как говорят, от перебора скоростей ветра. Если перебор не производится и расчеты выполняются при одной скорости ветра  $u_{мс}$ , то оценка поля максимальных концентраций иногда оказывается весьма приближенной. Детальный перебор скорости ветра также не всегда желателен, ибо связан с непроизводительными затратами машинного времени. Ниже предлагается способ проведения расчетов

при модифицированной средневзвешенной опасной скорости ветра  $u_{мхс}$ , вычисляемой отдельно для каждой выбранной точки местности. Из выполненных оценок следует, что найденное при этом поле концентраций с достаточной точностью характеризует поле максимальных концентраций.

В случае одиночного источника основной интерес представляет распределение максимальных концентраций вдоль оси факела в зависимости от метеорологических условий. Для его нахождения при применении [4] главным образом необходимо учесть возможные изменения скорости ветра  $u$ , поскольку при выводе расчетных формул уже учтено сочетание диффузионных факторов, соответствующее неблагоприятным условиям стратификации атмосферы [1]. Остановимся на вопросах расчета максимальной концентрации  $c_{мх}$ , относящейся к расстоянию  $x$  от источника и соответствующей скорости ветра  $u_{мх}$ . Исследуем для этого на экстремум по скорости ветра  $u$  приведенные в [4] аппроксимационные формулы для приземной концентрации  $c$  на оси факела при неблагоприятных погодных условиях:

$$c = s_1 c_{ми}; c_{ми} = r c_m; x = p x_m, \quad (1)$$

где  $c_{ми}$  — максимальная приземная концентрация, достигающаяся на расстоянии  $x_{ми}$  от источника. Безразмерные коэффициенты  $r$  и  $p$  определяются по величине безразмерного отношения  $\frac{u}{u_m}$ , а безразмерный коэффициент  $s_1$  при  $u = u_m$  находится по отношению  $\frac{u}{u_m}$ , а при  $u \neq u_m$  — по  $\frac{x}{x_{ми}}$ .

Область изменения отношения  $\frac{u}{u_m}$  ограничена и зависит от климатологических данных о скорости ветра и характерных значений  $u_m$ , определяющихся, в свою очередь, значениями параметров выброса источника.

С учетом этого из структуры формул (1) следует, что

$$u_{мх} = f_1 u_m; c_{мх} = f_2 c_m, \quad (2)$$

где безразмерные коэффициенты  $f_1$  и  $f_2$  зависят только от одного отношения  $\frac{x}{x_m}$ . Они определялись при предположении, что реально возможно изменение  $\frac{u}{u_m}$  в пределах от 0,25 до 10.

Формулу для  $c_{мх}$  удобно преобразовать к виду

$$c_{мх} = s_1 \cdot \tilde{s}_1 c_m, \quad (3)$$

где  $s_1$  определяется по  $\frac{x}{x_m}$  с помощью приведенных в [4] формул;  $\tilde{s}_1$  находится по этому же аргументу и характеризует отличия между распределениями концентраций  $c_{мх}$  и  $c|_{u=u_m}$ , вычисленными соответственно при скоростях ветра  $u_{мх}$  и  $u_m$ .

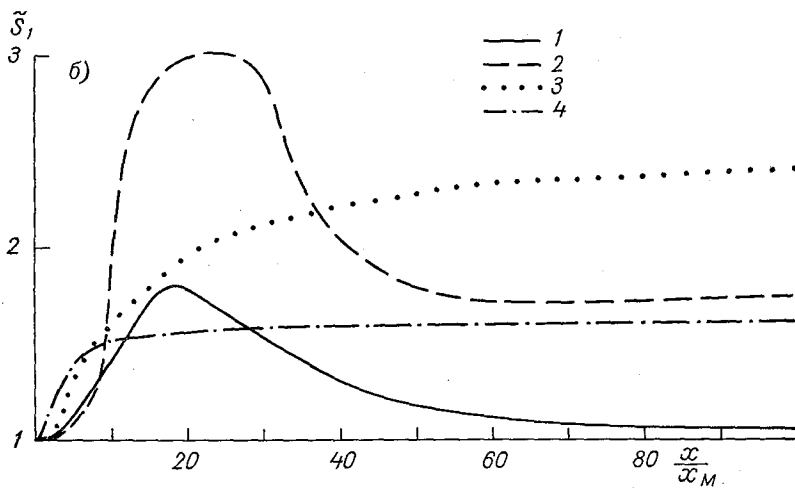
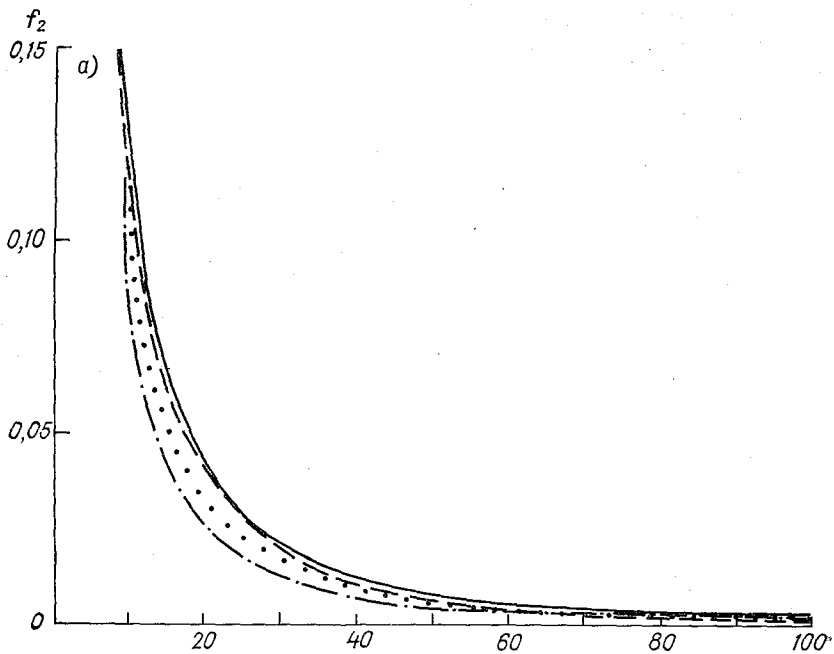


Рис. 1. Зависимость функций  $f_2$  и  $\tilde{s}_1$  от  $\frac{x}{x_M}$ .

1 — легкая примесь [4]; 2 — тяжелая примесь [4]; 3 — легкая примесь, аналитическое решение, неустойчивая стратификация; 4 — легкая примесь, аналитическое решение, равновесная стратификация.

коэффициент  $\bar{s}_1$  для тяжелой примеси примерно в 1,6 раза больше, чем для легкой.

С ростом величины  $\frac{x}{x_M}$  существенно изменяется также характер зависимости концентрации от скорости ветра. На рис. 2 для разных  $\frac{x}{x_M}$  представлены зависимости отношений  $\frac{c}{c_{Mx}}$  от  $\frac{u}{u_M}$ . Как и по функциям  $f_1$ ,  $f_2$  и  $\bar{s}_1$ , отличия между легкой и тяжелой примесями начинаются с  $\frac{x}{x_M} > 8$ . Оказывается, что при малых  $\frac{x}{x_M}$  отчетливо выражен максимум концентрации при  $u = u_M$ . На больших удале-

Таблица 1

| $\frac{x}{x_M}$          | Диапазоны $u/u_M$ |           |
|--------------------------|-------------------|-----------|
|                          | 1-й               | 2-й       |
| Легкая и тяжелая примеси |                   |           |
| 0,5                      | 0,65—1,5          | —         |
| 1,0                      | 0,6—1,9           | —         |
| 4,0                      | 0,6—3,8           | —         |
| 5,5                      | 0,25—0,5          | 0,6—5,5   |
| 8,0                      | 0,25—0,5          | 0,8—10,0  |
| Легкая примесь           |                   |           |
| 25                       | 0,25—0,35         | 4,5—10,0  |
| 60                       | 0,25—0,40         | 0,65—10,0 |
| 100                      | 0,25—0,40         | 0,6—10,0  |
| Тяжелая примесь          |                   |           |
| 25                       | 0,25—0,30         | 0,8—10,0  |
| 40                       | 0,25—0,35         | 3,0—10,0  |
| 100                      | 0,25—0,35         | 2,5—10,0  |

ниях от источника зависимость концентрации от скорости ветра ослабевает и, как правило, становится бимодальной. В последнем случае целесообразнее устанавливать один или два диапазона примерно одинаково опасных скоростей ветра, а не одну опасную скорость ветра  $u_{Mx}$ . Это видно и из табл. 1, в которой для разных  $x/x_M$  указаны диапазоны изменения  $u/u_M$ , где концентрации отличаются от  $c_{Mx}$  не более чем на 25%. Для  $x \geq 5,5 x_M$  характерно наличие двух таких диапазонов. Первый из них относится к слабым ветрам и большей частью весьма узок:  $u = (0,25 \div 0,5) u_M$ . Второй диапазон существенно шире. При  $x \leq 8 x_M$  он начинается

с  $u = (0,6 \div 0,8) u_M$  и достигает  $u = (5,5 \div 10) u_M$ . Поскольку на таких расстояниях один из диапазонов включает  $u_M$ , то здесь концентрация  $c|_{u=u_M}$  близка к  $c_{Mx}$ . При  $x = 8 x_M$   $c|_{u=u_M}$  меньше  $c_M$  уже примерно в 8 раз. Поэтому в настоящей работе в первую очередь уточняется характер убывания расчетных концентраций на достаточных удалениях от источника. В результате несколько увеличивается концентрация по сравнению с  $c|_{u=u_M}$ . В случае мощных источников типа тепловых электростанций исследуемые эффекты проявляются на больших расстояниях, для которых оценка загрязнения воздуха необходима сравнительно редко. Так, при высоте труб  $H = 200$  м  $x_M \approx \approx 4$  км, в связи с чем  $c_{Mx}$  заметно больше  $c|_{u=u_M}$  только при  $x > 30$  км. В то же время для невысоких источников, например для вентиляционных труб с  $x_M \approx 100 \div 200$  м,  $c_{Mx}$  существенно превышает  $c_M$  уже



при  $x > 1$  км. Это позволяет на основании расчетов  $c_{\max}$  существенно точнее установить необходимые санитарные разрывы между предприятиями и населенными пунктами.

При  $u_m < 2$  м/с на расстояниях  $x$ , где коэффициент  $f_1 = 0,25$ , формально оказывается, что  $u_{\max} < 0,5$  м/с. Однако согласно [1, 4], расчетные скорости ветра, близкие к штилю, рассматривать не рекомендуется, так как они сравнительно редко наблюдаются при опасной для выбросов из труб неустойчивой стратификации. Поэтому в таких случаях в качестве  $u_{\max}$  следует принимать  $u \geq 0,5$  м/с, которой соответствует наибольшая расчетная концентрация.

В случае большого числа источников, обобщая [4], можно ввести модифицированную средневзвешенную опасную скорость ветра  $u_{\max c}$  для оценки максимальной концентрации в фиксированных точках местности, в том числе на больших удалениях от предприятий и в крупных городах

$$u_{\max c} = \frac{\sum_{i=1}^N u_{\max} \cdot c_{\max i}}{\sum_{i=1}^N c_{\max i}}, \quad (5)$$

где  $N$  — число источников, находящихся с наветренной стороны от расчетной точки,  $u_{\max i}$  и  $c_{\max i}$  — опасные скорости ветра и максимальные концентрации на расстоянии  $x_i$  вдоль ветра между источниками и расчетной точкой.

Анализ структуры (5), а также вычисления с ее использованием показали, что на малых расстояниях от источников получаются примерно такие же результаты, как и при применении  $u_{\max}$  [1, 4]. На больших расстояниях определение расчетных скоростей ветра по (5) дает примерно такое же поле максимальных концентраций, как и при наиболее трудоемком детальном переборе скоростей ветра.

Учет полученных результатов о зависимости опасных скоростей ветра от удаления от источников и координат расчетных точек полезен также при анализе связей между фактическими концентрациями в городе и скоростью ветра в целях изучения и прогнозирования состояния загрязнения воздуха. В случае преобладания в городе рассредоточенных по большой территории мелких источников, очевидно, что при суперпозиции их факелов должны проявиться в первую очередь закономерности, свойственные для больших удалений от источников. Этим, вероятно, объясняется, в частности, экспериментальное обнаружение рядом исследователей наличия двух опасных диапазонов скоростей ветра.

В [1] приведено аналитическое решение уравнения турбулентной диффузии от точечного источника легкой примеси. Оно получено для случая линейного роста с высотой  $z$  вертикальной составляющей коэффициента турбулентной диффузии  $k_z = k_1 z$ , а также сте-

пенного возрастания по вертикали скорости ветра  $u = u_1 z^n$  и горизонтальной составляющей этого коэффициента  $k_y = \varphi_0^2 \chi u$ , где  $\varphi_0$  — дисперсия пульсаций направления ветра. Поскольку эта модель обычно характерна для приземного слоя атмосферы, то ее можно использовать при небольших расстояниях от сравнительно невысоких источников. Исследования на основе этой модели весьма интересны, так как при этом описанные выше эффекты, если они имеют место, должны проявиться в чистом виде без определенных погрешностей, характерных для численного решения уравнения турбулентной диффузии, а также возникающих при аппроксимации его результатов.

Формулу для расчета приземной концентрации  $q$  запишем в виде, аналогичном (1)

$$q = q_m s_1 \left( \frac{x}{x_m} \right), \quad (6)$$

где

$$q_m = \frac{2\sqrt{2}(1+n)^3 KM}{e^2 \sqrt{\pi} u_1 (H + \Delta H)^{2(1+n)}}; \quad x_m = \frac{\alpha}{2};$$

$$\alpha = \frac{u_1 (H + \Delta H)^{1+n}}{(1+n)^3 k_1}; \quad s_1(\xi) = \frac{e^{-\frac{2(\xi-1)}{\xi}}}{\xi^2}; \quad (7)$$

$K = \frac{k_1}{u_1 \varphi_0}$  — комбинация параметров атмосферной диффузии,  $M$  — мощность источника.

Для расчета эффективного подъема источника  $\Delta H$  используем ту же формулу, что и при разработке [4], которая пригодна во всех случаях, кроме интенсивной температурной инверсии над источником [1]. Ее удобно записать в следующем виде:

$$\Delta H = H \left( 0,2 \frac{v_m^3 \sqrt{f}}{u_1} + 0,05 \frac{v_m^3}{u_1^3} \right), \quad (8)$$

где

$$v_m = 2,1 \sqrt[3]{\frac{g}{T} \frac{V_1 \Delta T}{H}}, \quad f = 34 \frac{T}{g} \frac{\omega_0^2 D}{H^2 \Delta T}. \quad (9)$$

Здесь  $g$  — ускорение силы тяжести,  $T$ ,  $\Delta T$ ,  $V_1$  и  $\omega_0$  — температура, перегрев, объем и скорость выходящих дымовых газов,  $D$  — диаметр устья источника.

Используем для входящих в (7) комбинаций диффузионных параметров  $K$  и  $\frac{u_1}{k_1}$  аппроксимации, характеризующие их возможные

неблагоприятные сочетания при неустойчивой стратификации атмосферы

$$K = K_0 \left( \frac{u_{10}}{u_1} \right)^{n_1}; \quad \frac{u_1}{k_1} = \left( \frac{u_1}{k_1} \right)_0 \left( \frac{u_1}{u_{10}} \right)^{n_1 + \frac{1}{2}}, \quad (10)$$

где  $K_0 = 0,5$ ,  $\left( \frac{u_1}{k_1} \right)_0 = 20$ ,  $u_{10} = 2$  м/с,  $n_1 = \frac{1}{2 \left[ 1 + \left( 2 \frac{u_1}{u_{10}} \right)^2 \right]}$ .

Эти соотношения, использовавшиеся и при разработке [4], были получены на основе анализа экспериментального материала по  $k_1$  и  $\varphi_0$  с учетом закономерностей асимптотического поведения этих характеристик при слабых и сильных скоростях ветра [1]. Поэтому, так же как и в [1, 4], при переходе от фиксированных метеословий к неблагоприятным заменим обозначение  $q$  на  $c$ . Было проведено исследование на экстремум формулы (6) при учете (8) и (10), полностью аналогичное выполненному выше по формулам (4) и подтвердившее наличие зависимости  $f_1$ ,  $f_2$  и  $\bar{s}_1$  от  $\frac{x}{x_m}$ . В рассматриваемом случае эти коэффициенты зависят также от параметров  $V_m$  и  $f$ . На рис. 1 в качестве примера представлены коэффициенты  $f_2$  и  $\bar{s}_1$  для  $V_m = 0,5$  м/с и  $f = 10$ .

На небольших расстояниях от источника изучаемые эффекты в обеих моделях проявляются сходным образом. На значительных расстояниях они характеризуются существенными различиями. В связи с этим здесь необходимо пользоваться результатами исследования более общих формул [4], основанных на численном решении уравнения турбулентной диффузии при логарифмическом росте скорости ветра с высотой и схеме «с изломом» для коэффициента  $k_z$  [1].

Аналогичное исследование было выполнено и для случая равновесной стратификации, когда диффузионные параметры зависят только от скорости ветра  $u_1$  и шероховатости подстилающей поверхности  $z_0$ . Так,  $k_1 = \frac{\kappa^2 u_1}{\ln z_1/z_0}$ , где  $\kappa$  — постоянная Кармана. Изменчивость  $\varphi_0$  при нейтральной стратификации невелика и для ее учета использовались результаты обработки экспериментальных данных, выполненной В. П. Грачевой [1]. Величина  $\Delta H$ , как и ранее, рассчитывалась по (8). Выяснилось, что в данных условиях при малых  $x$  опасны сильные скорости ветра, которым соответствует интенсивный турбулентный перенос примеси от источника к подстилающей поверхности. С увеличением расстояний коэффициент  $f_1$  быстро убывает, а  $\bar{s}_1$  — возрастает. При расстояниях, в несколько раз превышающих  $x_m$ ,  $f_1$  и  $\bar{s}_1$ , выходят на асимптотические значения, зависящие от величин параметров  $v_m$  и  $f$ . На рис. 1 для примера представлены функции  $f_2$  и  $\bar{s}_1$  при  $v_m = 0,5$  м/с и  $f = 10$ .

Показано, что значения опасной скорости ветра могут изменяться в зависимости от расстояния до источника. Различия между кон-

центрациями, относящимися к этим опасным скоростям ветра, и концентрациями, рассчитанными при одинаковой опасной скорости ветра  $u_m$ , невелики до весьма значительных расстояний  $x \approx 8 x_m$ . На больших удалениях возрастает различие между  $u_{mx}$  и  $u_m$ , а также соответствующими им концентрациями. Учет полученных результатов наиболее существен в случае большого числа мелких источников.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Берлянд М. Е. Современные проблемы атмосферной диффузии и загрязнения атмосферы. Л., Гидрометеониздат, 1975, с. 448.
2. Берлянд М. Е., Генрихович Е. Л., Оникул Р. И. К нормированию выбросов от наземных источников. — См. наст. сборник.
3. Зашихин М. П., Канчан Я. С., Оникул Р. И. Об унификации расчетов загрязнения атмосферы от многих источников с помощью ЭВМ. — «Тр. ГГО», 1975, вып. 325, с. 161—173.
4. Указания по расчету рассеивания в атмосфере вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий, СН 369-74. М., Стройиздат, 1975. 41 с.

*М. Е. Берлянд, Р. И. Оникул*

## **К ПРОВЕРКЕ И СОПОСТАВЛЕНИЮ МЕТОДОВ РАСЧЕТА РАССЕИВАНИЯ ПРИМЕСЕЙ**

1. Применение методов расчета загрязнения атмосферы дает возможность оптимально определить рациональный и экономически наиболее выгодный комплекс мероприятий, обеспечивающий необходимую чистоту воздушного бассейна, рационально установить соотношение достигших сейчас очень больших масштабов капитальных и эксплуатационных затрат на дымовые трубы и газоочистку. В настоящее время во многих странах предложен ряд схем для расчета концентрации примесей. Вместе с тем большей частью они недостаточно обоснованы для широкого внедрения в практику. Имеется весьма мало утвержденных государственными органами методов. В СССР к ним относятся разработанные ГГО при участии ряда технических и гигиенических институтов Указания [4], которые являются дальнейшим развитием [2, 3]. Методические указания [2—4] утверждены правительственными органами. В настоящее время использование [4] является обязательным при проектировании и эксплуатации всех предприятий, выбрасывающих вредные вещества в атмосферу. Они основаны на результатах обширных теоретических исследований, обобщенных в [1], а также подтверждены на обширном опытном материале более 20 крупных экспедиций.

Учитывая универсальность предложенной методики расчета загрязнения атмосферы и возможность ее использования в различных странах, представляет естественный интерес проверить результаты расчета и на данных зарубежных экспериментов. К одним из наиболее полных материалов такого рода, включающих результаты измерений характеристик выброса, полей концентраций, а также метеорологических элементов, относится комплекс работ, выполненный в США по специальной программе в районе тепловых электростанций (ТЭС), расположенных сравнительно недалеко от Питтсбурга. Представляется также целесообразным сопоставить некоторые основные результаты расчетов по методике [4] и другим наиболее распространенным в США методикам. Этим вопросам и посвящена данная работа.

Указанная программа наблюдений в США, рассчитанная на 5 лет, была начата осенью 1967 г. и относилась к комплексу мощных ТЭС, расположенных на расстоянии нескольких десятков километров друг от друга. Наиболее полный материал был получен в районе ТЭС Кейстоун, установленная мощность которой составляет 1800 МВт. Наблюдения проводились месячными сериями примерно по две серии в год. Во время серий наблюдения в основном велись ежечасно. Наибольший объем измерений концентраций сернистого газа на высотах был выполнен с помощью вертолетов.

Для проверки расчетной методики главное значение имеют данные измерений на высоте 0,15 м средних за 30 минут концентраций сернистого газа, определявшихся по методу Веста-Гейке с помощью 10 переносных приборов. Параллельно с измерениями концентраций детально изучались выбросы сернистого газа и другие параметры выбросов, велись метеорологические и аэрологические наблюдения.

2. ТЭС Кейстоун была первой в создаваемом в районе Питтсбурга крупнейшем в США энергетическом комплексе. В 1967 г. здесь был пущен первый блок, подключенный к одной трубе. Зимой 1968-69 г. вступил в действие второй однотипный блок. Временами выбросы осуществлялись через две трубы высотой  $H=244$  м и диаметром устья  $D=8,3$  м. Однако в большинстве случаев выбросы осуществлялись в одну из двух труб. Как в случае работы одного (любого), так и двух блоков максимальные нагрузки не зависели систематически от температуры окружающего воздуха, т. е., иначе говоря, не имели сезонного и годового ходов. При работе одного блока максимальная нагрузка составляла примерно 900—950 МВт, при работе двух блоков — 1800—1850 МВт. В интервале температур 0—25°C, на который приходится подавляющее число наблюдений, мощность ТЭС изменялась в широком диапазоне. При работе одного блока она снижалась иногда до 400 МВт, при работе двух блоков — до 800 МВт (крайне редко 500—600 МВт).

Сернистость используемого угля  $S^p$  изменялась незначительно в пределах 2,1—2,4%. Это обусловило тесную связь выбросов сернистого газа  $M_{SO_2}$  (г/с) с нагрузкой на один блок (МВт). Корреляционная зависимость между этими параметрами представлена на рис. 1 а.

Поскольку количество подаваемого в топку воздуха в первую очередь обусловлено количеством кислорода, необходимым для полного сгорания топлива, то такая же тесная связь наблюдается между нагрузкой и скоростью выхода  $\omega$  м/с дымовых газов (рис. 1 б) и однозначно связанным с ней объемом дымовых газов  $V_1$  м<sup>3</sup>/с.

Существенно зависит от нагрузки перегрев дымовых газов  $\Delta T$  (рис. 1 в). Расчеты производились по формулам из [4]. Максимальная приземная концентрация  $c_m$  мг/м<sup>3</sup> при достаточно часто встречающихся неблагоприятных метеорологических условиях, относя-

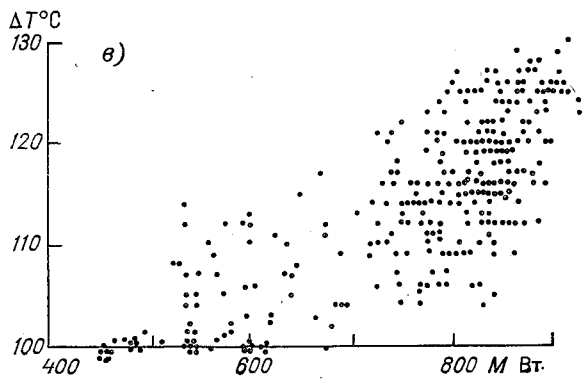
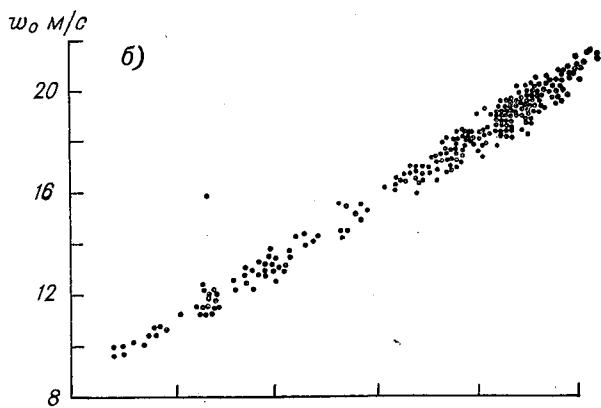
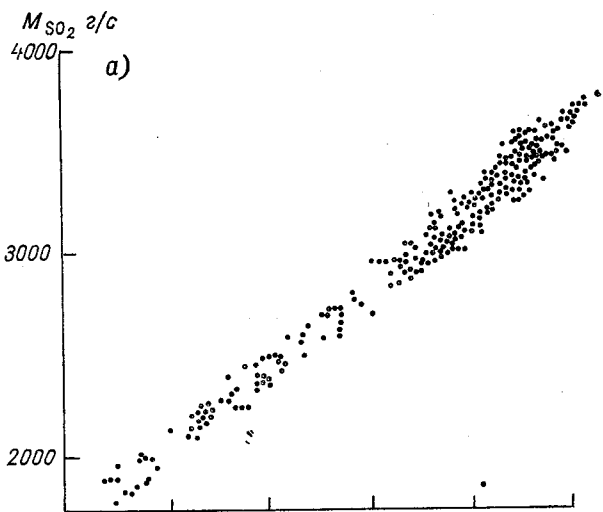


Рис. 1.

щаяся к 20-минутному периоду осреднения, для газовых примесей определялась по формуле

$$c_m = \frac{AMmn}{H^2} \sqrt{\frac{N}{V\Delta T}} \quad (1)$$

Здесь  $M$  и  $V$  — суммарное количество примесей (г/с) и объем газов ( $\text{м}^3/\text{с}$ ), выбрасываемые в единицу времени в  $N$  труб высотой  $H$  м,  $\Delta T$  — перегрев дымовых газов ( $^{\circ}\text{C}$ ).

В формуле для расчета  $c_m$  коэффициент  $A$  определяет влияние вертикального и горизонтального перемешивания в атмосфере на рассеивание примесей; по территории СССР его значения изменяются от 120 до 240  $\text{с}^{2/3} \cdot (^{\circ}\text{C})^{1/3} \cdot \text{мг} \cdot \text{г}^{-1}$ . Опасная скорость ветра  $u_m$  на высоте 10 м определяется по формулам,

$$\begin{aligned} u_m &= v_m, \text{ при } 0,5 \text{ м/с} < v_m \leq 2 \text{ м/с}, \\ u_m &= v_m(1 + 0,12\sqrt{f}) \text{ при } v_m > 2 \text{ м/с}, \end{aligned} \quad (2)$$

где

$$\begin{aligned} f &= 10^3 \frac{w_0^2 D}{H^2 \Delta T}, \\ v_m &= 0,65 \sqrt[3]{\frac{V \Delta T}{NH}}. \end{aligned}$$

Значение  $c_m$  достигается на расстоянии  $x_m$ :

$$x_m = dH. \quad (3)$$

Коэффициенты  $m$ ,  $n$  и  $d$  определяются также через параметры  $f$  и  $v_m$  с помощью специальных графиков или интерполяционных формул.

В [1] имеются также формулы для расчета наибольших концентраций при разных расстояниях  $x$  от источника и скоростях ветра  $u$ , в соответствии с которыми проведены расчеты концентраций сернистого газа при работе одного блока в режимах максимальной (950 МВт) и минимальной (450 МВт) нагрузок.

При расчетах коэффициент  $A$ , характеризующий неблагоприятность климатических условий, принимался равным 200 по аналогии с областями СССР, имеющими сходные климатические условия и расположенными на той же широте.

Параметры ТЭС Кейстоун для двух предельных режимов нагрузки на одну трубу и соответствующие им величины  $c_m$  и  $u_m$  представлены в табл. 1. Здесь проявляется весьма общий и интересный эффект, имеющий место при изменении нагрузок на одну трубу. Он заключается в том, что несмотря на весьма широкий диапазон изменения параметров ТЭС величина  $c_m$  при этом изменяется сравнительно мало. Это обусловлено в первую очередь компенсацией влияния увеличения  $M_{\text{SO}_2}$  за счет возрастания однозначно связанного с нею объема газов  $V_1$ , а также некоторого увеличения  $\Delta T$ . Этот эффект, в частности, может проявляться в случае регулирования



выбросов при опасных метеорологических условиях, существенно снижая его эффективность. Как показывают расчеты, вблизи ТЭС снижение нагрузок может даже привести к увеличению загрязнения атмосферы. Более эффективно осуществлять при неблагоприятных метеоусловиях замену топлива, например переходить с сернистого топлива на природный газ.

При анализе опытных данных было важно оценить характерную величину фонового загрязнения атмосферы  $c_{\text{ф}}$ , в первую очередь от расположенного в 80 км от ТЭС к западо-юго-западу Питтсбурга

Таблица 1

Параметры ТЭС Кейстоун при работе одного блока в разных режимах нагрузки

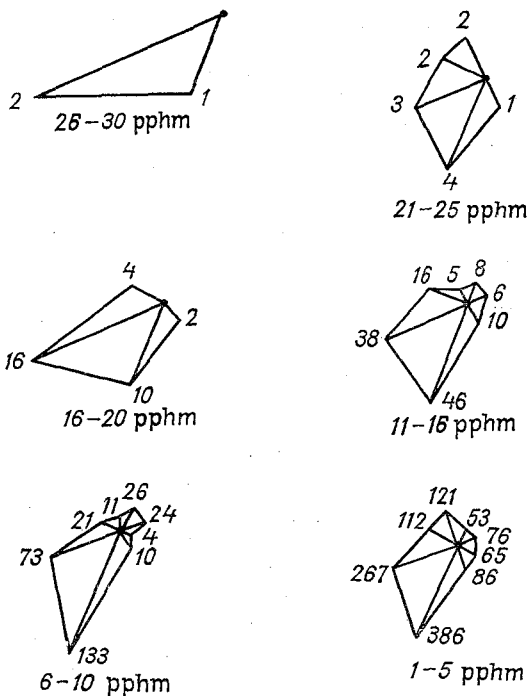
| Параметр  | Режим                |                       |
|---|----------------------|-----------------------|
|   | минимальной нагрузки | максимальной нагрузки |
| Нагрузка (МВт) . . . . .  | 450                  | 950                   |
| Выброс сернистого газа $M_{\text{SO}_2}$ (г/с) . . . . .                          | 1900                 | 3900                  |
| Скорость выхода дымовых газов $w_0$ (м/с) . . . . .                               | 10                   | 22                    |
| Объем дымовых газов $V_1$ (м <sup>3</sup> /с) . . . . .                           | 540                  | 1200                  |
| Перегрев дымовых газов $\Delta T$ (°C) . . . . .                                  | 110                  | 135                   |
| Максимальная приземная концентрация $c_{\text{м}}$ (мг/м <sup>3</sup> ) . . . . . | 0,18                 | 0,24                  |
| Опасная скорость ветра $u_{\text{м}}$ (м/с) . . . . .                             | 4,3                  | 6,2                   |
| Расстояние $x_{\text{м}}$ (м) . . . . .   | 3900                 | 5000                  |

(центр черной металлургии США), являющегося крупным источником выброса сернистого газа в атмосферу. Для этой цели была выполнена следующая обработка экспериментальных данных. Все отобранные пробы на сернистый газ независимо от расстояний, условий погоды и выбросов, к которым они относятся, были разбиты по встречающимся значениям концентраций на следующие группы\*: 1—5, 6—10, 11—15, 16—20, 21—25 и 26—30 ppht. Отдельно для каждой группы было рассчитано число случаев с направлением ветра на высоте 250 м, приходящимся в момент отбора проб на следующие секторы: 0—45, 45—90, 90—135, 135—180, 180—225, 225—270, 270—315, 315—360°.

На основе такой обработки построены так называемые розы загрязнения воздуха, характеризующие как относительный, так и абсолютный вклад различных направлений ветра в данном интервале

\* Концентрации рассматриваются в тех же единицах (1 ppht—одна часть сернистого газа на 100 млн. частей воздуха, равная 0,028 мг/м<sup>3</sup>), что и в [5].

загрязнения воздуха (рис. 2). Из рассмотрения этого рисунка выявляется, что наибольшие концентрации в подавляющем числе случаев отмечаются при переносе примерно со стороны г. Питтсбурга. Это свидетельствует о существенном вкладе фона в измеренные концентрации под дымовым факелом ТЭС.



Масштаб: 1 см - 20%

Рис. 2.

На основании проведенной обработки можно заключить, что максимальное значение фоновой концентрации  $c_f$  составляет примерно 10 ppht (около  $0,3 \text{ мг/м}^3$ ). Максимальное же значение приземной концентрации  $c_m$  под факелом ТЭС после исключения  $c_f$  при неблагоприятных метеорологических условиях следует оценить примерно в 20 ppht (около  $0,55 \text{ мг/м}^3$ ). Максимальная нагрузка ТЭС в период отбора проб составляла 1850 МВт, при этом значения  $M_{so}$ ,  $\omega_0$  и  $\Delta T$  составляли соответственно 7600 г/с, 23 м/с и  $140^\circ\text{C}$ . При этих значениях параметров выбросов рассчитанное значение  $c_m$  составляет около  $0,44 \text{ мг/м}^3$ , что достаточно хорошо согласуется с ее экспериментальным значением (в пределах погрешности 25%). Можно заметить, что и без исключения  $c_f$  превышения измеренной концентрации над рассчитанной  $c_m$  при полной нагрузке ТЭС оказываются весьма редкими. Так, в пределах 25%-ного превышения

над рассчитанным значением  $c_m$  оказалось всего около 1% проб, а более высокие концентрации встречались еще реже.

В табл. 2 отдельно для случаев работы одного и двух блоков и для разных расстояний от ТЭС приведены экспериментальные максимальные концентрации, а также число проб для каждой дистанции. Из этой таблицы также видно, что концентрации в пределах 20—30 ррhm, по существу, высказывают из общего распределения

Таблица 2

Максимальные концентрации  $c$  (ррhm) на разных расстояниях от ТЭС Кейстоун

| Расстояние,<br>км | Один блок  |     | Два блока  |     |
|-------------------|------------|-----|------------|-----|
|                   | Число проб | $c$ | Число проб | $c$ |
| 2                 | 36         | 13  | —          | —   |
| 3                 | 6          | 8   | —          | —   |
| 4                 | 51         | 10  | 26         | 14  |
| 5                 | 69         | 8   | 46         | 17  |
| 6                 | 138        | 11  | 32         | 12  |
| 7                 | 274        | 15  | 68         | 11  |
| 8                 | 303        | 22  | 37         | 15  |
| 9                 | 372        | 30  | 51         | 14  |
| 10                | 340        | 30  | 71         | 15  |
| 11                | 144        | 19  | 66         | 14  |
| 12                | 59         | 12  | 37         | 7   |
| 13                | 74         | 25  | 51         | 19  |
| 14                | 52         | 11  | 71         | 12  |
| 15                | 36         | 12  | 66         | 5   |
| 16                | 46         | 11  | 19         | 7   |

концентраций и, видимо, наблюдаются при существенном вкладе фоновое загрязнение атмосферы. Следует обратить внимание на то, что число проб, отобранных при работе двух блоков, невелико, в результате чего снижается статистическая достоверность выводов для этих условий работы ТЭС.

Сопоставим далее рассчитанные по [4] изменения концентраций в зависимости от расстояния до ТЭС при максимальной нагрузке и неблагоприятных метеорологических условиях с экспериментальными данными. Заметим, что рассчитанные по [4] концентрации, относящиеся к 20-минутному интервалу времени, на основании известных результатов [1] можно сопоставлять с результатами измерений средних за 30 минут концентраций, не производя дополнительного пересчета и не вводя поправок, учитывающих различие во времени осреднения.

При обработке разобьем данные на две группы в зависимости от числа работающих блоков. Для более детальной группировки возможности не имелось.

Для каждой дистанции рассчитывалось максимальное значение концентрации  $c$ , соответствующее достаточно часто встречающимся неблагоприятным метеорологическим условиям. О согласовании расчетов с экспериментом можно говорить, когда превышение расчетной концентрации не наблюдается или наблюдается весьма ред-

Таблица 3

Повторяемость (%) концентраций различных градаций по отношению к рассчитанным ее величинам  $c$ . ТЭС Кейстоун

| Расстояние,<br>км | Число<br>проб | Градации |             |              |               |             |        |
|-------------------|---------------|----------|-------------|--------------|---------------|-------------|--------|
|                   |               | $<0,5 c$ | $(0,5-1) c$ | $(1-1,25) c$ | $1,25-1,5) c$ | $(1,5-2) c$ | $>2 c$ |
| Один блок         |               |          |             |              |               |             |        |
| 2-3               | 42            | 60       | 22          | 7            | 2             | 7           | 2      |
| 4-7               | 532           | 84       | 11          | 3            | 1             | 1           | 0      |
| 8-10              | 1015          | 61       | 23          | 7            | 3             | 4           | 2      |
| 11-14             | 329           | 42       | 42          | 7            | 3             | 3           | 3      |
| 15-21             | 147           | 51       | 41          | 1            | 2             | 4           | 1      |
| Два блока         |               |          |             |              |               |             |        |
| 4-6               | 104           | 84       | 16          | 0            | 0             | 0           | 0      |
| 7-8               | 105           | 94       | 6           | 0            | 0             | 0           | 0      |
| 9-11              | 188           | 89       | 10          | 1            | 0             | 0           | 0      |
| 12-13             | 35            | 71       | 20          | 3            | 3             | 3           | 0      |
| 14-16             | 32            | 69       | 28          | 2            | 1             | 0           | 0      |

ко и когда в значительном числе случаев измеренные концентрации близки к рассчитанным значениям  $c$ , например находятся в пределах  $(0,5-1) c$ . На этом основании были выделены интервалы: до  $0,5 c$ ,  $(0,5-1) c$  и  $(1-1,25) c$ . Результаты обработки представлены в табл. 3. Они свидетельствуют о достаточно удовлетворительном согласовании данных расчетов и экспериментов. Так, при работе двух блоков примерно из 500 проб величина  $c$  превышает только в пяти пробах,  $1,25 c$  — в двух пробах,  $1,5 c$  — лишь в одной пробе.

Наиболее подробный материал наблюдений относится к случаям работы одного блока (более 2000 проб). Из них расчетные максимальные концентрации не превышались примерно в 80—95% случаев, а в пределах точности расчетного метода (25%) — 90—98% случаев. Выполненный анализ показал, что в тех сравнительно редких случаях, когда измеренные концентрации превышали расчетные, отчетливо проявлялся вклад фонового загрязнения при ветрах со стороны Питтсбурга.

Как показали расчеты, расстояния  $x_m$ , где достигаются максимальные концентрации сернистого газа  $c_m$ , составляют 4—5 км. Однако на этих расстояниях число отобранных проб невелико по сравнению с их общим числом. Это не позволяет сделать достаточно достоверных выводов о согласовании рассчитанных и измеренных значений.

Более строго определяется зона, где расчетные концентрации изменяются в пределах от  $0,5 c_m$  до  $c_m$ . Ее границы, по расчетам, простираются примерно от 1 до 15 км. Фактическая зона с такими концентрациями при работе одного и двух блоков ТЭС начинается

Таблица 4

Повторяемость (%) концентраций с различных градаций по отношению к рассчитанным ее величинам. ТЭС Хамер Сити

| Расстояние, км | Число проб | Градации |             |             |             |
|----------------|------------|----------|-------------|-------------|-------------|
|                |            | $<0,5 c$ | $(0,5-1) c$ | $(1-1,5) c$ | $(1,5-2) c$ |
| 2—3            | 56         | 71       | 25          | 4           | 0           |
| 4—7            | 50         | 90       | 10          | 0           | 0           |
| 8—10           | 124        | 75       | 25          | 0           | 0           |
| 11—14          | 102        | 59       | 39          | 2           | 0           |
| 15—18          | 77         | 16       | 65          | 12          | 7           |

от самых ближних дистанций (2—3 км), где производились измерения, и достигает 17 км. Расчетная  $u_{н}$  в зависимости от условий работы ТЭС изменялась в пределах 4—6 м/с. Фактически же наибольшие концентрации наблюдались также при близких значениях скоростей ветра. Следовательно, можно заметить, что по различным показателям сравнение рассчитанных и опытных данных дало удовлетворительные результаты.

3. ТЭС Хамер Сити является второй в создаваемом в районе Питтсбурга энергетическом комплексе. Поскольку опубликованы результаты лишь для введенного в 1969 г. ее первого блока, анализ проводился только по сравнительно небольшому объему данных. Выбросы ТЭС осуществлялись через одну трубу высотой 244 м и диаметром устья 7,3 м. Используемая аппаратура и программа наблюдений были такими же, как и при обследовании ТЭС Кейстоун. Вероятно, и  $c_f$  влияло примерно так же, поскольку эти ТЭС расположены сравнительно близко.

При максимальной нагрузке ТЭС Хамер Сити, соответствующей выбросу сернистого газа около 3000 г/с, расчеты по методике [4] показали, что  $c_m = 0,21$  мг/м<sup>3</sup>,  $u_m = 3,5$  м/с и  $x_m = 4700$  м.

В табл. 4 приведены результаты обработки данных для ТЭС Хамер Сити, аналогичной той, которая была представлена в табл. 3 для ТЭС Кейстоун. Очевидно, что результаты расчетов и измерений находятся в удовлетворительном согласовании.

ние  $A$  принимается равным 0,2 преимущественно для азиатской территории. Значения  $u_m$  по [6] примерно на 50% больше, чем по формуле (4) из [4]. Следовательно, для мощных тепловых электростанций опасная скорость ветра  $u_m$  вместо 5—6 м/с по [4] при использовании [6] будет примерно 7—9 м/с, что, по имеющимся у нас экспериментальным данным, представляется существенно завышенными значениями.

Методика расчета, близкая к изложенной в [6], представлена в гл. 3 работы [8]. Здесь для расчета концентраций от источника с фиксированной высотой используется частный вид формулы (5), предложенной ранее Сеттоном, соответствующий  $\sigma_y = \frac{c_y}{\sqrt{2}} x^{1-\frac{n}{2}}$ ;  $\sigma_z = \frac{c_z}{\sqrt{2}} x^{1-\frac{n}{2}}$  (параметр  $n$  определяется на основании данных об изменении скорости ветра с высотой).

Эффективная высота подъема  $\Delta H$ , в отличие от [6], определялась по формуле

$$\Delta H = \frac{400F_0}{u^3}. \quad (9)$$

Эта формула по своей структуре близка к второму члену формулы для  $\Delta H$ , использованной при разработке методики [4], которую можно записать в следующем виде:

$$\Delta H = 1,9 \frac{w_0 D}{H} + \frac{5F}{u^3}. \quad (10)$$

Представляется, однако, что коэффициент 400 в формуле (9) весьма завышен, поскольку он не соответствует имеющимся экспериментальным данным.

Если формулы из [8] преобразовать так же, как это было сделано с формулами из [6], то можно получить формулы, соответственно эквивалентные (1), (2) или (7):

$$c_m = \frac{0,0065 M}{H^{5/3} (F_0)^{1/3}}, \quad \bar{u}_m = 2,74 \sqrt[3]{\frac{V \Delta T}{NH}}. \quad (11)$$

Для  $c_m$  при высотах  $H = 100 \div 200$  м снова получается формула типа (8), но с коэффициентом 0,16. Наибольшие отличия наблюдаются в численном коэффициенте для опасной скорости ветра  $u_m$ . Опасные скорости ветра в данном случае еще более завышены, чем при использовании [6]. Для мощной ТЭС они составляют около 20 м/с, что является существенно завышенным значением.

В [8] отмечается, что рассчитанные по формуле (11) значения  $c_m$  согласуются с данными измерений максимальных концентраций сернистого газа вокруг ряда ТЭС, расположенных в долине р. Тенесси. Отсюда можно заключить, что и данные расчета по формуле (1) будут близки к экспериментально измеренным значениям.

В заключение остановимся на формулах, представленных в [7]. Для расчета концентраций от источника фиксированной эффективной высоты здесь используется приведенная выше формула (4) с примерно такими же коэффициентами. Для  $\Delta H$  в [7] принимается формула Холланда:

$$\Delta H = \frac{w_0 D}{u} \left( 1,5 + 0,0027 p \frac{\Delta T}{T} D \right), \quad (12)$$

где  $p$  — атмосферное давление в миллибарах.

Для практического использования в [7] дан график зависимости величины  $\frac{cu}{M}$  от эффективной высоты источника  $H + \Delta H$ . Если для каждой эффективной высоты источника выбрать максимальное значение  $\left( \frac{cu}{M} \right)_m$ , то по этим данным может быть записана следующая интерполяционная формула:

$$c_m = \frac{0,052M}{u(H + \Delta H)^{1,67}}. \quad (13)$$

Из соотношения  $\frac{\partial c_m}{\partial u} = 0$  можно аналогично изложенному выше найти, что

$$c_m = \frac{0,0168M}{w_0 D (1,5 + 0,01 \Delta T D) H^{0,67}}. \quad (14)$$

Формула (14) имеет иную структуру, чем (1), (7) и (8). Поэтому ее сопоставление с формулами из [4] должно состоять в рассмотрении различных вариантов расчетов. Некоторые из таких расчетов были выполнены в США Фоксом и Ширмейером, которые отметили определенную близость рассчитанных по формулам (1) и (7) значений максимальных концентраций.

Изложенные результаты показывают возможность согласования методов расчета, используемых в СССР и США, и выработки общих подходов для дальнейшего их развития.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Берлянд М. Е. Современные проблемы атмосферной диффузии и загрязнения атмосферы. Л., Гидрометеиздат, 1975. 448 с.
2. Временная методика расчета рассеивания в атмосфере выбросов (зола и сернистых газов) из дымовых труб электростанций. «Тр. ГГО», 1965, вып. 172, с. 205—212.
3. Указания по расчету рассеивания в атмосфере вредных веществ (пыли и сернистого газа), содержащихся в выбросах промышленных предприятий. СН 369—67. Л., Гидрометеиздат, 1967. 46 с.
4. Указания по расчету рассеивания в атмосфере вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий. СН 369-74, М., Стройиздат, 1975. 41 с.

5. Large Power Plant effluent study (LAPPES) (ed. F. A. Shiermeier and L. E. Niemeier) V. 1 (1968), V. 2 (1967, 1969). Raleigh, North Carolina, 1970.
6. Recommended Guide for prediction of the dispersion of airborne effluent (second edition). The American Society of Mechanical Engineers New York, N. 4, 1973.
7. Workbook of Atmospheric Dispersion Estimates (D. B. Turner ed.) U. S. Department of Health, Education, and Welfare "Cincinnati", Ohio, 1969.
8. Метеорология и атомная энергия (пер. с англ.). Л., Гидрометеиздат. 1971. 648 с.



*Е. Л. Генихович, С. С. Чичерин*

### **К СРАВНЕНИЮ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТА ВЕРТИКАЛЬНЫХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ КОНЦЕНТРАЦИИ ПРИМЕСИ С ДАННЫМИ ИЗМЕРЕНИЙ**

В Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова выполнен обширный цикл исследований, посвященных развитию теории турбулентной диффузии примесей в атмосфере. Эти исследования, результаты которых суммированы в монографии [1], привели к созданию методики расчета рассеяния промышленных выбросов от высотных источников [2]. Теоретические модели, положенные в основу расчетной схемы, неоднократно проверялись на обширном экспериментальном материале. В частности, в работе [3] такая проверка проводится на основе анализа данных о наземных концентрациях примеси, полученных в ходе эксперимента, проводившегося вблизи мощных тепловых электростанций Кейстоун и Хамер Сити [6]. Поскольку комплекс наблюдений включал также определение вертикального профиля концентрации примеси, эти данные можно использовать для более детальной проверки схемы расчета вертикального распределения концентраций, изложенной в [1]. Подробная характеристика эксперимента содержится в [6].

Измерительная аппаратура для исследования вертикального распределения сернистого газа была установлена на вертолете, который на расстояниях 4,10 и 16 км от источника производил полеты на различных высотах в направлении, перпендикулярном оси дымового факела. Мгновенные значения концентрации примеси регистрировались с интервалом 6 секунд, а затем интегрировались вдоль траектории полета. Время осреднения для интегральной концентрации при измерениях составляло 2—3 минуты, т. е. соответствовало времени осреднения для уравнения диффузии от линейного источника. Поскольку определенные таким способом интегральные величины удовлетворяют этому уравнению, целесообразно ограничиться сопоставлением расчетных и экспериментальных значений концентрации примеси от линейного источника (т. е. интегральных концентраций от точечного источника). Такой подход позволяет не рассматривать турбулентную диффузию по горизонтали и тем самым сократить число входных параметров, причем

информация о характере вертикального распределения примеси вблизи точечного источника полностью сохраняется.

Заметим, что задача о рассеянии примеси от линейного источника имеет и самостоятельное значение. Экспериментальная проверка развитых в ГГО методов расчета распространения примеси от линейного источника уже проводилась в [4]. Однако в этой работе не учитывался начальный подъем (поскольку источник примеси был пассивным), а сопоставление проводилось главным образом для наземных концентраций.

В соответствии с [1] расчет интегральных концентраций  $q$  от точечного источника проводился на основе численного решения уравнения диффузии

$$u \frac{\partial q}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial z} k_z \frac{\partial q}{\partial z} \quad (1)$$

с краевыми условиями

$$\begin{aligned} q|_{x=0} &= \frac{Q}{u} \delta(z-H), \\ k_z \frac{\partial q}{\partial z} \Big|_{z=0} &= 0, \\ q|_{z \rightarrow \infty} &\rightarrow 0. \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь  $u$  — скорость ветра,  $k_z$  — коэффициент вертикального турбулентного обмена,  $Q$  — мощность и  $H$  — высота источника; ось  $x$  направлена по ветру, ось  $z$  — по вертикали.

Для скорости ветра  $u(z)$  и коэффициента турбулентного обмена  $k_z$  были использованы следующие модели:

$$u = u_1 \frac{\ln \frac{z+z_0}{z_1+z_0}}{\ln \frac{z_0}{z_1+z_0}}, \quad (3)$$

$$k_z = \begin{cases} k_1(z+z_1) & \text{при } z \leq h, \\ k_1(h+z_0) & \text{при } z > h, \end{cases} \quad (4)$$

где  $z_0$  — параметр шероховатости,  $u_1$  — скорость ветра на фиксированном уровне  $z_1$ . Коэффициент турбулентности  $k_1$  на уровне  $z_1 = 1$  м и высота приземного слоя  $h$  определялись в соответствии с [1, 5] по измеренным профилям скорости ветра и температуры с учетом соотношения

$$h = 0,1 \frac{k_1}{f} \quad (5)$$

(здесь  $f$  — параметр Кориолиса). Реальный профиль скорости ветра аппроксимировался выражением (3) так, чтобы на уровне высоты дымовой трубы расчетная скорость ветра совпадала с фактической. Поскольку выбрасываемые в атмосферу дымовые газы имели

перегрев  $\Delta T$  и начальную скорость выброса  $w_0$ , то для расчета начального подъема  $\Delta H$  использовалась формула из [1]

$$\Delta H = 3,75 \frac{w_0 R_0}{u_{\text{фл}}} + 4,95 \frac{g}{T} \frac{w_0 R_0^2 \Delta T}{u_{\text{фл}}^3}, \quad (6)$$

где  $R_0$  — радиус дымовой трубы, а  $u_{\text{фл}}$  — скорость ветра на высоте флюгера.

Приведенная схема определения  $k_z$  применима в том случае, когда температура воздуха монотонно изменяется с высотой. Поэтому для сравнения с результатами расчетов были отобраны данные измерений, проводившихся в отсутствии приподнятых инверсий температуры (таких случаев оказалось сравнительно немного, так как большая часть полетов производилась в период от 6 до 8 часов по местному времени). При отборе экспериментального материала ставилось также требование стационарности источника выброса и наличия синхронных измерений метеорологических параметров. В результате из 175 вертикальных профилей концентрации, относящихся к периоду с марта по ноябрь 1968 г., было выбрано 25 профилей, соответствовавших случаям, когда действовал только один источник выброса, причем скорость ветра на высоте, равной высоте дымовой трубы, была больше 2,5 м/с.

В течение эксперимента параметры источника (мощность и скорость выброса) не оставались постоянными. Значения мощности колебались в пределах 2000—4000 г/с, скорость выброса варьировалась в пределах 11—22 м/с. При этом максимальные по вертикали концентрации изменялись следующим образом: от 423 до 2378 мг/м<sup>2</sup> на дистанции 4 км, от 884 до 2169 мг/м<sup>2</sup> на дистанции 10 км, от 414 до 1611 мг/м<sup>2</sup> на дистанции 16 км.

В качестве основных характеристик для сопоставления измеренных и рассчитанных вертикальных распределений концентрации были выбраны максимальные (по вертикали) значения концентраций  $q_m$ , а также высоты  $z_m$ , на которых были отмечены эти максимумы. Для не очень больших расстояний от источника главным фактором, определяющим положение максимума по вертикали, является высота источника. Значение же концентрации в этом максимуме (при заданных скоростях ветра и расстоянии от источника) зависит главным образом от значения коэффициента турбулентности  $k_z$ . Поэтому имеется возможность независимо оценить применимость, с одной стороны, модели (4)—(5) для определения профиля коэффициента турбулентного обмена  $k_z$  в пограничном слое атмосферы и, с другой стороны, формулы (6) для начального подъема факела  $\Delta H$ .

Для анализа использовались не сами концентрации, а отношения измеренных и рассчитанных значений  $q_m$  и  $z_m$  для каждого отобранных случаев. Результаты обработки указанной выборки приведены в табл. 1. Учитывая недостаточную надежность определения профилей концентрации в ходе эксперимента (в особенности, как отмечают авторы [6], высоты дымового факела), а также из-

вестную стилизованность расчетной схемы, такое согласие следует считать хорошим.

Если принять во внимание также результаты работы [4], то можно сделать вывод, что изложенная расчетная схема пригодна для определения актуальных концентраций на различных удалениях от источника и при различных значениях определяющих метеорологических параметров  $u_1$  и  $k_1$ , которые могут быть рассчитаны по результатам градиентных наблюдений в приземном слое воздуха.

Таблица 1

| Дистанция,<br>км | $q_M^{\text{изм}}/q_M^{\text{расч}}$ |                               | $z_M^{\text{изм}}/z_M^{\text{расч}}$ |                               |
|------------------|--------------------------------------|-------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------|
|                  | среднее значение                     | среднеквадратичное отклонение | среднее значение                     | среднеквадратичное отклонение |
| 4                | 1,31                                 | 0,43                          | 0,74                                 | 0,13                          |
| 10               | 0,89                                 | 0,31                          | 0,66                                 | 0,09                          |
| 16               | 1,09                                 | 0,32                          | 0,59                                 | 0,28                          |

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Берлянд М. Е. Современные проблемы атмосферной диффузии и загрязнения атмосферы. Л., Гидрометеоиздат, 1975. 448 с.
2. Указания по расчету рассеивания вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий. СИ 369-74. М., Стройиздат, 1975. 41 с.
3. Берлянд М. Е., Оникул Р. И. К проверке и сопоставлению методов расчета рассеивания примесей. — См. наст. сб.
4. Дунский В. Ф., Нездурова И. С., Оникул Р. И. О расчете рассеивания оседающей примеси от линейного источника в пограничном слое атмосферы. — «Тр. ГГО», 1968, вып. 207, с. 28—37.
5. Берлянд М. Е., Генихович Е. Л. Особенности турбулентной диффузии и загрязнение воздуха в условиях стратифицированной атмосферы. Международный симпозиум по стратифицированным течениям. Новосибирск, Изд. ВЦ СО АН СССР, 1972.
6. Schiermeier F. A., Niemeyer L. E. Large power plant effluent study (LAPPES). U. S. Department of health, education, and welfare. Raleigh, North Carolina, June 1970, 410 p.

*Б. Б. Горошко, Л. Р. Сонькин*

## **ВОПРОСЫ ОРГАНИЗАЦИИ РАБОТ ПО ЗАЩИТЕ АТМОСФЕРЫ ОТ ЗАГРЯЗНЕНИЯ В ПЕРИОДЫ НЕБЛАГОПРИЯТНЫХ МЕТЕОУСЛОВИЙ**

Загрязнение приземного слоя воздуха, которое создается в результате выбросов вредных веществ промышленными предприятиями, тепловыми электростанциями и транспортом, в сильной степени зависит от метеорологических условий. По этому вопросу выполнены работы как теоретического, так и экспериментально-статистического плана [ 1, 2, 3, 4, 5 и др.]. В них показано, что в зависимости от метеорологических факторов при одних и тех же объемах выбросов в атмосферу уровень загрязнения воздуха может сильно изменяться. Учет этого обстоятельства дает возможность уменьшить вредное влияние загрязнения атмосферы, если в периоды опасных условий погоды будут проводиться мероприятия по сокращению выбросов вредных веществ. Такие мероприятия уже сейчас в ряде случаев предусматриваются при проектировании и строительстве новых предприятий.

Учитывая, что в работах по прогнозированию опасных метеорологических условий загрязнения воздуха и регулированию выбросов в атмосферу могут принимать участие различные организации, необходима разработка условий, которые регламентировали бы действия этих организаций. Кроме того, известно, что подобные работы до настоящего времени не производились и в силу их новизны требуется сформулировать основные положения и обязанности ведомств и предприятий, участвующих в работах по защите атмосферы в неблагоприятные периоды. В связи с этим были подготовлены Правила, регламентирующие работу предприятий для предотвращения опасного загрязнения воздуха в районах их расположения в периоды неблагоприятных метеорологических условий. При их составлении была поставлена задача отразить основные моменты, относящиеся к прогнозу опасных условий загрязнения и к регулированию выбросов. Правила составлены в Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова при участии Института прикладной геофизики, Института общей и коммунальной гигиены им. А. Н. Сысина АМН СССР, Научно-исследовательского института

промышленной и санитарной очистки газа и Всесоюзного научно-исследовательского института стандартизации.

Правила включают в себя восемь разделов: 1. Общие положения; 2. Метеорологические условия, способствующие возникновению высокого уровня загрязнения в районе расположения одиночных источников; 3. Метеорологические условия высокого фонового загрязнения воздуха по городу в целом; 4. Прогнозирование загрязнения воздуха от одиночных источников; 5. Прогнозирование загрязнения воздуха по городу в целом; 6. Составление предупреждений об опасном уровне загрязнения; 7. Регулирование выбросов в периоды неблагоприятных метеорологических условий; 8. Обязанности лиц, участвующих в работах по сокращению выбросов в периоды неблагоприятных метеорологических условий.

Рассмотрим основные принципиальные положения, включенные в Правила. При этом не будем останавливаться на вопросах самого прогнозирования, поскольку результаты этих работ уже опубликованы [6, 7 и др.]. Укажем только, что в связи с достаточно четким выделением двух основных составляющих концентраций примесей в городском воздухе Правилами предусматриваются два вида прогнозов загрязнения воздуха: от отдельных крупных объектов и по городу в целом.

Для случая крупного одиночного источника основной характеристикой является расчетная максимальная концентрация  $c_m$ , которая предсказывается для случаев, когда ожидается опасная скорость ветра  $u_m$  в сочетании с повышенным турбулентным обменом в нижнем слое атмосферы. Если предполагается наступление аномально опасных метеорологических условий [1, 2], то прогнозируется концентрация  $q$  большая, чем  $c_m$ . Так, при наличии над источником нижней границы приподнятой инверсии прогностическое  $q$  в 1,5—2 раза превышает  $c_m$ . При отсутствии ветра у земли и скорости, близкой к опасной, на высоте выбросов (1,5—2  $u_m$ , имея в виду логарифмический ход скорости ветра с высотой) ожидаемая концентрация примерно в 2 раза будет больше  $c_m$ . Если согласно прогнозу ожидается одновременное осуществление обоих указанных выше условий, то в районе источников с горячими выбросами предсказывается  $q$  в 3—4 раза, а в районе источников с холодными выбросами — в 5—6 раз и более превышающая  $c_m$ .

При прогнозировании высокого уровня загрязнения воздуха по городу в целом величины концентраций предсказываются, исходя из того, что в большинстве своем они должны превышать 1,5 среднесезонных значений [7], а их максимальные значения должны быть близки к наибольшим концентрациям, измеренным в течение данного сезона.

Оказалось целесообразным учитывать два критических уровня концентраций. Первый из них соответствует тем величинам концентраций, которые прогнозируются для данного конкретного случая при возникновении неблагоприятных метеороусловий. Таким образом, этот критический уровень отличается для разных городов и объектов. При таком подходе появляется возможность ликвида-

ции случаев относительно самого высокого загрязнения воздуха, что, очевидно, представляет наибольший практический интерес. Второй критический уровень концентрации соответствует более опасному уровню загрязнения воздуха. Он одинаков для различных городов. Его учет означает принятие более эффективных мер по защите атмосферы в тех районах, где в целом наблюдается сильное загрязнение воздушного бассейна.

Главной задачей прогнозирования загрязнения воздуха является предотвращение опасного скопления примесей в приземном слое атмосферы. Поэтому интерес представляют прогнозируемые значения концентраций, которые в опасных случаях должны быть снижены. Этот подход отличается от принятого в некоторых зарубежных странах, где тревога объявляется только тогда, когда концентрации примесей достигают определенных значений [8, 9 и др.]. Данные об измеренном загрязнении воздуха являются основанием для передачи потребителям предупреждений в следующих трех случаях: 1) когда принимаемые меры по защите атмосферы являются недостаточно эффективными и, несмотря на составленное предупреждение, измеренные концентрации превышают критический уровень; 2) когда высокие концентрации примесей не были заблаговременно предсказаны; 3) когда интенсивное загрязнение воздуха создается в неопасной метеорологической ситуации за счет резкого увеличения количества поступающих в атмосферу выбросов.

При обслуживании отдельных объектов прогнозы и предупреждения составляются и передаются потребителям при угрозе возникновения опасных концентраций примесей в приземном слое атмосферы. Городское фоновое загрязнение воздуха (по городу в целом) предсказывается ежедневно. При этом оказалось целесообразным составлять два вида прогнозов: предварительные и уточненные. Предварительные прогнозы даются на сутки вперед, уточненные — на 6—8 часов: утром — на текущий день, в конце дня — на вечер и на ночь. Потребителям сообщаются оба указанных выше вида прогнозов только тогда, когда ожидается высокое загрязнение воздуха.

В соответствии с разработками и с имеющимся опытом прогнозистической работы предлагается составление трех видов предупреждений об опасном загрязнении воздуха, относящихся как к случаям одиночных источников, так и к городу в целом. В Правилах, регламентирующих работу предприятий в периоды особо неблагоприятных метеословесий, предусматривается следующая система составления и передачи предупреждений.

Первый вид предупреждения для отдельных объектов передается при возникновении угрозы, но не раньше, чем за 24 часа до ожидаемого роста концентраций. По городу в целом данный вид предупреждения составляется, когда по предварительному прогнозу ожидается высокое загрязнение воздуха. В соответствии с таким предупреждением усиливается контроль за выбросами и за соблюдением технологии.

Второй вид предупреждения для отдельных источников передается непосредственно перед наступлением опасных условий; по городу в целом он составляется вместе с уточненным прогнозом, когда предсказывается высокое загрязнение воздуха. Одновременно на объекты сообщается о необходимости выполнения мероприятий по сокращению выбросов.

Третий вид предупреждения составляется при тех же условиях, что и второй, в случае, когда ожидается, что прогнозируемая концентрация будет превышать чрезвычайно опасный уровень. При таком предупреждении для обеспечения эффективного снижения загрязнения воздуха допускается сокращение производства.

Если после передачи предупреждения второго вида обнаруживаются концентрации, достигающие или превышающие прогностические, а в соответствии с прогнозом ожидается сохранение неблагоприятных метеоусловий не менее, чем в течение двух часов, то составляется предупреждение третьего вида. В случае когда после передачи предупреждения третьего вида обнаруживается весьма опасный уровень загрязнения воздуха, прогностическое подразделение должно информировать об этом соответствующие органы, контролирующие организации, а также объекты, ответственные за рост концентраций. При этом принимаются все возможные меры для снижения содержания примесей в воздухе, вплоть до прекращения работы предприятий, автотранспорта и др.

Если при отсутствии предупреждения о возможном росте загрязнения воздуха измеренные концентрации достигают или превышают значения, характерные для неблагоприятных метеоусловий, потребителям дается оповещение, соответствующее предупреждению второго вида. В случае когда при этом обнаруживается весьма опасный уровень загрязнения воздуха, должно передаваться оповещение, соответствующее предупреждению третьего вида.

Большое место в Правилах уделяется вопросам регулирования вредных выбросов в атмосферу в период опасных метеорологических условий. При этом под регулированием выбросов в атмосферу понимается их сокращение в неблагоприятные периоды с целью уменьшения концентраций примесей в приземном слое атмосферы. Проведение таких мероприятий дает возможность предотвращать случаи наиболее сильного загрязнения воздуха.

В настоящее время получен большой материал от многих промышленных и энергетических объектов о разработанных мерах по кратковременному сокращению выбросов. Анализ этого материала показал, что мероприятия могут быть подразделены на общие, которые применяются на всех отраслях промышленности, и частные (специфические), относящиеся к отдельным отраслям, а также к конкретным предприятиям. В Правилах более детально рассмотрены общие мероприятия, поскольку они могут быть рекомендованы для повсеместного использования. Специфические меры приводятся только в виде примеров. Это вполне оправдано, так как в силу специфики производства в различных отраслях промышленности и на каждом отдельном объекте централизованно разрабатывать эти



вопросы не представляется целесообразным. Предусматривается, чтобы предприятия разрабатывали частные мероприятия исходя из местных условий.

Разработка мер по кратковременному сокращению выбросов осуществляется в отраслевых институтах и непосредственно на предприятиях, являющихся источником загрязнения воздуха. К мероприятиям предъявляются требования, чтобы они были практически выполнимыми, достаточно эффективными и чтобы они составлялись с учетом возможностей и специфики конкретных промышленных предприятий, электростанций, котельных и автотранспорта. Регулирование выбросов рекомендуется осуществлять в основном без сокращения производства. К мероприятиям, приводящим к уменьшению выбросов за счет сокращения производства, прибегают только в тех случаях, когда создается угроза возникновения весьма опасного уровня загрязнения воздуха. Для более четкой организации работ по регулированию Правила обязывают предприятия иметь карту контроля за выбросами вредных веществ в атмосферу, на которую наносятся все источники выбросов, как предусмотренные технологическими процессами, так и наиболее вероятные при нарушении технологических процессов; выхода аппаратуры и установок из строя и т. д. На ней также указывается расположение газоочистного и пылеулавливающего оборудования и показывается динамика снижения или увеличения выбросов в атмосферу с указанием причины этого изменения.

Для контроля эффективности мер по обеспечению чистоты воздуха в периоды опасных метеоусловий важным является проведение дополнительных наблюдений за загрязнением воздуха под факелами объектов и на стационарных пунктах города. Такие наблюдения проводят химлаборатории гидрометеослужбы и промышленных предприятий, осуществляющих выбросы вредных веществ в атмосферу.

Работы по прогнозированию загрязнения воздуха и кратковременному сокращению выбросов в неблагоприятные периоды предусматриваются совместными приказами Главного управления гидрометеослужбы при СМ СССР и промышленных министерств. В настоящее время уже издано шесть таких приказов, на основании которых предлагается осуществление мероприятий по регулированию выбросов на 211 объектах, расположенных в 102 городах страны. В дополнение к этим приказам принимаются решения горисполкомов, которыми, исходя из местных условий, может быть значительно расширен список предприятий, привлекаемых к выполнению мероприятий по кратковременному сокращению выбросов в периоды неблагоприятных метеоусловий. Этими решениями устанавливается порядок взаимодействия между прогностическим центром и предприятиями и определяется организация, которая осуществляет контроль за выполнением мероприятий по сокращению выбросов в атмосферу.

Таким образом, в Правилах обобщены основные метеорологические условия, способствующие повышению уровней загрязнения

атмосферы в районах промышленных предприятий и на территории города. Определены основные особенности, которые необходимо учитывать при прогнозировании опасных условий загрязнения атмосферы в районах расположения различных источников и по городу в целом. Разработана схема передачи прогнозов потребителям и перечень мер, осуществляемых организациями гидрометеослужбы и предприятиями, которые привлечены к работам по регулированию выбросов. Правила должны выполнять роль основного документа по прогнозированию и уменьшению загрязнения воздуха выбросами предприятий в периоды неблагоприятных метеорологических условий. При их составлении были учтены научно обоснованные рекомендации по прогнозированию загрязнения атмосферы, разработанные в Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова, и возможные варианты регулирования выбросов вредных веществ в атмосферу, разработанные совместно с отраслевыми институтами ВНИПИЧерметэнергоочистка НИПИотстром, ВНИПИ-нефть, Гипрокаучук, ВАМИ, трестом ОРГХИМ.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Берлянд М. Е. и др. Численное исследование атмосферной диффузии при нормальных и аномальных условиях. — «Тр. ГГО», 1964, вып. 158, с. 22—32.
2. Берлянд М. Е. Об опасных условиях загрязнения атмосферы промышленными выбросами. — «Тр. ГГО», 1966, вып. 185, с. 15—25.
3. Горошко Б. Б. Некоторые особенности распространения примесей в районе одиночных источников — «Тр. ГГО», 1975, вып. 325, с. 116—125.
4. Иванов А. И., Сонькин Л. Р. Прогнозирование загрязнения воздуха в Ленинграде с учетом особенностей синоптических процессов. — «Тр. ГГО», 1975, вып. 352, с. 71—77.
5. Указания по расчету рассеивания в атмосфере вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий. СИ 369-74. М., Стройиздат, 1975. 41 с.
6. Берлянд М. Е. и др. О прогнозировании загрязнения воздуха. — «Метеорология и гидрология», 1972, № 9, с. 11—18.
7. Сонькин Л. Р. Вопросы прогнозирования фонового загрязнения воздуха в городах. — «Тр. ГГО», 1974, вып. 314, с. 42—51.
8. Guide for Control of air pollution episodes in medium-sized urban areas. U. S. Environment protection agency 1971. 55 p.
9. Thomas A., Glenn J. Regional Air Pollution Warning System J. of APCA, 1968, v. 16, N 1.

*Р. А. Першина, Л. Р. Сонькин*

## **ВОЗМОЖНОСТИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ВОЗДУХА В ГОРОДЕ МЕТОДОМ ЛИНЕЙНОГО РЕГРЕССИОННОГО АНАЛИЗА**

Результаты анализа материалов наблюдений во многих городах Советского Союза показывают, что зависимости между концентрациями примесей в приземном слое атмосферы и метеорологическими параметрами являются весьма сложными и неоднозначными. Вследствие воздействия ряда различных факторов на уровень загрязнения атмосферы связи между концентрациями и отдельными элементами погоды часто могут не обнаруживаться вообще. Последнее, однако, не означает, что отсутствует влияние того или иного метеорологического фактора на уровень концентраций, а указывает лишь на то обстоятельство, что при анализе фактических данных это влияние не прослеживается из-за действия других причин. В ряде случаев зависимости выявляются, если материалы обрабатывались не в целом, а при определенных метеорологических ситуациях. Например, связь между концентрациями и скоростью ветра более четко обнаруживается, если ее анализировать отдельно при наличии приземных инверсий и при их отсутствии. Существенно, что в разных ситуациях характер связей может быть различным.

Отмеченные особенности повышают требования к использованию статистических методов для разработки схем прогнозирования загрязнения воздуха. Очевидна необходимость учета нескольких влияющих факторов одновременно. В определенной степени этого удалось добиться в ранее выполненных работах, где для прогноза использовались схема множественной графической регрессии [2, 3] и один из вариантов метода распознавания образов [1].

В отдельных случаях достаточно эффективной может быть прогностическая схема, составленная по методу линейной регрессии. По такому методу Сладек [5] разработал схему прогнозирования концентраций сернистого газа в воздухе для промышленной области в Северной Чехии. Анализ материалов производился отдельно для четырех типов погоды, выделенных в зависимости от направления переноса примесей (со стороны промышленных объектов или в об-

выше  $P'$ , тем больше следует ожидать уровень атмосферного загрязнения  $P$ .

Следующим по значимости предиктором загрязнения атмосферы является перепад температуры воздуха в пограничном слое ( $r_{P, \Delta T} = -0,44$ ). Влияния же предикторов  $T_0$  и  $v_{0,5}$  оказались существенно меньшими. Поэтому в рассматриваемом случае целесообразно ограничиться двумя предикторами.

Уравнение принимает вид

$$P = -0,014 + 0,719P' - 0,006 \Delta T. \quad (1)$$

Существенно заметить, что предикторы  $P'$  и  $\Delta T$  между собой коррелированы слабо ( $r_{P', \Delta T} = -0,22$ ).

При прогнозировании важно выявить, при каких же условиях уровень загрязнения может повыситься или же останется без изменений по сравнению с предшествовавшим ему периодом. Последнее определяется условием  $\tilde{P} - P' \geq 0$ . Применительно к уравнению (1) это условие, как легко заметить, будет выполнено, если

$$P' \leq -0,05 - 0,021 \Delta T. \quad (2)$$

На рис. 1 представлены области значений  $\Delta T$  и  $P'$ , указывающие, в каких случаях зимой следует ожидать увеличение загрязнения атмосферы в Чите, а при каких, наоборот, ее понижение.

Рассмотрим оправдываемость прогнозов в соответствии с ранее предложенным способом их оценки [4]. В работе [4] учитывается

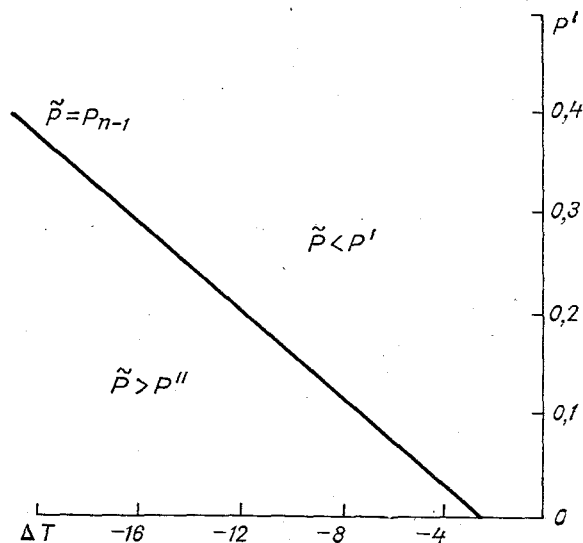


Рис. 1. График для прогноза изменения уровня загрязнения воздуха  $P$  в зависимости от разности температур  $\Delta T$  (между уровнями земли и 500 м) и величины параметра  $P$  в предшествующий день  $P'$ .

прогноз не величины параметра  $P$ , а осуществления одной из трех групп загрязнения воздуха: а) высокого (1-я группа) —  $P > 0,35$ , б) повышенного (2-я группа) —  $0,20 < P \leq 0,35$  и в) относительно пониженного (3-я группа) —  $P \leq 0,20$ . Испытание предлагаемой схемы проведено на независимом материале зимнего сезона 1970-71 г. Из 35 прогнозов оправдалось 28 (80%). Следует отметить успешность прогнозов высокого загрязнения воздуха ( $P > 0,35$ ), которые представляют наибольший интерес с точки зрения практической зашиты атмосферы. По материалам всех трех зимних сезонов составлено восемь прогнозов этого сравнительно редкого явления (повторяемость 12%), из которых оправдались шесть.

По-видимому, метод линейного регрессионного анализа может успешно применяться для прогноза загрязнения городского воздуха в зимний сезон в первую очередь в сибирских городах.

Нами здесь рассматривался один из простейших вариантов регрессионного анализа — линейная регрессия. Привлечение же аппарата регрессионного анализа в его более общем виде, вероятно, расширит наши представления о возможностях статистического прогнозирования загрязнения атмосферы.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Генихович Е. Л., Гушин В. А., Сонькин Л. Р. О возможности прогноза загрязнения городского воздуха методом распознавания образов. — «Тр. ГГО», вып. 293, 1973, с. 21—25.
2. Налимов В. В. Применение математической статистики при анализе веществ. М., Физматгиз, 1960.
3. Сонькин Л. Р. Некоторые возможности прогноза содержания примесей в городском воздухе. — «Тр. ГГО», 1971, вып. 254, с. 121—132.
4. Сонькин Л. Р. Вопросы прогнозирования фоновое загрязнения воздуха в городах. — «Тр. ГГО», 1974, вып. 314, с. 42—51.
5. Sládek J. Vztahy mezi režimem znečištění ovzduší a počasím v severozápadních Čechách. Meteorologické Zprávy XXVIII, N 4, 1975, с. 97—103.
6. Venarie M., Badellon D., Menard T., Nohat A. Emploi des regressions multiples pour la definition du niveau de fond de la pollution urboine et pour sa prevision a court terme Vert-le-Petit, France, 1971, 19 p.

## ВОПРОСЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ВОЗДУХА В ЛЕТНИЙ СЕЗОН

В результате теоретических исследований, выполненных под руководством М. Е. Берлянда [2—8], изучен ряд закономерностей процесса распространения примесей в зависимости от метеорологических параметров. Используя конкретные положения при анализе фактической информации, выявлено, что эти закономерности в разные сезоны различны. В теплый период года обычно слабее выявляются связи между загрязнением воздуха и метеорологическими условиями [1, 9, 12, 13, 14, 16, 17, 20, 23, 26]. Это создает определенные затруднения при разработке методов прогноза загрязнения воздуха. Вместе с тем летом нередко создаются высокие уровни концентраций примесей.

На рис. 1 представлены гистограммы значений показателя загрязнения воздуха, выраженного параметром  $P$  [15], для зимы

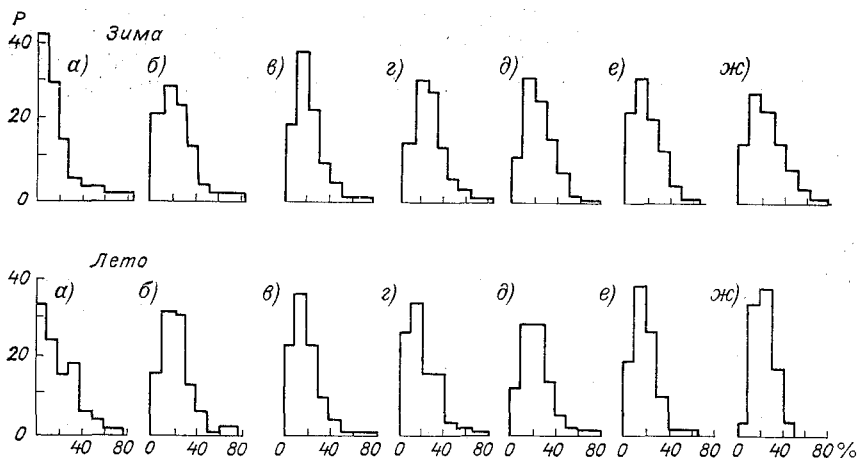


Рис. 1. Гистограммы значений параметра  $P$ .

а) Ереван, б) Свердловск, в) Рига, г) Чита, д) Ленинград, е) Алма-Ата, ж) Красноярск.

и лета в некоторых городах. Параметр  $P$  характеризует количество концентраций, превышающих 1,5 среднесезонных значений. Как следует из рис. 1, в городах с резко континентальным климатом (Чита, Красноярск, Алма-Ата) летом реже, чем зимой, наблюдается одновременный значительный рост концентраций над всем городом. По-видимому, такое распределение значений параметра  $P$  объясняется сезонной сменой циркуляционных процессов, влияющих на уровень загрязнения воздуха. Однако и в этих городах высокие концентрации имеют место. В других рассмотренных городах в теплую часть года повторяемость повышенных значений параметра  $P$  не ниже, чем в холодную.

Задача настоящей работы состоит в более подробном анализе связей загрязнения воздуха с метеорологическими элементами с целью выявления особенностей, характерных для летнего сезона и использования полученных результатов при прогнозировании.

Одним из условий, способствующих ослаблению связей загрязнения воздуха со скоростью ветра, является снижение максимума концентраций при слабых ветрах [12, 16]. Это, по-видимому, объясняется тем, что летом преобладает неустойчивая стратификация. В зимние месяцы такие ситуации бывают редко, поскольку в данное время года слабый ветер чаще всего сопровождается инверсиями.

В ранее выполненных работах [9, 14, 16—20] положительные результаты получены при изучении зависимости загрязнения воздуха одновременно от скорости ветра и атмосферной устойчивости. Характер зависимости от упомянутых элементов в основном сохраняется постоянным в течение года. При слабом ветре и устойчивом состоянии скопление примесей повышается за счет вклада низких выбросов. Следует, однако, отметить, что в условиях застоя летом загрязнение воздуха меньше, чем зимой, поскольку в теплое время застой непродолжительны [15]. Усиление ветра при устойчивой стратификации способствует уменьшению загрязнения. При неустойчивой стратификации усиление ветра приводит к увеличению содержания примесей (за счет вклада высоких выбросов) [16, 17].

В качестве предикторов для уточнения особенностей загрязнения воздуха летом рассматривались высота нижней границы приподнятой инверсии в утренние часы, вертикальная разность температур и максимальная высота слоя перемешивания [9, 20]. Выявлены условия, определяющие повышенное содержание примесей. В утренние часы рост концентраций отмечается при медленном разрушении инверсии и одновременно интенсивном перемешивании в подынверсионном слое. При этом суммарное загрязнение в городе может значительно увеличиваться за счет расширения площади максимальных концентраций и наложения их полей [8]. Днем и вечером интенсивное скопление примесей наблюдается при низкой высоте слоя перемешивания и слабом ветре в этом слое. Если ветер усиливается при небольшой высоте слоя перемешивания, то величины загрязнения воздуха не достигают высоких значений.

В отдельных городах вследствие микроклиматических особенностей процесс распространения примесей усложняется. Для анализа этих случаев рационально привлекать данные по направлению ветра в слое 100—200 м, поскольку фоновое загрязнение воздуха формируется под влиянием сравнительно крупномасштабных метеорологических процессов. Так, в Омске, где основные промышленные предприятия расположены к С, СЗ и Ю, ЮВ от жилых районов города, загрязнение повышается, если во всем пограничном слое осуществляется перенос со стороны источников (табл. 1).

Таблица 1

**Средние значения параметра  $P$  в зависимости от направления ветра на уровнях земли и 100 м в Омске**

| Высота        | Направление ветра |       |              |
|---------------|-------------------|-------|--------------|
|               | С, СЗ             | Ю, ЮВ | СВ, В, ЮЗ, З |
| Уровень земли | 0,22              | 0,24  | 0,23         |
| 100 м         | 0,24              | 0,33  | 0,22         |

Так же как и зимой, в летние месяцы инерция самого загрязнения воздуха имеет немаловажное значение [9, 15, 16, 17]. Корреляция между параметром  $P$  текущего и предшествующего дней заметно уменьшается с увеличением временного интервала. Но остается существенно положительной в среднем в течение 2,5 суток.

Таблица 2

**Повторяемость (%) низких ( $P \leq 0,2$ ) и высоких ( $P \geq 0,3$ ) значений загрязнения воздуха в зависимости от наличия осадков**

| $P$        | Ленинград      |             | Чита           |             | Алма-Ата       |             |
|------------|----------------|-------------|----------------|-------------|----------------|-------------|
|            | В общем случае | При осадках | В общем случае | При осадках | В общем случае | При осадках |
| $\leq 0,2$ | 60             | 80          | 70             | 80          | 76             | 89          |
| $\geq 0,3$ | 27             | 19          | 27             | 19          | 24             | 15          |

Летом достаточно четко прослеживается эффект очищения воздуха осадками. В табл. 2 представлена повторяемость низких и высоких значений уровня загрязнения воздуха независимо от осадков и в дни с дождями, продолжавшимися более 1 часа. Как видно из табл. 2, осадки хорошо очищают городской воздух. Однако однозначной корреляции между осадками и содержанием загрязнений нет, поскольку процесс вымывания многопараметрический и определяется рядом причин, оказывающих в большинстве случаев противоположное воздействие на концентрации примесей.



Эффективность очищения осадками связана главным образом с их продолжительностью и количеством. При этом зависимость от данных характеристик проявляется не всегда четко. Известно, что вымывание примесей заметнее при мелком обложном дожде и слабее при ливнях с крупными каплями [11, 21, 27].

Как показал анализ наблюдений, при увеличении продолжительности выпадения осадков от 1 до 3 часов средние значения параметра  $P$  уменьшаются на 12—15%.

Очищающее воздействие осадков лучше всего удается выявить в тех случаях, когда дождь выпадал не ранее чем за 2 часа до начала времени отбора проб воздуха или в период между первыми

Таблица 3

Средние значения параметра  $P$  в зависимости от времени окончания осадков ( $\tau$ ) по отношению к первому сроку наблюдений. Ленинград

|                   |      |        |      |      |      |
|-------------------|------|--------|------|------|------|
| $\tau$ ч. . . . . | <—2  | —2, —0 | 0—2  | 2—4  | 4—6  |
| $P$ . . . . .     | 0,20 | 0,15   | 0,17 | 0,19 | 0,22 |

двумя сроками (табл. 3). В табл. 3 время начала первого срока наблюдений принято за нуль. Если осадки окончились до этого срока, то величины берутся со знаком минус, если после, то со знаком плюс.

Очищение воздуха осадками наиболее четко проявляется, когда перенос со стороны промышленных предприятий (основных загрязнителей) отсутствует. В Омске анализ наблюдений на стационарных пунктах в зависимости от направления ветра обнаруживает заметное влияние объектов, расположенных к С, СЗ и Ю, ЮВ. Очищение воздуха при осадках в этом городе существеннее при СВ, В, ЮЗ и З переносе. При ветре неблагоприятных направлений вымывание осадками незаметно. Отношение среднего значения параметра  $P$  при ветре С, СЗ, Ю и ЮВ румбов к среднему значению  $P$  при тех же направлениях в общем случае и при осадках составляет 1,1; при ветре СВ, В, ЮЗ и З направлений то же отношение равно 1,4.

Таблица 4

Повторяемость (%) штилей и северного ветра в дни с сильным загрязнением воздуха в зависимости от наличия осадков. Магнитогорск

|                    | Без осадков | С осадками |
|--------------------|-------------|------------|
| Штиль . . . . .    | 32          | 7          |
| Северный ветер . . | 19          | 43         |

На ст. Эспендейл в Австралии, находящейся в 30 км от Мельбурна и подверженной влиянию этого индустриального центра, очищающий эффект осадков почти незаметен [22].

Таким образом, осадки очищают атмосферу города от фоновой концентрации и не оказывают существенного влияния на загрязнение воздуха конкретными источниками [1]. Это положение подтверждается и данными табл. 4, в которой представлена повторяе-

мость штилей и северного ветра (от промышленной площадки) в дни с сильным загрязнением в г. Магнитогорске в зависимости от наличия осадков.

Из табл. 4 можно еще сделать вывод о более интенсивном очищении воздуха осадками при штиле. Материалы других рассмотренных городов также свидетельствуют о более эффективном вымывании загрязнений при слабом ветре (табл. 5).

Несомненный интерес представляет вопрос о влиянии осадков на концентрации отдельных примесей. Общеизвестно, что наиболее интенсивно из атмосферы вымываются твердые примеси [10, 25].

Таблица 5

Средние значения параметра  $P$  в зависимости от скорости ветра и наличия осадков

| %, м/с | Ленинград      |             | Чита           |             | Омск (СВ, В, ЮЗ, З) |             |
|--------|----------------|-------------|----------------|-------------|---------------------|-------------|
|        | В общем случае | При осадках | В общем случае | При осадках | В общем случае      | При осадках |
| 0—1    | 023            | 011         | 020            | 014         | 026                 | 018         |
| ≥2     | 022            | 024         | 019            | 016         | 023                 | 022         |

Об этом свидетельствует и относительно большое содержание пыли в осадках. Из газообразных примесей заметно удаляется растворимый в воде сернистый газ. Содержание же окислов азота и углекислого газа почти не уменьшается (табл. 6).

По имеющемуся материалу наблюдений была проведена проверка полученных результатов с учетом специфических особенностей

Таблица 6

Средние значения параметра  $P$  отдельных примесей в зависимости от осадков

|                          | Чита            |      |                 |       | Омск            |      |                 |      |
|--------------------------|-----------------|------|-----------------|-------|-----------------|------|-----------------|------|
|                          | SO <sub>2</sub> | CO   | NO <sub>2</sub> | Сажка | SO <sub>2</sub> | CO   | NO <sub>2</sub> | Пыль |
| В общем случае . . . . . | 0,17            | 0,17 | 0,22            | 0,20  | 0,25            | 0,27 | 0,26            | 0,20 |
| При осадках . . . . .    | 0,09            | 0,15 | 0,19            | 0,16  | 0,21            | 0,25 | 0,22            | 0,14 |

влияния осадков в каждом городе. В Омске при дождях, сопровождающихся переносом со стороны основных предприятий, повторяемость низкого загрязнения воздуха составляет 30%, при ветре благоприятных направлений низкое загрязнение отмечается в 94% случаев. При отсутствии осадков повторяемость низкого загрязнения для данных групп направления ветра составляет соответственно 50 и 70%. В Чите и Ленинграде повторяемость низких значений параметра  $P$  при длительных осадках свыше 90%.

Поскольку ни один из рассмотренных параметров не определяет однозначно содержание примесей в атмосфере, повышенные или пониженные состояния загрязнения воздуха могут соответствовать только комплексам метеорологических элементов и исходного уровня концентраций. В результате проведенного анализа удалось выделить некоторые ситуации, благоприятствующие скоплению или рассеиванию примесей.

Ниже приводятся признаки с наиболее характерными сочетаниями параметров, определяющие относительно высокое и относительно низкое загрязнение в целом по городу летом, а также результаты оправдываемости этих признаков.

1. Если в дневные часы турбулентный обмен хорошо развит, вечером переход к застою, предсказывается повышенное загрязнение воздуха. Оправдываемость 82%.

2. При относительно высокой температуре со слабым ветром предсказывается повышенное загрязнение воздуха. Оправдываемость 92%.

3. Низкое загрязнение воздуха предсказывается при осадках, продолжавшихся в течение 2—3 сроков отбора проб. Оправдываемость 95%.

4. При отсутствии переноса со стороны основных промышленных предприятий во время выпадения осадков предсказывается пониженное загрязнение воздуха. Оправдываемость 94%.

5. При осадках, сопровождающихся слабым ветром, предсказывается пониженное загрязнение воздуха. Оправдываемость 85%.

Рассмотренные выше результаты в настоящее время уже используются при разработке схем прогнозирования загрязнения воздуха в различных городах. Так, в прогностическую схему в Ленинграде включены некоторые новые предикторы — вертикальная разность температур в городе, высота нижней границы приподнятой инверсии, максимальная высота перемешивания [20]. Выполненные испытания показали успешность такой схемы.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Безуглая Э. Ю., Сонькин Л. Р. Влияние метеорологических условий на загрязнение воздуха в городах Советского Союза. — В кн.: Метеорологические аспекты загрязнения атмосферы. Л., Гидрометеиздат, 1971, с. 141—152.
2. Берлянд М. Е. Об опасных условиях загрязнения атмосферы промышленными выбросами. — «Тр. ГГО», 1966, вып. 185, с. 15—25.
3. Берлянд М. Е. Метеорологические проблемы обеспечения чистоты атмосферы. — «Метеорология и гидрология», 1967, № 11, с. 50—62.
4. Берлянд М. Е. О распространении атмосферных примесей в условиях города. — «Метеорология и гидрология», 1970, № 3, с. 45—47.
5. Берлянд М. Е., Курейбин О. И. Об атмосферной диффузии примесей при штиле. — «Тр. ГГО», 1969, вып. 238, с. 3—13.
6. Берлянд М. Е., Оникул Р. И. Физические основы расчета рассеивания в атмосфере промышленных выбросов. — «Тр. ГГО», 1968, вып. 234, с. 3—27.
7. Берлянд М. Е. и др. Численное исследование атмосферной диффузии при нормальных и аномальных условиях стратификации. — «Тр. ГГО», 1964, вып. 158, с. 22—32.

8. Берлянд М. Е. Современные проблемы атмосферной диффузии и загрязнения атмосферы. Л., Гидрометеиздат, 1975. 448 с.
9. Вдовин Б. И. и др. Метеорологические условия загрязнения воздуха в Запорожье в летний сезон. — «Тр. ГГО», 1974, вып. 332, с. 59—69.
10. Махонько К. П. Элементарные теоретические представления о вымывании примеси осадками из атмосферы. — «Тр. ИПГ», 1967, вып. 8, с. 26—34.
11. Селезнева Е. С., Петренчук О. П. Об удалении примесей из атмосферы облаками и осадками. — В кн.: Метеорологические аспекты загрязнения атмосферы. Л., Гидрометеиздат, 1971, с. 253—259.
12. Сонькин Л. Р. и др. К вопросу метеорологической обусловленности загрязнения воздуха над городом. — «Тр. ГГО», 1966, вып. 185, с. 44—54.
13. Сонькин Л. Р., Чаликов Д. В. Об обработке и анализе наблюдений за загрязнением воздуха в городах. — «Тр. ГГО», 1968, вып. 207, с. 51—55.
14. Сонькин Л. Р. Анализ метеорологических условий опасного загрязнения воздуха в городах. — «Тр. ГГО», 1968, вып. 234, с. 60—68.
15. Сонькин Л. Р., Денисова Т. П. Метеорологические условия формирования периодов интенсивного загрязнения воздуха в городах. — «Тр. ГГО», 1969, вып. 238, с. 33—41.
16. Сонькин Л. Р. Некоторые возможности прогноза содержания примесей в городском воздухе. — «Тр. ГГО», 1971, вып. 254, с. 121—131.
17. Сонькин Л. Р., Храпаченко В. А. Содержание примесей в городском воздухе в зависимости от метеоусловий в летний сезон. — «Тр. ГГО», 1973, вып. 293, с. 68—77.
18. Сонькин Л. Р. Вопросы прогнозирования фоновое загрязнения воздуха в городах. — «Тр. ГГО», 1974, вып. 314, с. 42—52.
19. Сонькин Л. Р. и др. О влиянии метеорологических условий на загрязнение воздуха в различных городах. — «Тр. ГГО», 1975, вып. 325, с. 52—61.
20. Сонькин Л. Р., Храпаченко В. А., Кринина Т. П. Уточнение схем прогнозирования загрязнения воздуха в городе с учетом новых результатов анализа информации. — «Тр. ГГО», 1975, вып. 352, с. 65—71.
21. Baston W., Nana A. L'inquinamento Delle acque piovane come conseguenza della polluzione Atmosferica.—„Boll. lab. chim. provinc.”, 1974, 25, N 9, p. 180—184.
22. Hicks B. B. A Climatology of solid atmospheric contaminants at Aspendale near Melbourne, Victoria, 1966 to 1971.—„Australian Meteorol. magazine”, 1973, v. 21, N 1, p. 19—28.
23. Leone T. A., Brennan E. and Daines R. H. The role of wind in determining SO<sub>2</sub> concentration in Carlstadt, New Jersey, Int.—„J. Air and Water Pollut.”, 1966, v. 10, N 2.
24. Li Ta-Yung, Lansberg H. E. Rainwater pH close to a major power plant.—„Atmosphere Environment”, 1975, N 9, p. 81—88.
25. Манолова Л., Тенева М. Результаты запыленности приземной атмосферы по данным содержания пыли в воздухе. — «Хидр. и метеорол.», 1967, № 4, с. 45—52.
26. Markee E. H. Effects of vertical Temperature difference on Soling index.—„J. of the Air Poll. Contr. Assoc.”, v. 11, N 3, 1961.
27. Storeb Per B., Dingle A. Nelson. Removal of pollution by rain in shallow air flow.—„J. Atmos. Sci.”, 1974, v. 31, N 2, p. 533—542.

*В. В. Клинго*

## **К СКОРОСТИ ОБРАЗОВАНИЯ ОЗОНА ПРИ ФОТОХИМИЧЕСКОМ СМОГЕ В АТМОСФЕРНОМ ВОЗДУХЕ**

### **1. Введение**

Явление фотохимического смога, как одной из особо опасных ситуаций загрязнения атмосферного воздуха, известно в городах США уже с 30-х годов. Основные положения о фотохимическом смоге в общей проблеме атмосферной диффузии и загрязнения атмосферы изложены в монографии [1]. Сравнительно быстро было установлено, что это явление обусловлено комплексом метеорологических, физических и химических процессов. Причем выбросы автотранспорта являются основным источником реагирующих химических веществ. Таким образом, по мере роста автотранспорта увеличивается вероятность образования, необходимого для развития смога уровня концентраций веществ, обуславливающих фотохимический смог.

Многочисленные исследования как в области фотохимических реакций в атмосфере вообще, так и реакций, приводящих к фотохимическому смогу в частности приведены в [7, 9, 13, 14]. Однако ввиду сложности указанных выше процессов в смоге до сих пор нет требуемой ясности не только в протекающих при смоге фотохимических реакциях (каковы они), но и в том, концентрации каких веществ соответствуют смоговой ситуации.

Полная постановка задачи метеорологического прогнозирования смоговых ситуаций должна включать: 1) метеорологические условия атмосферной диффузии (по крайней мере скорость ветра и коэффициент турбулентного обмена); 2) интенсивность солнечной радиации в ультрафиолетовой области длин волн 2850—4000 Å; 3) концентрации химических веществ, вступающих в фотохимические реакции.

Располагая этими сведениями, математическое описание смога сводится к записи системы дифференциальных уравнений турбулентной диффузии для каждой примеси с учетом их фотохимических превращений. При этом коэффициенты, определяющие ско-

рость протекания этих превращений, вообще говоря, должны зависеть от интенсивности солнечной радиации.

В работе [10] все многообразие фотохимических процессов в фотохимическом смоге сведено к семи реакциям. А далее с помощью ряда упрощающих предположений на основании этих семи реакций получена замкнутая система уравнений относительно концентраций только трех веществ: окиси [NO] и двуокиси [NO<sub>2</sub>] азота, а также углеводородов [RH]. Кроме того, концентрация озона [O<sub>3</sub>] выражается в виде отношения

$$[O_3] = \beta \frac{[NO_2]}{[NO]}, \quad (1)$$

где  $\beta = 0,02$  ppm — некоторый коэффициент (ppm — одна часть на миллион частей) [11].

Существенно подчеркнуть, что коэффициенты скоростей протекания химических реакций в этих модельных уравнениях являются постоянными, не зависящими от интенсивности солнечной радиации.

Решение задачи относительно концентраций [NO], [NO<sub>2</sub>] и [RH] в стационарной и нестационарной постановках с упрощенной диффузионной моделью было получено в [11].

Таким образом, даже в упрощенно-модельном представлении о химических реакциях математическое описание фотохимического смога никак не включает интенсивности радиации.

Приближенный подход к учету солнечной радиации осуществлен в [3 и 5] посредством эмпирической формулы. Эта формула связывает интенсивность солнечной радиации со скоростью образования фотооксидантов  $V$  (приближенно в дальнейшем отождествляем их с озоном), а именно

$$V = 3,1 \cdot 10^{-5} \cdot \sqrt{[NO_x]} \cdot \sqrt{[NO_x] + \alpha \cdot [RH]} \cdot \int_{285}^{400} G(\lambda) I(\lambda) d(\lambda) \text{ мг/м}^3 \cdot \text{ч}, \quad (2)$$

где [NO<sub>x</sub>] — концентрация окислов азота (мг/м<sup>3</sup>) в пересчете на NO, [RH] — концентрация углеводородов (мг/м<sup>3</sup>),  $\alpha$  — средняя озonoобразующая эффективность выхлопных газов автомобилей, равная 0,47,  $G$  — энергетический выход озона (г/кВт·ч) в зависимости от длины световой волны  $\lambda$  нм,  $I(\lambda)$  — интенсивность солнечной радиации (Вт/м<sup>2</sup>) при заданной  $\lambda$ .

Заметим, что формула (2), которая не имеет какого-либо теоретического обоснования, с точки зрения прогнозирования фотохимического смога обладает явным недостатком. Она не учитывает метеорологических условий рассеяния примесей в атмосфере, при которых образуется озон в результате фотохимических реакций.

Правда, фотохимический смог наблюдается при температурных инверсиях и малых ветрах, т. е. в условиях слабого турбулентного перемешивания. Поэтому вычисленные по (2) значения  $V$  могут

быть использованы в качестве верхнего предела интенсивности образования озона в реальных атмосферных условиях.

В задачу данной работы входило прежде всего проанализировать формулу (2) на основе имеющихся данных о концентрациях веществ в периоды фотохимического смога.

Как видно из (1) и (2), скорость образования озона и его концентрация выражаются через концентрацию окислов азота, что предполагает связь между  $V$  и  $[O_3]$ . Установление этой связи и является второй задачей данного исследования.

Наконец, вычисление интеграла  $\int_{285}^{400} G(\lambda)I(\lambda)d\lambda$  для различных географических районов [3] выполнено с детальным учетом мутности атмосферы и толщины слоя озона, что сопряжено с громоздкостью вычислений. Такой детальный учет интенсивности солнечной радиации, достигающей земной поверхности, намного точнее, чем задание всех остальных величин в формуле (2). Отсюда целесообразно провести упрощение в радиационной части в (2).

Для упрощения радиационной части последний множитель в (2), пользуясь теоремой о среднем, представим в виде

$$\int_{285}^{400} G(\lambda)I(\lambda)d\lambda = G(\lambda)_{\text{ср.}} \cdot \int_{285}^{400} I(\lambda)d\lambda, \quad (3)$$

$G(\lambda)_{\text{ср}}$  — значение энергетического выхода озона при некоторой длине волны  $\lambda_{\text{ср}}$ ,  $\int_{285}^{400} I(\lambda) d\lambda$  — суммарная интенсивность солнечной радиации в диапазоне длин волн 285—400 нм, значение которой может быть найдено по формулам, приводимым в [6]. В [6] для некоторых пунктов даются также значения суммарной солнечной радиации в интервалах  $\lambda < 315$  нм и  $\lambda < 400$  нм.

Из графиков, которые приведены в [5 и 2], приближенно получен аналитический вид как энергетического выхода

$$G(\lambda) = \exp \{-8,37 \cdot 10^{-2} \cdot \lambda + 31,3\}, \quad (4)$$

так и распределения солнечной энергии по спектру

$$I(\lambda) = 8,67 \cdot 10^{-3} \cdot \lambda - 2,47; \quad 285 \leq \lambda \leq 400. \quad (5)$$

С учетом (4) и (5) из (3)

$$\int_{285}^{400} I(\lambda)d\lambda = 54; \quad \int_{285}^{400} G(\lambda)I(\lambda)d\lambda = 1750. \quad (6)$$

Это соответствует  $\lambda_{\text{ср}} \approx 340$  нм.

Можно проверить, используя результаты вычисления  $V$  для ряда городов СССР [3], что среднее значение  $G(\lambda_{\text{ср.}})$  близко к 32,4 г/квт·ч, а суммарная солнечная радиация, равная 54 Вт/м<sup>2</sup>, соответствует максимальной ее интенсивности на широте 49—50°.

Следовательно, при практической оценке величины  $V$  без уменьшения точности всего произведения (2) (основная ошибка приходится на измерения  $[\text{NO}_x]$  и  $[\text{RH}]$ ) можно считать

$$\int_{285}^{400} G(\lambda)I(\lambda)d\lambda = 32,4 \cdot \int_{285}^{400} I(\lambda)d\lambda. \quad (7)$$

## 2. Скорость образования озона при фотохимических смогах

Переходим к проверке формулы (2) по приводимым в литературе временным изменениям концентрации  $[\text{NO}]$ ,  $[\text{NO}_2]$  и  $[\text{RH}]$  в смоговые дни. К сожалению, таких данных имеется очень мало.

Эта проверка связана, кроме того, с тем, что взятые в [3] без каких-либо пояснений в качестве типичных городских концентраций  $[\text{NO}_x] = 9,5 \text{ мг/м}^3$  и  $[\text{RH}] = 16,7 \text{ мг/м}^3$ , равно как и полученный с ними критерий фотохимического смога  $0,35 \text{ мг/м}^3 \cdot \text{ч}$ , представляются завышенными, что будет показано ниже.

Поскольку концентрации веществ при наблюдениях измерялись в ррт, а в формуле (2) они в  $\text{мг/м}^3$ , то для справки приведем связь между ними. Если  $a$  есть соответствующая концентрация в ррт при давлении 760 мм и температуре  $20^\circ\text{C}$ , то концентрация веществ в  $\text{мг/м}^3$  (обозначены квадратными скобками) будут:  $1,25 a$  — для  $[\text{NO}]$ ,  $1,91 a$  — для  $[\text{NO}_2]$ ;  $2,5 a$  — для  $[\text{RH}]$ ;  $2 a$  — для  $[\text{O}_3]$ .

Считаем, как и в [3], что различные углеводороды с соответствующим молекулярным весом  $M$  имеют следующий состав: 47,3% — предельные углеводороды ( $M \sim 70$ ), 40,1% — непредельные углеводороды ( $M \sim 40$ ), 6,8% — ароматические ( $M \sim 80$ ), 4% — альдегиды и кетоны ( $M \sim 30$ ), 1,1% — фенол ( $M \sim 100$ ), 0,7% — спирты ( $M \sim 30$ ). Отсюда средний молекулярный вес углеводородов получается равным 60.

Концентрацию окислов азота в пересчете на  $\text{NO}$  принимаем равной

$$[\text{NO}_x] = [\text{NO}] + 0,65 \cdot [\text{NO}_2]. \quad (8)$$

Целесообразно для определенности заметить, что под слабым фотохимическим смогом в соответствии с [2] будем понимать смог, когда концентрация озона находится в пределах  $0,2$ — $0,35 \text{ мг/м}^3$ ; при этом ощущается неприятный запах. Если концентрация озона достигает  $0,35 \text{ мг/м}^3$ , то смог проявляется в раздражении слизистых оболочек глаз и уменьшении видимости.

Находим скорость образования озона по данным наблюдения концентраций в дни со слабым смогом, приводимым в табл. 1.

Средние значения концентраций, за исключением первой строки, где  $[\text{O}_3]$  немного превосходит уровень слабого смога, приблизительно будут такими:  $0,012 \text{ мг/м}^3$  для  $[\text{NO}]$ ;  $0,15 \text{ мг/м}^3$  для  $[\text{NO}_2]$ ;  $3,88 \text{ мг/м}^3$  для  $[\text{RH}]$ ;  $0,30 \text{ мг/м}^3$  для  $[\text{O}_3]$ .

Учитывая (8) и используя значение суммарной интенсивности солнечной радиации для широты Лос-Анджелеса, равное примерно



60 Вт/м<sup>2</sup>, получим скорость образования озона при слабом смоге  $V_{сл}$ :

$$V_{сл} = 0,028 \text{ мг/м}^3 \cdot \text{ч.} \quad (9)$$

Вычислим далее значение  $V$  по данным наблюдений в Лос-Анджелесе в течение 1959 г. [7]. Смоговыми ситуациями считались периоды, когда в центре города отмечалось раздражение глаз.

При таких смоговых ситуациях средние часовые концентрации в мг/м<sup>3</sup> следующие:

$$\begin{aligned} 0,50 < [RH] < 5,0; \\ 0,40 < [O_3] < 1,30; \\ 0,47 < [NO_x] < 3,7. \end{aligned}$$

Таким образом, для  $[O_3] > 0,40$  мг/м<sup>3</sup> скорость образования озона не может превосходить  $V$  с  $[NO_x] = 3,7$ ,  $[RH] = 5,0$ . Или для тех же условий солнечной радиации, что и для (9),

$$V\{[O_3] > 0,40 \text{ мг/м}^3\} < 0,28 \text{ мг/м}^3 \cdot \text{ч.} \quad (10)$$

Таблица 1

Величины концентраций (мг/м<sup>3</sup>) и коэффициент  $\beta$   
в отдельные смоговые дни

| Пункт             | Дата            | Время, часы | [NO]   | [NO <sub>2</sub> ] | [RH] | [O <sub>3</sub> ] | $\frac{0,65 \cdot [NO_2]}{[NO]}$ | $\frac{0,21 \times [NO_2]}{[RH]}$ | 0,76 $\beta$ |
|-------------------|-----------------|-------------|--------|--------------------|------|-------------------|----------------------------------|-----------------------------------|--------------|
| Лос-Анджелес [11] | 29 IX 1969 г.   | 11          | 0,025  | 0,24               | 6,25 | 0,44              | 6                                | 0,3                               | 0,037        |
|                   |                 | 12          | 0,015  | 0,16               | 6,25 | 0,32              | 7                                | 0,21                              | 0,023        |
|                   |                 | 13          | 0,012  | 0,13               | 5,0  | 0,28              | 7                                | 0,14                              | 0,018        |
| Цинцинати [7]     | 9 IX 1963 г.    | 10          | 0,012  | 0,13               | 7,5  | 0,36              | 7                                | 0,21                              | 0,025        |
| Лос-Анджелес [14] | 10 VI 1965 г.   | 10          | 0,012  | 0,23               |      | 0,24              | 12                               |                                   | 0,001        |
| Филадельфия [8]   | 18 VIII 1967 г. | 10          | 0,012  | 0,11               | 3,1  | 0,28              | 6                                | 0,075                             | 0,023        |
|                   |                 | 12          | 0,012  | 0,11               | 2,5  | 0,22              | 6                                | 0,06                              | 0,018        |
|                   | 22 VII 1967 г.  | 11          | 0,0086 | 0,095              | 2,0  | 0,26              | 7,1                              | 0,04                              | 0,018        |
| Лос-Анджелес [8]  | 19 VII 1965 г.  | 10          | 0,015  | 0,23               |      | 0,24              | 10                               |                                   | 0,01         |

В заключение рассчитаем верхние пределы скорости образования озона  $V_b$ , соответствующие величинам концентраций озона, превышающим их заданные значения.

Для этого воспользуемся результатами статистической обработки измеренных концентраций озона, углеводородов и окислов азота в семи городах США в течение 1962—1968 гг. [12]. В табл. 2 пред-

### 3. Выводы

1. Сопоставление проведенных вычислений интенсивности образования озона  $V$  с критерием смоговой ситуации по [3], где  $V_{см} = 0,35 \text{ мг/м}^3 \cdot \text{ч}$ , показывает, что для слабых смогов (табл. 1) она на порядок ниже значения  $V_{см}$ . Для смогов более сильных с  $[O_3] > 0,4 \text{ мг/м}^3$   $V$  имеет порядок  $V_{см}$ , хотя составляет только 80% от его значения. И лишь для концентраций озона, больших  $1 \text{ мг/м}^3$  (рис. 1), т. е. крайне редко встречающихся ситуаций даже для Лос-Анджелеса,  $V$  немного превосходит  $V_{см}$ .

По [4] наибольшая отмеченная концентрация в городах СССР не достигает  $0,4 \text{ мг/м}^3$ . Значит, критерий  $V_{см}$  фактически относится к сильным, редко встречающимся смогам, не образующимся в городах СССР.

2. Как показывает рис. 1, несмотря на статистический характер зависимости  $[O_3]$  от  $V_v$ , монотонный рост  $[O_3]$  с увеличением  $V$  выражен достаточно четко. Разброс точек, исключая неточность самих измерений, должен быть отнесен к особенностям метеорологических условий и выбросов в рассматриваемых городах США.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

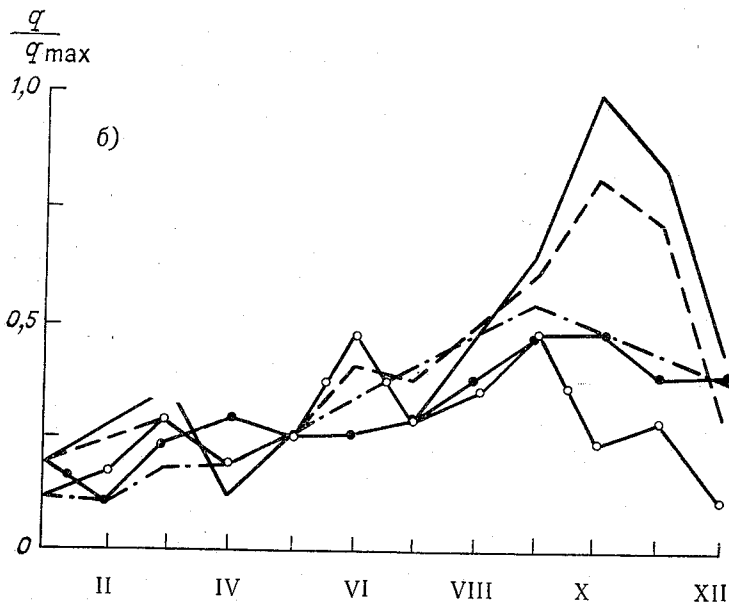
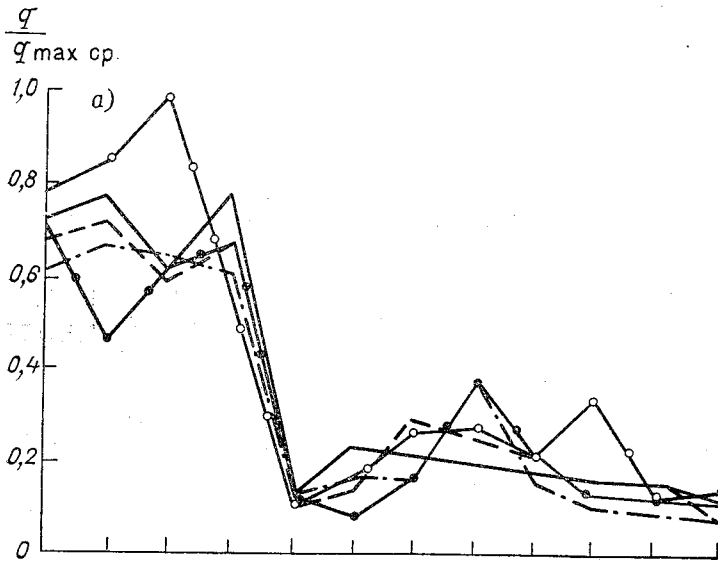
1. Берлянд М. Е. Современные проблемы атмосферной диффузии и загрязнения атмосферы. Л., Гидрометеониздат, 1975. 448 с.
2. Дмитриев М. Т. Фотохимический смог. — «Природа», 1971, № 2, с. 28—35.
3. Дмитриев М. Т., Иванова Л. Ю., Чон Ен Де. Гигиеническое прогнозирование образования фотохимического смога в городах. — «Гигиена и санитария», 1973, № 2, с. 8—13.
4. Дмитриев М. Т., Китросский Н. А. Некоторые физико-химические процессы в воздухе, происходящие в условиях загрязнения атмосферы. ФА и О, 1972, т. 8, № 1, с. 101—107.
5. Дмитриев М. Т., Соловьева Т. В., Китросский Н. А. О физико-химическом механизме образования озона и фотооксидантов в атмосферном воздухе. — «Гигиена и санитария», 1971, № 10, с. 6—10.
6. Белинский В. И. и др. Ультрафиолетовая радиация солнца и неба. Изд. МГУ, 1968.
7. Air Pollution, 1—68, Vol. 1, Ed. by A. C. Stern. Acad. Press. New Jire, London.
8. Air Quality criteria for photochemical oxidants. U. S. Department of Health, Education, and Welfare. Washington, D. C. Marzh 1970, National Air Pollution Central Administration Publication No Ap-63.
9. Chemical reactions in the lower and upper atmosphere. 1961, Proceedings of the International Sumposium Arranged by Stanford Research Institute San Francisco, California, 1961.
10. Friedlander S. K. and Seinfeld J. H. A dynamical model of photochemical smog.—„Environmental Science and Technology”, 1969, v. 3, N 11, p. 1175—1184.
11. Hanna S. R. A Simple dispersion model for the analysis of chemically reactive pollutants.—„Atmospheric Environment”, 1973, v. 7, p. 803—817.
12. Larsen R. I. A Mathematical Model for Relating air Quality Measurements to Air Quality Standards. 1971, National Environmental Research Center.
13. Leighton Ph. A. Photochemistry of Air Pollution, 1961, Acad. press. New York and London.
14. The Mechanism of Photochemical Smog Formation. Kenneth L. Demerjian, J. Alistair Kerr and Jack G. Calvert, 1974.
15. World Meteorological organization. Technocal Note N 139. Climatological aspects of the composition and pollution of the atmosphere by G. C. Holworth. 1974.

*А. Н. Андрианов, Б. Б. Горошко, Б. Н. Пьянцев*

## **НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВРЕДНЫХ ПРИМЕСЕЙ ОТ ПРОМЫШЛЕННЫХ ЦЕНТРОВ**

Выполненные к настоящему времени теоретические и экспериментальные исследования позволяют получить достаточно четкое представление о пространственно-временной структуре поля концентраций различных примесей как от отдельных мощных источников, так и в черте города [1]. Для получения сведений о горизонтальной протяженности городского облака, формировании фоновой концентрации вредных веществ в городе с учетом влияния близлежащих промышленных центров необходимы данные о пространственном распределении примесей за пределами города. В настоящее время эта задача является одной из важных, так как продолжающаяся концентрация промышленности в городах, расположенных в районах наличия энергетических мощностей и сырьевых ресурсов, приводит к расширению городов, а часто и к их слиянию. В образовании крупных индустриальных центров и сверхгородов существенную роль играет их географическое или административное положение и наличие трудовых ресурсов. В этом случае на больших площадях в атмосферу поступает значительное количество вредных веществ. При наличии слабого конвективного обмена они длительное время находятся в нижней тропосфере и основная их масса переносится на значительные расстояния по направлению воздушного потока. В связи с этим возрастает интерес к исследованию загрязнения воздушного бассейна на больших площадях и взаимного влияния индустриальных центров в промышленных районах.

В связи с этим для получения экспериментальных материалов были организованы наблюдения за загрязнением атмосферы в городах Донецке, Макеевке и Горловке. Макеевка расположена от Донецка на ВСВ на расстоянии 6 км, а Горловка — на ССВ на расстоянии 39 км. Отборы осуществлялись также на пунктах за пределами городов по маршруту на Горловку в 6 км от окраины Донецка (пункт 15) и в 4 км от Горловки (пункт 16), а также между городами Донецком и Макеевкой (пункт 20).



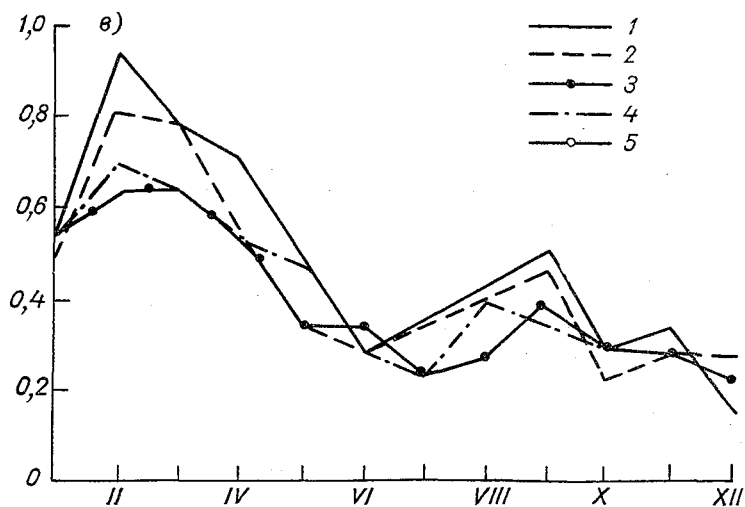


Рис. 1. Годовой ход среднемесячных концентраций сернистого газа (а), пыли (б) и окислов азота (в), нормированных на максимальные значения.

1 — Макеевка, 2 — пункт 20, 3 — Горловка, 4 — пункт 15, 5 — Донецк.

Необходимо отметить, что рассматриваемый район характеризуется обилием разнообразных источников промышленных выбросов в атмосферу не только в названных городах, но и за их пределами. Учитывая, что города и отдельные крупные источники расположены на близком расстоянии друг от друга, можно говорить о взаимном влиянии на загрязнение атмосферы промышленных центров и создании некоторого фоновое значения концентраций на всей территории.

На рис. 1 представлены кривые распределения среднемесячных концентраций пыли, сернистого газа и окислов азота, нормированных на их максимальные значения. Для Донецка, Горловки, Макеевки и пунктов 15 и 20 по отбору проб, расположенных между этими городами. Из рисунка следует, что среднемесячные значения концентраций отличаются друг от друга незначительно даже на пунктах отбора проб, расположенных не только в городах, но и между ними. Кроме этого, на всех пунктах наблюдается удовлетворительное совпадение изменений в годовом ходе. Анализ подвергались также результаты наблюдений на пяти пунктах, расположенных в различных частях Донецка и на четырех пунктах в Горловке и Макеевке.

Характерно, что изменение средних значений концентраций сернистого газа и окислов азота происходит в одни и те же периоды; и отмечается один основной максимум в зимний период, а второй в летне-осенний. Наличие первого максимума, вероятно, объясняется в основном увеличением количества сжигаемого топлива, а вто-

рого — метеорологическими условиями. Противоположный ход отмечается в изменении концентрации пыли. Здесь мы имеем основной максимум в конце лета и небольшое увеличение в весенний период. В данном случае максимумы представляется возможным объяснить значительным вкладом в загрязнение атмосферы выбросов из труб промышленных предприятий и пыли, поднимаемой с поверхности почвы. Увеличению пыли способствуют такие факторы, как просыхание верхнего слоя почвы, вспашка и отсутствие на поверхности почвы растительности. Дальнейшее уменьшение концентраций происходит в период развития растительного покрова. При этом необходимо учитывать и тот факт, что в первую половину лета листья растительности хорошо адсорбируют на своей поверхности значительное количество аэрозолей, а во второй половине лета их адсорбционные свойства ухудшаются.

Если взять средние концентрации пыли в зимние месяцы (январь, февраль) за величину, которая создается в результате выброса промышленными предприятиями, так как в эти месяцы поступление почвенной пыли будет минимальным, то из графиков следует, что за счет естественной пыли в конце лета и начале осени происходит значительное увеличение концентрации. Следовательно, при разработке мероприятий по оздоровлению воздушного бассейна в данном районе особое внимание необходимо уделить мероприятиям, которые способствовали бы значительному уменьшению поступления пыли в атмосферу с поверхности почвы и от других источников.

Приведенные выше данные показывают, что наличие значительного количества источников выброса вредных веществ в атмосферу, расположенных на сравнительно небольших расстояниях друг от друга, способствует образованию определенного уровня загрязнения на больших площадях. При этом изменения среднемесячных концентраций от одного промышленного района к другому и в загородных зонах между ними таковы, что они чаще всего не превышают точности измерения.

Естественно, что осредненные за месяц данные дают сглаженные характеристики, а поэтому представляет интерес рассмотреть как происходит изменение разовых концентраций в течение суток. Проведенный анализ результатов наблюдений показывает, что изменение разовых концентраций также хорошо согласуется на всех пунктах, расположенных как на территории указанных городов, так и за их пределами. Это хорошо подтверждают данные табл. 1, в которой приведен один из случаев одновременного повышения уровней концентрации вредных веществ на рассматриваемой территории. Кроме того, необходимо отметить, что в период повышения концентраций их наибольшие значения наблюдались в пунктах 15 и 20, расположенных в загородных зонах между городами Донецком, Макеевкой и Горловкой. Дальнейшие исследования подтвердили сделанный вывод.

Объясняется это тем, что при южном и юго-западном направлениях ветра в нижнем слое атмосферы в воздушную массу над До-

нецком попадают вредные вещества, содержащиеся в выбросах предприятий и автотранспорта. Наибольшее содержание этих веществ достигается при выходе воздушной массы за пределы территории города, где и отмечаются повышенные уровни загрязнения.

Из табл. 1 видно, что в отдельные периоды концентрации могут увеличиваться в 5 раз и более. Объяснить это явление более мощным выбросом вредных веществ в атмосферу не представляется возможным, так как повышение концентраций наблюдается одновременно в трех городах и на пунктах, расположенных между

**Таблица 1**  
**Изменение нормированных концентраций**  
**сернистого газа в период неблагоприятных**  
**метеорологических условий 1974 г.**

| Место наблюдения | Дата          |                |               |                |
|------------------|---------------|----------------|---------------|----------------|
|                  | 24 XII (утро) | 25 XII (вечер) | 26 XII (утро) | 27 XII (вечер) |
| Донецк . . . .   | 0,20          | 0,60           | 0,81          | 0,23           |
| Макеевка . . .   | 0,22          | 0,76           | 0,71          | 0,45           |
| Горловка . . .   | 0,30          | 0,68           | 0,74          | 0,37           |
| Пункт 15 . . .   | 0,12          | 0,66           | 0,93          | 0,27           |
| Пункт 16 . . .   | 0,13          | 0,81           | 0,71          | 0,35           |
| Пункт 20 . . .   | 0,16          | 1,00           | 0,39          | 0,29           |

ними. В связи с этим можно предположить, что основной причиной увеличения концентраций являются метеорологические условия, способствующие накоплению вредных веществ в приземном слое атмосферы. Анализ показывает, что период повышения концентраций в данном случае совпал с влиянием мощного антициклона, центр которого располагался над Средиземным морем.

Если в рассматриваемый кратковременный период опасных метеорологических условий, как установлено авторами работ [2], [3], [4], сократить выбросы вредных веществ в атмосферу, то такого значительного повышения уровней концентраций можно избежать.

Для исследований одновременного изменения поля концентраций в воздухе в выбранных городах были рассчитаны коэффициенты корреляции среднемесячных концентраций сернистого газа и окислов азота по материалам наблюдений за декабрь 1974 г. и январь 1975 г. При этом использовались данные наблюдений на трех пунктах, расположенных в различных районах в каждом из городов.

Как видно из табл. 2, существует высокая связь средних концентраций сернистого газа и окислов азота. Наиболее вероятно это

определяется главным образом однородными метеорологическими условиями в пределах рассматриваемого района.

Следовательно, при прогнозировании опасных метеорологических условий загрязнения атмосферы представляется возможным составлять единый прогноз для этой территории. Необходимо отметить, что в данном случае наблюдается загрязнение воздушного бассейна примерно на одном уровне как на территории городов, так и окружающих их районов. Оно является результатом суммарного выброса многих источников с различными параметрами выбросов

Таблица 2

**Коэффициенты корреляции средних концентраций сернистого газа и окислов азота, рассчитанных по данным наблюдений за декабрь 1974 г. и январь 1975 г.**

| Город            | Сернистый газ |          | Окислы азота |          |
|------------------|---------------|----------|--------------|----------|
|                  | Макеевка      | Горловка | Макеевка     | Горловка |
| Донецк . . . .   | 0,66          | 0,65     | 0,50         | 0,29     |
| Макеевка . . . . | —             | 0,75     | —            | 0,59     |

и мало зависят от режима работы отдельных предприятий. В связи с этим можно эффективно использовать метеорологические прогнозы опасных условий загрязнения только в том случае, если регулирование выбросов в этот период будет осуществляться на всех основных предприятиях рассматриваемого района.

Таблица 3

**Средние годовые значения нормированных концентраций сернистого газа при различных направлениях ветра**

| Пункт наблюдений | Направление ветра |      |      |      |      |      |      |      | Штиль |
|------------------|-------------------|------|------|------|------|------|------|------|-------|
|                  | С                 | СВ   | В    | ЮВ   | Ю    | ЮЗ   | З    | СЗ   |       |
| 15               | 0,64              | 0,64 | 0,64 | 0,71 | 0,92 | 0,82 | 0,64 | 0,50 | 0,30  |
| 16               | 0,57              | 0,57 | 0,90 | 0,85 | 0,64 | 0,67 | 0,42 | 0,75 | 0,42  |
| 20               | 0,64              | 0,64 | 0,64 | 0,71 | 0,96 | 0,82 | 0,64 | 0,42 | 0,50  |

Представляет интерес рассмотреть, какой из трех городов вносит большой вклад в создание поля концентрации между ними. Для этого по данным наблюдений за 1975 г. были рассчитаны средние концентрации сернистого газа при различных направлениях ветра на пунктах измерения концентраций, расположенных между городами. В табл. 3 представлены их нормированные значения. Из таблицы следует, что наиболее сильное влияние на формирование об-



шего поля загрязнения атмосферы оказывают предприятия, расположенные в Донецке, так как максимальные значения наблюдаются при юго-восточных, южных и юго-западных ветрах. Исключение составляют результаты, полученные на пункте 16, где максимальное значение отмечается при восточном ветре, что определяется наличием вблизи пункта мелких источников загрязнения атмосферы.

Таким образом, приведенные данные показывают, что при изучении загрязнения воздушного бассейна и разработке мероприятий по его оздоровлению на территории отдельного города, расположенного в промышленном районе, необходимо учитывать возможность переноса примесей на десятки километров от других промышленных центров.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Берлянд М. Е. Современные проблемы атмосферной диффузии и загрязнения атмосферы. Л., Гидрометеиздат, 1975. 448 с.
2. Берлянд М. Е., Соломатина И. И., Сонькин Л. Р. О прогнозировании загрязнения воздуха. — «Метеорология и гидрология», 1972, № 9, с. 11—18.
3. Генихович Е. Л., Гущин В. А., Сонькин Л. Р. О возможности прогноза загрязнения городского воздуха методом распознавания образов. — «Тр. ГГО», 1973, вып. 293, с. 21—25.
4. Горошко Б. Б., Зайцев А. С. Некоторые характеристики распределения концентраций примеси на территории. — «Тр. ГГО», 1973, вып. 293, с. 52—59.
5. Зайцев А. С., Иванова З. И., Коньков С. А. Некоторые результаты наблюдений за изменением сернистого газа. — «Тр. ГГО», 1974, вып. 314, с. 132—135.
6. Сонькин Л. Р. и др. О влиянии метеорологических условий на загрязнения воздуха в различных городах. — «Тр. ГГО», 1975, вып. 325, с. 52—60.

*А. С. Зайцев, И. А. Янковский*

## **К ВОПРОСУ О СТАНДАРТИЗАЦИИ ПРАВИЛ КОНТРОЛЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ВОЗДУХА НАСЕЛЕННЫХ ПУНКТОВ**

В решениях XXV съезда КПСС ставится задача: «Совершенствовать стандарты и технические условия, повысить ответственность хозяйственных органов, предприятий и объединений за их соблюдение». На современном этапе развития Общегосударственной службы наблюдения и контроля за загрязнением атмосферы, почвы и водных объектов особую актуальность приобретает задача стандартизации методов, способов и технических средств. Благодаря стандартизации представляется возможность создавать и использовать в различных организациях и ведомствах унифицированные способы и правила организации и проведения контроля качества воздуха населенных пунктов.

Важной предпосылкой успешного решения вопроса стандартизации является накопленный опыт работы различных органов Гидрометеорологической и Санитарно-эпидемиологической служб страны. Этот опыт конкретизирует основные представления о структуре сети, пунктов и сроков наблюдений за загрязнение атмосферы, об учете метеорологических факторов и др. Рассмотрению некоторых из этих вопросов посвящается данная статья.

Изучением состояния загрязнения воздушного бассейна занимаются многие организации и ведомства. Главная геофизическая обсерватория им. А. И. Воейкова, являясь научно-методическим центром по изучению загрязнения атмосферы в стране, многие из своих работ проводит сначала в одном из крупных промышленных городов, а затем полученный опыт использует при разработке рекомендаций для других населенных пунктов. Теоретические и экспериментальные исследования позволили получить аналитические зависимости для расчета концентрации вредных примесей в воздухе от различных источников с учетом метеорологических условий, топографии местности и характеристик выбросов [1, 2].

Одним из важнейших условий обеспечения чистоты воздушного бассейна является организация регулярного контроля. Для этого

создаются подразделения Общегосударственной службы наблюдений в населенных пунктах, подверженных загрязнению вследствие хозяйственной деятельности с целью обеспечения заинтересованных организаций объективной систематической и экстренной информацией о фактическом уровне загрязнения воздушной среды, а также прогнозами о возможном повышении уровня загрязнения. В решении проблемы охраны воздушного бассейна большая роль принадлежит разработке стандарта регламентирующего правила контроля показателей качества воздуха.

Целью разработки такого стандарта является установление общих правил контроля за загрязнением атмосферного воздуха вредными веществами, отвечающих требованиям гигиенической оценки вредного влияния на окружающую человека среду и на самого человека, а также для прогнозирования возможных нежелательных последствий загрязнения атмосферы. И чем точнее, всестороннее и тщательнее организована система контроля и сбора данных о состоянии окружающей среды, тем более надежны будут прогнозы.

В настоящее время контроль за состоянием атмосферного воздуха проводится на сети стационарных, маршрутных и подфакельных постов. Развитие сети идет как в направлении увеличения постов и частоты наблюдения, так и по линии разработки и использования автоматических регистрирующих приборов. Указанные посты предназначаются для определенных целей и соответственно с этим оборудуются. Выбор, оборудование и эксплуатация постов в различных ведомствах в разных городах осуществляется в настоящее время по-разному. Не всегда в одинаковой степени учитываются многие факторы, искажающие действительный характер загрязнения воздуха. Нет единых, четко определенных сроков наблюдений, методов статистической обработки получаемой информации и методов оценки степени загрязнения воздушной среды.

Исходя из сказанного в стандарте «Правила контроля показателей качества воздуха» устанавливаются единые требования к методике определения и измерения концентраций вредных примесей в атмосферном воздухе, размещению пунктов наблюдения, их оборудованию и эксплуатации. В нем должны быть также определены критерии оценки репрезентативности мест для размещения каждой категории постов наблюдения (стационарный, маршрутный, подфакельный) при стационарных и подвижных источниках выбросов в атмосферу. Регламентированы сроки и частота наблюдений в пунктах каждой категории, что очень важно для получения надежного осреднения данных наблюдений. Кроме того, в стандарте сформулированы требования, регламентирующие условия наблюдения за метеорологическими параметрами и выбросами в атмосферу вредных веществ в период отбора проб воздуха. Определены особенности контроля в период неблагоприятных метеоусловий, способствующих повышению загрязнения атмосферы. Определены методы статистической обработки данных измерений и параметры оценки уровня загрязнения воздуха с учетом степени осреднения

по времени и количеству измерений, а также определены методы гигиенической оценки вредного влияния загрязненного промышленными выбросами атмосферного воздуха на санитарно-бытовые условия населения.

Касаясь конкретных требований к правилам контроля показателей качества воздуха представляется необходимым установить единый контроль и наблюдения за состоянием загрязнения атмосферы на базе подразделений Гидрометеорологической и Санитарно-эпидемиологической служб и промышленных лабораторий.

Основным принципом организации изучения загрязнения атмосферы является комплектность наблюдений за химическим составом воздуха и метеорологическими параметрами, а также единая форма сбора, обработки и обобщения данных, получаемых в разных ведомствах.

Существенным вопросом при проведении наблюдений за загрязнением атмосферы в городе является установление оптимального количества пунктов измерения. Для определения числа пунктов известны несколько способов. В работе [3] предложено использовать метод линейной интерполяции для определения числа пунктов. Однако при этом необходимо иметь определенный период непосредственных измерений уровня загрязнения атмосферы в городе и рассчитать пространственную корреляционную функцию. Известны рекомендации Агентства по охране окружающей среды США, в которых также используется информация об уровне загрязнения атмосферы в городе при определении необходимого числа пунктов измерений.

В правилах контроля показателей качества воздуха дается четкое определение плотности (числа) стационарных постов с учетом площади населенного пункта, рельефа, численности населения и развитости промышленности. Например, при населении 0,5—1 млн жителей устанавливается от 5 до 10 постов. При этом они размещаются из расчета один пост на площади 10—20 км<sup>2</sup> в крупных населенных пунктах и один пост на площади 5—10 км<sup>2</sup> в местах сложного рельефа и районах со значительным числом источников загрязнения.

Для проведения наблюдений (непрерывной регистрации примесей, разового отбора проб воздуха и определения метеорологических параметров), размещения приборов и оборудования на каждом стационарном посту устанавливается специальный павильон — контрольно-измерительный комплекс «ПОСТ-1» или его модификация [4]. Исключаются из практики наблюдения, когда отбор проб воздуха производился из форточек и окон жилых зданий. При этом, как показали специальные эксперименты, вблизи различного рода поверхностей (особенно увлажненных) происходит резкое убывание концентраций в связи с сорбцией таких газов, как двуокись серы. При отборе проб из форточек и окон происходят искажения истинных концентраций также и вследствие аэродинамических эффектов зданий (зоны затишья и застоя воздуха за отдельными участками зданий и др.).

Практика проведения наблюдений показала, что значительные погрешности могут быть вызваны на воздухозаборных каналах. В связи с этим строго устанавливается использование фторопласта как нейтрального материала для воздухозаборных каналов.

На стационарных постах предусматриваются три программы наблюдений: полная, неполная и сокращенная. Наблюдения по полной программе выполняются в 1, 7, 13 и 19 часов по местному декретному времени. На постах всех категорий измеряются основные примеси — пыль, сернистый газ, окись углерода, двуокись азота, наличие которых характерно для атмосферного воздуха практически всех населенных пунктов. Эти примеси являются основными в оценке качества атмосферного воздуха промышленного города при сопоставлении с другими городами. Наряду с основными вводится градация специфических примесей, которые характерны для отдельных городов и видов промышленного производства. Номенклатура специфических примесей, за уровнем концентраций которых необходимо проводить наблюдения, устанавливается для каждого города и промышленного предприятия с учетом типа производства и характера выбросов вредных примесей в атмосферу.

По неполной программе проводятся обязательные наблюдения за основными вредными веществами и специфическими примесями, характерными для промышленных выбросов данного населенного пункта. Наблюдения по этой программе проводятся в 7, 13 и 19 часов местного декретного времени.

Наблюдения по сокращенной программе проводятся ежедневно в 7 и 13 часов местного декретного времени за основными вредными веществами и одной-двумя специфическими примесями. Наблюдения по сокращенной программе допускаются в районах с очень низкими отрицательными температурами воздуха (ниже  $-40^{\circ}\text{C}$ ) и местах, где систематически в течение месяца отмечаются концентрации ниже чувствительности метода анализа данного вещества.

Высота отбора проб воздуха устанавливается 1,5—2 м от поверхности земли. На стационарных постах, оборудованных специальными павильонами типа «ПОСТ-1», допускается непрерывная регистрация и разовый отбор проб на высотах от 1,5 до 2,5 м от земли. Измерение профиля концентрации в приземном слое воздуха в условиях города показали, что именно в слое 0,5—4,0 м, как правило, наблюдаются максимумы концентраций [5]. Ниже этого слоя концентрации быстро убывают из-за поглощения подстилающей поверхностью, а выше убывают вследствие рассеивающего действия атмосферы.

При неблагоприятных метеоусловиях (туман, продолжительная инверсия температуры, штиль и др.) проводятся учащенные наблюдения через каждые 3 часа.

В местах отбора проб воздуха в качестве стандарта устанавливаются обязательные метеорологические наблюдения за скоростью и направлением ветра, температурой и влажностью воздуха, состоянием погоды и подстилающей поверхности. Требования стандарта «Правила контроля показателей качества воздуха» не будут рас-

пространяться на правила контроля качества воздуха на промышленных предприятиях и санитарно-защитных зонах.

Введение стандарта позволит существенно унифицировать правила и способы наблюдений и контроля за состоянием загрязнения атмосферного воздуха, что приведет к повышению качества информации, используемой в различных отраслях народного хозяйства.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Берлянд М. Е. Современные проблемы атмосферной диффузии и загрязнения атмосферы. Л., Гидрометеониздат, 1975. 448 с.
2. Указания по расчету рассеивания в атмосфере вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий. СН 369-74. М., Стройиздат, 1975. 41 с.
3. Безуглая Э. Ю., Клинго В. В. О структуре поля концентраций примесей в городском воздухе. — «Тр. ГГО», 1973, вып. 293, с. 60—67.
4. Янковский И. А. и др. Передвижная лаборатория анализа загрязнения атмосферы. — «Тр. ГГО», 1975, вып. 352, с. 235—238.
5. Guidelines: Air Quality Surveillance Networks. EPA, Office of Air Programs, Research Triangle Park, North, Carolina, May, 1971.

## СПОСОБ РАСЧЕТА КОЭФФИЦИЕНТА ТУРБУЛЕНТНОСТИ В ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ АТМОСФЕРЫ ПО ВЕРТИКАЛЬНОМУ ПРОФИЛЮ ВЕТРА

Коэффициент турбулентности является одной из важнейших характеристик, определяющих распределение и перераспределение в пограничном слое различных примесей и других субстанций. Довольно полный обзор методов расчета вертикальной составляющей коэффициента турбулентности ( $k_z$ ) можно найти в [2]. Не останавливаясь на их сравнительном анализе, следует лишь отметить, что известные в настоящее время способы определения профиля  $k_z$  в пограничном слое по данным ветрового зондирования основаны на интегрировании в той или иной форме уравнений движения атмосферного воздуха [2, 7]. Другими путями по данным наблюдений можно получить лишь оценочные «средние» для слоев величины  $k_z$ . Использование для расчета  $k_z$  интегральных соотношений не связано с какими-либо техническими трудностями, но удовлетворительный результат можно получить далеко не всегда из-за погрешностей в данных наблюдений [5, 7].

Можно предложить иной способ расчета  $k_z$ , который не связан с интегрированием уравнений движения. Не уступая в точности результатов, он позволяет вместе с тем оценивать в процессе расчета качество исходных данных и пользоваться, когда это целесообразно, упрощенными расчетными схемами.

Запишем систему уравнений горизонтального движения воздуха в пограничном слое атмосферы в следующем общем виде:

$$\frac{1}{\rho} \frac{d\tau_x}{dz} = 2\omega_z(V_g - v) + \frac{du}{dt}, \quad (1)$$

$$\frac{1}{\rho} \frac{d\tau_y}{dz} = -2\omega_z(U_g - u) + \frac{dv}{dt}. \quad (2)$$

Здесь  $z$  — высота,  $t$  — время,  $\rho$  — плотность воздуха (в пограничном слое  $\rho \approx \text{const}$ ),  $\tau_x$ ,  $U_g$ ,  $u$  и  $\tau_y$ ,  $V_g$ ,  $v$  — составляющие соответственно вектора напряжения трения  $\tau$ , геострофического ( $V_g$ ) и реального ветра по осям  $x$  и  $y$ ,  $2\omega_z$  — параметр Кориолиса.

Расчетные величины напряжения трения и коэффициента турбулентности

| Величина                                       | Уровни, м |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|--|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|  | 0         | 50    | 100   | 150   | 200   | 250   | 300   | 400   | 500   | 600   | 700   | 800   |
| $K_{\max}$ м <sup>2</sup> /с                   | 0,0       | 12,1  | 14,2  | 14,6  | 14,7  | 14,7  | 14,5  | 13,3  | 13,1  | 11,2  | 10,2  | 8,4   |
| $K_{\min}$                                     | 0,0       | 9,3   | 11,0  | 12,6  | 13,6  | 13,9  | 14,1  | 13,1  | 11,9  | 10,8  | 8,6   | 6,4   |
| $d\psi/dz$ 1/100 м                             | (0,430)   | 0,245 | 0,217 | 0,200 | 0,200 | 0,198 | 0,200 | 0,206 | 0,212 | 0,227 | 0,243 | 0,300 |
| $\tau/\rho$ (5) м <sup>2</sup> /с <sup>2</sup> | (0,416)   | 0,303 | 0,312 | 0,294 | 0,270 | 0,253 | 0,227 | 0,186 | 0,145 | 0,112 | 0,088 | 0,066 |
| $K_{(5)}$ м <sup>2</sup> /с                    | 0,0       | 9,0   | 12,6  | 13,4  | 14,5  | 14,9  | 14,8  | 13,5  | 12,1  | 11,6  | 10,8  | 9,0   |
| $K_{(11)}$                                     | 0,0       |       |       |       |       | 15,6  |       |       |       | 14,7  |       |       |
| $K_{(13)}$                                     |           |       | 12,9  |       |       | 14,2  |       | 13,5  |       |       |       | 8,1   |
| $K_{(15)}$                                     | 0,0       | 9,5   | 12,1  | 14,3  | 14,3  | 14,5  | 14,3  | 13,4  | 12,7  | 11,2  | 9,6   | 6,3   |
| $d\psi/dz$ 1/100 м                             |           | 0,38  | 0,36  | 0,37  | 0,41  | 0,45  | 0,49  | 0,70  |       |       |       |       |

$V_g = 17,5$  м/с;  $k_{(14)} = 18,0$  м<sup>2</sup>/с (слой 100—400 м);  $\bar{\tau} \approx 0,65^\circ\text{C}/100$  м;  $\omega_z = 0,57 \cdot 10^{-4}$  1/с

$V_g = 8,1$  м/с;  $K_{(14)} = 4,8$  м<sup>2</sup>/с (слой 100—250 м);  $\bar{\tau} \approx 0,60^\circ\text{C}/100$  м;  $\omega_z = 0,63 \cdot 10^{-4}$  1/с



|   |         |       |       |       |       |       |       |       |  |
|---|---------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--|
| $\tau_{\rho(5)} \text{ M}^2/\text{c}^2$ | (0,094) | 0,082 | 0,072 | 0,063 | 0,054 | 0,047 | 0,039 | 0,025 |  |
| $K_{(5)} \text{ M}^2/\text{c}^2$        | (0,0)   | 4,0   | 4,8   | 5,2   | 5,5   | 6,0   | 5,9   | 5,8   |  |
| $K_{(11)}$                              | (0,0)   | 4,4   | 4,8   | 4,6   | 3,7   | 3,1   | 2,6   | 1,5   |  |
| $K_{(13)}$                              | (0,0)   |       |       | 5,7   |       |       | 8,7   |       |  |
| $K_{(15)}$                              | (0,0)   |       | 5,1   |       | 5,2   |       | 5,9   |       |  |

$V_g = 9,2 \text{ M}/\text{c}; K_{(14)} = 2,0 \text{ M}^2/\text{c}$  (слой 50—300 м);  $\bar{\gamma} \approx -0,95^\circ\text{C}/100 \text{ м}; \omega_2 = 0,63 \cdot 10^{-4} \text{ 1}/\text{c}$

|   |        |       |       |       |       |       |       |  |       |
|---|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--|-------|
| $d_{\rho}/dz \text{ 1}/100 \text{ м}$   | 0,84   | 0,68  | 0,66  | 0,65  | 0,70  | 0,89  |       |  |       |
| $\tau_{\rho(5)} \text{ M}^2/\text{c}^2$ | (0,058 | 0,054 | 0,048 | 0,045 | 0,041 | 0,032 | 0,020 |  |       |
| $K_{(5)} \text{ M}^2/\text{c}$          | (0,0)  | 0,9   | 1,5   | 2,1   | 2,9   | 2,8   | 2,1   |  | (0,0) |
| $K_{(11)}$                              | (0,0)  |       | 1,9   | 3,2   |       |       |       |  |       |
| $K_{(15)}$                              | (0,0)  | 0,9   | 1,4   | 1,4   | 1,5   | 1,3   | 0,8   |  |       |
| $K_{(13)}$                              | (0,0)  |       | 1,7   | 2,9   |       |       | 2,4   |  |       |

Они дают представление о профиле коэффициента турбулентности в пограничном слое при различных значениях геострофического ветра  $V_g$  для случаев стратификации, близкой к равновесной, и при инверсии. В двух верхних строчках табл. 1 для каждого уровня указаны наименьшее ( $k_{\min}$ ) и наибольшее ( $k_{\max}$ ) значения  $k_z$ , полученные ранее Леттау [7] путем расчета по интегральной схеме. Можно видеть, что почти на всех высотах рассчитанные по (1) значения  $k_z$  находятся между этими экстремальными значениями.

При решении практических задач, например при качественном анализе условий распространения примесей, не всегда необходимо иметь данные о полном профиле коэффициента турбулентности. В ряде случаев достаточно оценочных величин. В этом отношении предложенный способ расчета  $k_z$  особенно удобен, так как позволяет указать несколько упрощенных расчетных схем.

Суть первой из них заключается в том, что величины  $k_z$  (или  $\tau/\rho$ ) вычисляются только на 2—3-х уровнях в пограничном слое, для которых значения  $\psi$  заранее известны. Положение этих уровней можно определить по профилям составляющих скорости ветра. В выбранной системе координат (ось  $x$  направлена по геострофическому ветру) к ним относятся уровни, на которых  $dv=0$  ( $\psi=0$ ),  $-dv=du$  ( $\psi=-45^\circ$ ) и  $du=0$  ( $\psi=-90^\circ$ ), а также уровень подстилающей поверхности, где  $\psi=\psi_0$  — направление ветра у земли. Последнее очевидно из соотношения

$$\operatorname{tg} \varphi_0 = \lim \left( \frac{v}{u} \right) \Big|_{z \rightarrow 0} = \frac{dv}{du} \Big|_{z \rightarrow 0} = \operatorname{tg} \psi_0.$$

Для указанных уровней (5) заметно упрощается и в частности на уровне шероховатости  $z_0$ , где  $u \approx v \approx 0$ , принимает вид

$$\frac{\tau_0}{\rho} = - \frac{2 \omega_z V_g \cos \varphi^0}{d\psi/dz \Big|_{z=z_0}}. \quad (10)$$

По данным, приведенным в табл. 1, значение  $d\psi/dz$  при  $z=z_0$  примерно вдвое больше, чем на уровнях 200—300 м и приближенно равно отношению  $\varphi_0 \cos \varphi_0 / \kappa h$ , где  $\kappa$  — постоянная Кармана ( $\kappa \approx 0,4$ ) и  $h$  — высота уровня, на котором  $\psi=0$ . Поэтому (10) можно записать в следующем удобном для расчетов виде ( $v_*$  — динамическая скорость)

$$v_*^2 = \frac{2 \omega_z \kappa V_g h}{\varphi_0}.$$

Попутно заметим, что делением и умножением правой части на  $V_g$  это равенство приводится к обычно употребляемой форме

$$v_*^2 = \kappa^2 \chi^2 V_g^2,$$

где  $\chi$  — геострофический коэффициент трения. Его величина зависит от ряда параметров, так как

$$\chi = \frac{1}{\kappa} \left( \frac{2 \omega_z \kappa h}{\varphi_0 V_g} \right)^{1/2}.$$

На возможность представления в различной форме связи  $v_*$  с  $V_g$  указывалось в [6].

Из формы кривых 1—3 на рис. 1 и данных табл. 1 видно, что выше приземного слоя вторая производная от  $\psi$  по высоте заметно меньше первой, поэтому расчетную схему можно еще упростить, подставляя в (5) приближенное равенство

$$-\frac{d\psi}{dz} \approx \frac{dV/dz}{2[(V_g - u) \sin \psi + v \cos \psi]},$$

которое можно получить с помощью (6) путем дифференцирования (5) и отбрасывания членов, содержащих вторую производную от  $\psi$ .

При этом для указанных выше характерных уравнений из уравнения (5) получается:

$$\left. \begin{aligned} k_z &\approx 4 \omega_z (V_g - u) v / \left( \frac{dV}{dz} \right)^2 \text{ при } \psi = 0^\circ, \\ k_z &\approx -2 \omega_z [(V_g - u)^2 - v^2] / \left( \frac{dV}{dz} \right)^2 \text{ при } \psi = -45^\circ, \\ k_z &\approx 4 \omega_z (u - V_g) v / \left( \frac{dV}{dz} \right)^2 \text{ при } \psi = -90^\circ. \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

Вторая упрощенная схема расчета базируется на возможности аппроксимации профилей составляющих скорости ветра выше приземного слоя (при  $z > h_0$ ) с помощью выражений, аналогичных полученным теоретическим путем для постоянного с высотой коэффициента турбулентности:

$$\left. \begin{aligned} V_g - U &= B e^{-a(z - h_0)} \cos A, \\ v &= B e^{-a(z - h_0)} \sin A. \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

Отличие состоит в том, что для реальных профилей величины  $a$  и  $dA/dz$ , оставаясь приблизительно постоянными в пределах отдельных слоев, могут меняться от слоя к слою (аналогично вертикальному градиенту температуры  $\gamma$ ). Простой способ определения этих величин состоит в том, что по данным ветрового зондирования рассчитываются и наносятся на график в зависимости от высоты значения  $\lg W^2$  и  $A = \text{arctg} \left( \frac{v}{V_g - u} \right)$ . При этом, как правило, появляются ломаные линии, состоящие из отрезков прямых, тангенсы угла наклона которых и дают соответственно искомые величины  $a = -\frac{2,3}{2} \cdot \frac{d}{dz} (\lg W^2)$  и  $dA/dz$ . Подставляя (12) в (8), получим

$$k_z \approx -\frac{2 \omega_z a}{\frac{d\psi}{dz} \left[ a^2 + \left( \frac{dA}{dz} \right)^2 \right]}. \quad (13)$$

В частном случае равенства  $\frac{d\psi}{dz} = a = \frac{dA}{dz}$  выражение (13) преобразуется в формулу Д. Л. Лайхтмана [4]:

$$k = \frac{4 \omega_z (lg e)^2}{\left\{ \frac{d}{dz} [lg \{(V_g - u)^2 + v^2\}] \right\}^2}. \quad (14)$$

Приближенная формула (13) дает более точный результат, чем (14), так как для реальных профилей ветра обычно  $\frac{d\psi}{dz} \neq a \neq \left| \frac{dA}{dz} \right|$ , хотя расхождения не всегда велики.

Формула (13) позволяет также произвести оценку профиля  $k_z$  и в том случае, если данных о геострофическом ветре нет. Полагая  $\frac{d\psi}{dz} \approx \frac{a^2 + (dA/dz)^2}{2a}$  и подставляя в (13), получим

$$k_z \approx \frac{\omega_z}{(d\psi/dz)^2}. \quad (15)$$

Результаты расчетов  $k_z$  по (11), (13) и (15) также приведены в табл. 1.

Уравнения (5) и (8) позволяют рассчитывать по профилям составляющих скорости ветра и другие характеристики турбулентного обмена. Например, разделив и умножив правую часть (8) на  $W^2$ , запишем результат в виде

$$\frac{\tau}{\rho} \left( \frac{dV}{dz} \right) = \alpha_z \omega_z W^2, \quad (16)$$

где  $\alpha_z = 2,3 d \lg W^2/d\psi$ . Левая часть равенства определяет количество кинетической энергии среднего движения, которое в единицу времени трансформируется в энергию пульсаций. Как видно из (16), оно пропорционально квадрату дефицита скорости ( $W$ ) и может быть непосредственно рассчитано по данным ветрового зондирования.

Кроме того, (8) позволяет установить вероятные формы связи между характеристиками среднего движения и такими характеристиками турбулентности, как масштаб турбулентности ( $l$ ) и кинетическая энергия пульсаций ( $b$ ). Если представить (16) в виде

$$\frac{\tau}{\rho} = \left[ \frac{\alpha_z \omega_z W^2}{(dV/dz)^2} \right] \frac{dV}{dz} = l V b \left( \frac{dV}{dz} \right),$$

учесть порядок величин  $l$  и  $b$  и принять во внимание соображения, имеющиеся в [1] о соотношении членов уравнения баланса энергии турбулентности, то можно прийти к равенствам:

$$l = \left[ \frac{V c_1 \alpha_z \omega_z}{dV/dz} \right]^{\frac{1}{2}} \frac{W}{dV/dz} f_1(Ri),$$

$$b = \left[ \frac{\alpha_z \omega_z}{V c_1 (dV/dz)} \right]^{\frac{1}{2}} W \cdot f_2'(Ri),$$

где  $c_1 = 0,046$ , а  $f_1$  и  $f_2$  — некоторые функции от числа Ричардсона ( $Ri$ ), стремящиеся к единице при  $Ri \rightarrow 0$ .

Нетрудно также показать, что масштаб турбулентности  $l$  и путь смещения  $\bar{l}$  связаны зависимостью  $\bar{l} = (c_1)^{-\frac{1}{4}} l$ , причем постоянная Кармана в соотношении  $\bar{l} = \kappa z$  представляет из себя комбинацию некоторых величин, а именно  $\kappa = \left[ \frac{\alpha_z \omega_z}{dV/dz} \right] \frac{W}{z(dV/dz)}$ .

Представляется, что предложенный выше метод расчета  $k_z$  может оказаться полезным во всех случаях, когда по условиям задачи необходимо оценивать интенсивность вертикального обмена и переноса примесей и других субстанций.

В заключение автор выражает благодарность кандидату физ.-мат. наук Е. Л. Гениховичу за полезный обмен мнениями при подготовке данной работы.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Берлянд М. Е. Современные проблемы атмосферной диффузии и загрязнения атмосферы. Л., Гидрометеиздат, 1975, с. 20—28.
2. Ключникова Л. А. К вопросу о расчете коэффициента турбулентности в пограничном слое атмосферы. — «Тр. ГГО», 1967, вып. 205, с. 44—64.
3. Курпакова Т. А., Орленко Л. Р. Профиль ветра в пограничном слое атмосферы по экспериментальным данным — «Тр. ГГО», 1970, вып. 257, с. 64—73.
4. Лайхтман Д. Л. Новый метод определения коэффициента турбулентной вязкости в пограничном слое атмосферы. — «Тр. ГГО», 1952, вып. 37(99), с. 78—82.
5. Матвеев Л. Т. Основы общей метеорологии. Физика атмосферы. Л., Гидрометеиздат, 1965, с. 414.
6. Danard M. B. and Clodman S. On the Relationship between the Surface Stress and the Wind.—„Month. Weather rev.”, 1970, v. 98, N 9, p. 698.
7. Lettau H. H. Reexamination of the Leipzig Wind Profile Considering Some Relations Between Wind and Turbulence in the Frictional Layer.—„Tellus” 1950, v. 2, N 2, p. 125—129.
8. Rossby C. G. and Montgomery R. B. The Layer of Frictional Influence in Wind and Ocean Currents.—„Mass. Inst. of Technol. Mat. Papers.”, 1935, v. 111, N 3, p. 1—101.

*Э. Ю. Безуглая, Е. В. Виноградова, Л. И. Елекоева,  
Б. Н. Жабарова, В. Ф. Лебедева, Е. А. Разбегаева,  
Г. Б. Захарова, К. Э. Церфас*

## ИНВЕРСИИ ТЕМПЕРАТУРЫ НАД ТЕРРИТОРИЕЙ СССР

В последние годы в территориальных управлениях Гидрометеорологической службы под методическим руководством Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова выполнена большая работа по изучению климатических характеристик, обуславливающих загрязнение атмосферы, т. е. потенциал загрязнения. Одной из характеристик, определяющих стратификацию нижнего слоя тропосферы, являются инверсии температуры. Наличие температурных инверсий препятствует развитию вертикальных движений, они ограничивают объем воздуха, в котором происходит перемешивание примесей, содержащихся в выбросах промышленных объектов, и тем самым способствуют усилению загрязнения воздуха [5].

Для выполнения исследований по изучению инверсий использованы данные аэрологических наблюдений по 77 станциям, расположенным в разных физико-географических районах на территории СССР в основном за десятилетний период 1959—1968 гг. Первые результаты этой работы были опубликованы в [1, 7, 8, 9, 11]. В [1] описаны основные особенности обработки.

В настоящей статье приведены результаты обобщения материалов исследования инверсий температуры в двухкилометровом слое атмосферы над территорией СССР.

**1. Методика обработки.** Следует отметить, что не по всем станциям имеются сведения за все четыре срока наблюдений (3, 9, 15 и 21 час по московскому времени), так как на ряде станций наблюдения выполняются в два или три срока, не совпадающие для всех станций: в одних случаях это утренние и вечерние наблюдения, в других — ночные, дневные, вечерние и т. п. Это обстоятельство затрудняет сравнение результатов в связи с тем, что повторяемость, мощность и интенсивность инверсий испытывают значительные колебания в течение суток. Кроме того, на всей сети пунктов температурное зондирование производится по московскому времени, поэтому данные за один и тот же срок существенно различаются за счет разницы в среднесолнечном времени. Так, например, данные

Таблица 1

Среднегодовые значения мощности ( $\Delta H$ ), интенсивности ( $\Delta T$ ) и повторяемости ( $P$ ) приземных и приподнятых инверсий в слоях  $\leq 0,25$ ,  $\leq 0,5$  и  $0,01-2,00$  км

| Станции                        | Приземные инверсии |               |                    | Приподнятые инверсии с НГ |    |               |                    |    |               |                     |    |               |
|--------------------------------|--------------------|---------------|--------------------|---------------------------|----|---------------|--------------------|----|---------------|---------------------|----|---------------|
|                                | P%                 | $\Delta H$ км | $\Delta T^\circ C$ | $\leq 0,25$ км            |    |               | $\leq 0,5$ км      |    |               | в слое 0,01—2,00 км |    |               |
|                                |                    |               |                    | P%                        | P% | $\Delta H$ км | $\Delta T^\circ C$ | P% | $\Delta H$ км | $\Delta T^\circ C$  | P% | $\Delta H$ км |
| Алма-Ата . . . . .             | 47                 | 0,38          | 4,0                | 8                         | 17 | 1,15          | 8,2                | 31 | 0,41          | 2,9                 |    |               |
| Анадырь . . . . .              | 48                 | 0,78          | 5,5                | 6                         | 13 | 1,10          | 6,0                | 29 | 0,55          | 2,5                 |    |               |
| Архангельск . . . . .          | 33                 | 0,39          | 3,1                | 4                         | 15 | 0,72          | 4,3                | 37 | 0,40          | 1,8                 |    |               |
| Аральск . . . . .              | 51                 | 0,55          | 3,6                | 7                         | 13 | 1,00          | 6,4                | 27 | 0,49          | 3,6                 |    |               |
| Астрахань . . . . .            | 36                 | 0,46          | 2,6                | 12                        | 21 | 1,32          | 6,7                | 39 | 0,46          | 2,0                 |    |               |
| Баку . . . . .                 | 19                 | 0,37          | 2,1                | 13                        | 25 | 1,23          | 7,1                | 59 | 0,40          | 2,1                 |    |               |
| Благовещенск . . . . .         | 49                 | 0,55          | 4,8                | 3                         | 7  | 1,24          | 5,5                | 16 | 0,35          | 1,5                 |    |               |
| Владивосток . . . . .          | 32                 | 0,32          | 1,7                | 10                        | 21 | 0,92          | 3,5                | 47 | 0,48          | 1,7                 |    |               |
| Волгоград . . . . .            | 39                 | 0,40          | 3,5                | 15                        | 24 | 0,87          | 7,6                | 42 | 0,40          | 3,1                 |    |               |
| Джалал-Абад . . . . .          | 48                 | 0,35          | 2,5                | 6                         | 8  | 0,37          | 1,1                | 19 | 0,19          | 0,5                 |    |               |
| Душанбе . . . . .              | 47                 | 0,26          | 2,8                | 5                         | 8  | 0,71          | 2,2                | 11 | 0,23          | 0,7                 |    |               |
| Ереван . . . . .               | 18                 | 0,17          | 1,4                | 22                        | 22 | 0,43          | 2,5                | 26 | 0,17          | 1,4                 |    |               |
| Иркутск . . . . .              | 47                 | 0,56          | 5,6                | 4                         | 8  | 1,47          | 10,4               | 18 | 0,45          | 2,3                 |    |               |
| Казань . . . . .               | 34                 | 0,64          | 3,8                | 4                         | 18 | 0,82          | 7,2                | 42 | 0,43          | 2,7                 |    |               |
| Калач . . . . .                | 31                 | 0,48          | 3,4                | 9                         | 23 | 0,85          | 4,8                | 43 | 0,43          | 2,4                 |    |               |
| Калининград . . . . .          | 27                 | 0,41          | 2,5                | 8                         | 17 | 0,67          | 4,7                | 40 | 0,37          | 2,2                 |    |               |
| Каунас . . . . .               | 19                 | 0,35          | 3,7                | 15                        | 28 | 0,55          | 5,6                | 55 | 0,36          | 2,3                 |    |               |
| Комсомольск-на-Амуре . . . . . | 33                 | 0,66          | 4,5                | 6                         | 18 | 0,95          | 6,9                | 31 | 0,47          | 2,1                 |    |               |
| Киров . . . . .                | 33                 | 0,44          | 3,6                | 6                         | 17 | 1,00          | 7,5                | 40 | 0,51          | 3,1                 |    |               |
| Красноярск . . . . .           | 42                 | 0,65          | 5,6                | 1                         | 5  | 0,90          | 5,4                | 20 | 0,47          | 1,7                 |    |               |
| Курск* . . . . .               | 32                 | 0,44          | 2,6                | 16                        | 23 | 0,90          | 4,0                | 45 | 0,46          | 2,1                 |    |               |
| Куйбышев . . . . .             | 38                 | 0,55          | 3,9                | 9                         | 19 | 1,08          | 6,7                | 27 | 0,48          | 2,5                 |    |               |
| Ленинград . . . . .            | 36                 | 0,34          | 2,6                | 8                         | 20 | —             | —                  | 41 | —             | —                   |    |               |
| Ленкорань . . . . .            | 33                 | 0,38          | 2,9                | 8                         | 14 | 1,29          | 5,4                | 42 | 0,41          | 2,1                 |    |               |
| Махачкала . . . . .            | 25                 | 0,45          | 2,8                | 5                         | 11 | 1,19          | 7,9                | 45 | 0,41          | 2,7                 |    |               |
| Минск . . . . .                | 21                 | 0,39          | 3,3                | 7                         | 18 | 0,71          | 5,6                | 45 | 0,32          | 2,6                 |    |               |
| Москва . . . . .               | 24                 | 0,41          | 3,4                | 9                         | 22 | 1,18          | 7,8                | 45 | 0,44          | 2,8                 |    |               |
| Мурманск . . . . .             | 23                 | 0,50          | 3,7                | 6                         | 17 | —             | —                  | 44 | —             | —                   |    |               |
| Нагаева, бухта . . . . .       | 42                 | 0,41          | 2,4                | 6                         | 13 | 0,96          | 6,0                | 37 | 0,48          | 2,3                 |    |               |
| Николаевск-на-Амуре . . . . .  | 47                 | 0,42          | 4,0                | 6                         | 12 | 1,16          | 5,7                | 30 | 0,44          | 1,8                 |    |               |
| Омск . . . . .                 | 45                 | 0,54          | 4,0                | 9                         | 11 | 0,86          | 6,0                | 30 | 0,43          | 2,0                 |    |               |
| Оренбург . . . . .             | 39                 | 0,43          | 4,0                | 9                         | 22 | 1,08          | 12,0               | 42 | 0,38          | 2,5                 |    |               |

| Станции                  | Приземные инверсии |                 |                     | Приподнятые инверсии с НГ |    |                 |                     |                     |                 |                     |
|--------------------------|--------------------|-----------------|---------------------|---------------------------|----|-----------------|---------------------|---------------------|-----------------|---------------------|
|                          | P%                 | $\Delta H_{км}$ | $\Delta T^{\circ}C$ | <0,25 км                  |    | <0,5 км         |                     | в слое 0,01—2,00 км |                 |                     |
|                          |                    |                 |                     | P%                        | P% | $\Delta H_{км}$ | $\Delta T^{\circ}C$ | P%                  | $\Delta H_{км}$ | $\Delta T^{\circ}C$ |
| Рига . . . . .           | 24                 | 0,29            | 2,0                 | 10                        | 23 | 0,57            | 3,6                 | 59                  | 0,35            | 1,5                 |
| Ростов-на-Дону . . . . . | 31                 | 0,47            | 3,3                 | 11                        | 22 | 0,97            | 6,9                 | 25                  | 0,47            | 2,9                 |
| Салехард . . . . .       | 45                 | 0,63            | 5,0                 | 7                         | 16 | 1,21            | 7,6                 | 34                  | 0,60            | 3,0                 |
| Симферополь . . . . .    | 34                 | 0,32            | 2,1                 | 4                         | 9  | 1,18            | 4,9                 | 27                  | 0,40            | 1,5                 |
| Свердловск . . . . .     | 34                 | 0,51            | 4,7                 | 5                         | 16 | 1,31            | 10,0                | 39                  | 0,43            | 2,9                 |
| Сусуман . . . . .        | 52                 | 0,87            | 10,3                | 3                         | 5  | 1,44            | 7,6                 | 16                  | 0,67            | 2,8                 |
| Таллин . . . . .         | 30                 | 0,38            | 3,6                 | 10                        | 20 | 0,91            | 3,9                 | 44                  | 0,47            | 1,7                 |
| Тамды . . . . .          | 30                 | 0,53            | 3,4                 | 4                         | 13 | 1,17            | 4,7                 | 29                  | 0,55            | 2,5                 |
| Ташкент . . . . .        | 47                 | 0,35            | 3,6                 | 4                         | 10 | 0,77            | 3,8                 | 18                  | 0,36            | 1,6                 |
| Термез . . . . .         | 47                 | 0,33            | 4,2                 | 5                         | 9  | 0,73            | 3,3                 | 19                  | 0,33            | 1,3                 |
| Тобольск* . . . . .      | 47                 | 0,64            | 6,0                 | 10                        | 10 | 1,16            | 7,0                 | 33                  | 0,52            | 3,0                 |
| Туапсе . . . . .         | 30                 | 0,25            | 1,3                 | 9                         | 20 | 0,59            | 2,1                 | 57                  | 0,32            | 0,9                 |
| Уфа . . . . .            | 39                 | 0,66            | 5,4                 | 6                         | 26 | 1,73            | 7,3                 | 37                  | 0,54            | 2,6                 |
| Фрунзе . . . . .         | 46                 | 0,33            | 4,5                 | 9                         | 9  | 1,03            | 3,5                 | 20                  | 0,27            | 1,3                 |
| Хабаровск . . . . .      | 40                 | 0,46            | 2,8                 | 6                         | 12 | 0,89            | 3,5                 | 26                  | 0,48            | 1,5                 |
| Чита . . . . .           | 49                 | 0,47            | 4,9                 | 4                         | —  | —               | —                   | —                   | —               | —                   |
| Якутск . . . . .         | 51                 | 0,52            | 7,1                 | 9                         | 16 | 0,89            | 8,5                 | 30                  | 0,41            | 3,3                 |

за 3 часа по московскому времени охватывают наблюдения, проводимые от 2 до 11 часов по местному времени.

Чтобы иметь сопоставимые характеристики, для каждой станции было выполнено приведение данных к четырехразовым наблюдениям, путем определения данных за недостающие сроки методом временной и пространственной интерполяции. Для отдельных районов строились графики суточного хода и карты распределения характеристик инверсии за отдельные сроки, по которым находились интерполированные значения. Кроме того, как показано в [3], для континентальных станций имеется тесная зависимость между повторяемостью приземных инверсий и повторяемостью слабых ветров. Недостающие значения повторяемости находились по графику или по формуле (1) из [3]. После получения необходимых характеристик за отдельные сроки по каждой станции вычислялось соответствующее среднее значение за четыре срока.

В табл. 1 приведены сведения о повторяемости, мощности и интенсивности инверсий за год (средние за четыре срока). Станции, где один из сроков определяется интерполяцией, обозначены звездочкой (\*). Данные станций, где отсутствуют два срока, в таблице не приведены. По данным для каждой станции строились графики годового и суточного хода характеристик распределения повторяе-



52-01

мости, мощности и интенсивности инверсий для января, июля и за год (средние за четыре срока).

2. **Приземные инверсии температуры.** Среднегодовые значения повторяемости приземных инверсий приведены в табл. 1. Повторяемость увеличивается с запада на восток территории. Наименьшей повторяемостью характеризуются районы Прибалтики и Белоруссии (20—30% от общего числа наблюдений). Уменьшенные значения наблюдаются также в Закавказье (Ереван 18%, Баку 19%). Рост повторяемости приземных инверсий начинается за Уралом и имеет две области с максимумами над бассейном р. Оби (Салехард, Тобольск) до 45—47% и в районах р. Колымы и Забайкалья до 50—52%.

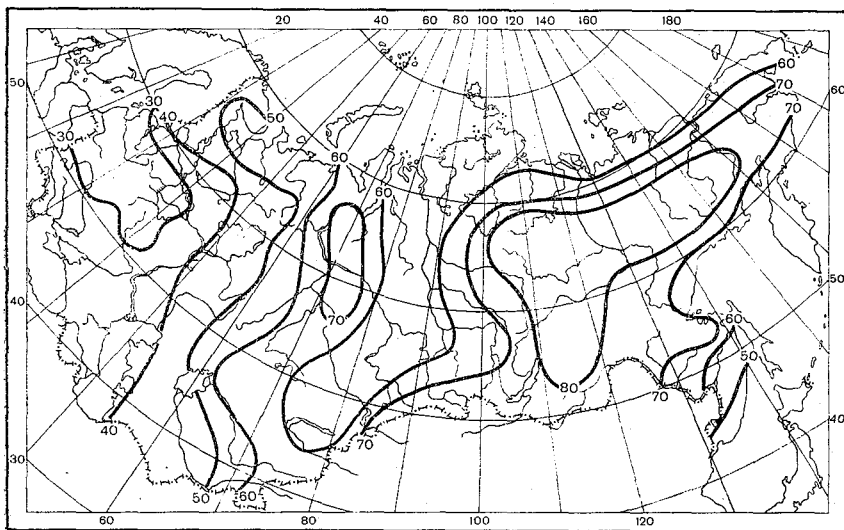


Рис. 1. Распределение повторяемости (%) приземных инверсий на территории СССР в январе.

Более 40% времени года приземные инверсии сохраняются над обширной территорией Сибири (к востоку от р. Енисей), над Алтаем и югом Средней Азии.

На побережье Белого и Баренцева морей повторяемость приземных инверсий температуры составляет 23—25%. Она увеличивается до 35—45% на побережьях северо-восточных и восточных окраинных морей. На побережьях Черного и Каспийского морей повторяемость приземных инверсий составляет 20—35%.

Зимой различия в частоте формирования приземных инверсий температуры по территории СССР возрастают (рис. 1). Над ЕТС повторяемость их находится в пределах 22—56%, а над Азиатской частью страны — 45—90%. Минимальная повторяемость инвер-

сий, как и в целом за год, наблюдается в Прибалтике и Белоруссии (20—28%), что связано с частым прохождением циклонов, сопровождающихся сильными ветрами и увеличением облачности. Азиатская часть территории СССР в холодное полугодие находится под воздействием обширной области сибирского антициклона. Длительные периоды ясной безветренной погоды определяют сильное радиационное выхолаживание подстилающей поверхности и создают благоприятные условия для формирования радиационных инверсий. В Восточной Сибири большую часть суток повторяемость приземных инверсий составляет 80—100% и лишь в дневное время снижается до 55—60%. В районе Якутии и бассейна р. Колымы и в дневное время она в январе составляет 80—90%. В районе Алтая и Саян зимой повторяемость приземных инверсий в ночное время составляет 93—97%, поскольку здесь они усиливаются орографией, а в дневное время здесь и над всем югом Западной Сибири — 40—60%.

Над восточной частью Западно-Сибирской низменности повторяемость приземных инверсий несколько ниже, так как зимой здесь часто преобладает циклоническая деятельность. В горных районах Средней Азии в вечернее и ночное время приземные инверсии довольно часты, но утром и днем они нередко разрушаются. Повторяемость приземных инверсий в эти сроки в Киргизии и Казахстане составляет 40—60%, а в Узбекистане и Туркмении — 25—40%. Следует отметить, что на побережье северных и восточных окраинных морей повторяемость приземных инверсий зимой также велика (60—75%). Длительная полярная ночь обуславливает значительное выхолаживание подстилающей поверхности, которое усиливается за счет стока холодного воздуха с континентальных районов вблизи полюса холода [2, 4].

Летом характер распределения повторяемости приземных инверсий температуры резко меняется. Над континентом решающее значение в формировании приземных инверсий приобретает радиационный фактор, поэтому имеет место широтное распределение частоты приземных инверсий. Наименьшая их повторяемость (12—25%) охватывает районы, лежащие за полярным кругом, так как «белые ночи» не создают условий для длительного радиационного выхолаживания приземного слоя атмосферы. Инверсии образуются поздно вечером и рано утром разрушаются, в утренние и вечерние сроки они обычно наблюдаются редко. Развитию приземных инверсий препятствуют также сильные ветры. Низкая повторяемость приземных инверсий температуры (до 25%) отмечается также на западе ЕТС, побережье Черного моря, в Приморском крае и на Камчатке. Область высокой повторяемости приземных инверсий (35—45%) летом охватывает юг Урала, Казахстан, Среднюю Азию, Алтай, Саяны, Хабаровский край и южную часть Магаданской области. Средние значения повторяемости инверсий на июль, определяемые в основном их частотой в ночное время, составляют на побережье дальневосточных, северных и внутренних морей, 40—60%, над большей частью территории ЕТС, Урала и Сибири — 75—

80%, а в Средней Азии они увеличиваются до 85—100% (здесь часто отмечаются инверсии и в утренние сроки).

Существенное влияние на температурную стратификацию нижнего слоя атмосферы до высоты 1,0—1,5 км на побережье дальневосточных морей в летний период оказывает муссонный поток [2].

Анализ всех имеющихся материалов по сезонным изменениям повторяемости приземных инверсий позволил выделить ряд осо-

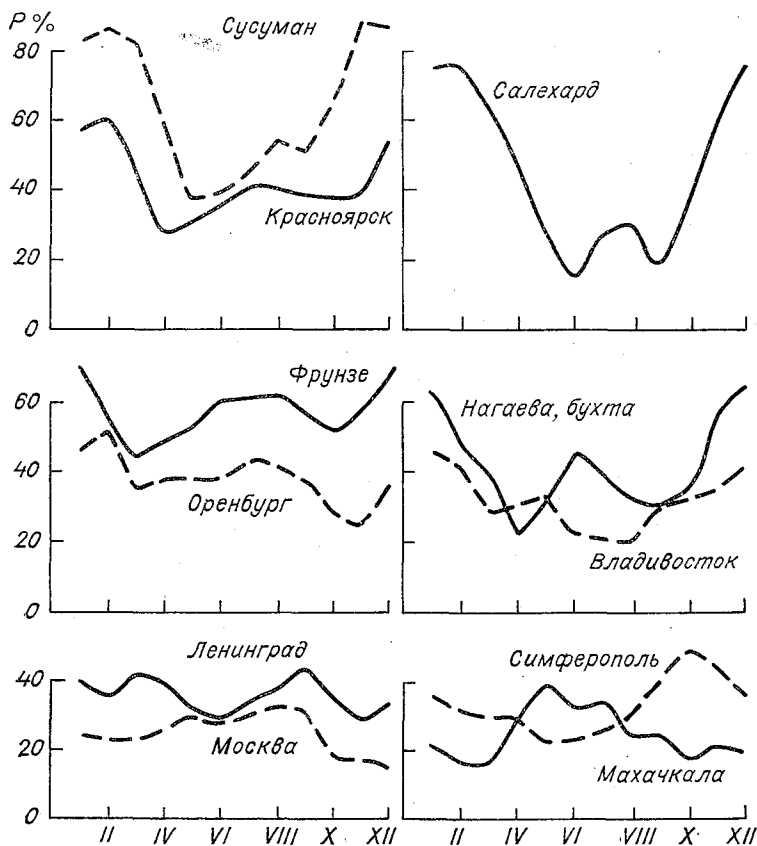


Рис. 2. Годовой ход повторяемости приземных инверсий в разных районах Советского Союза.

бенностей. На рис. 2 представлены наиболее характерные примеры годового хода повторяемости приземных инверсий температуры в разных физико-географических районах на территории СССР. В северо-западной части ЕТС и на побережье Балтийского моря (Ленинград) наиболее часты (30—45%) приземные инверсии весной (март—апрель) и осенью (сентябрь). В летние и зимние месяцы повторяемость приземных инверсий составляет 20—25%. Уменьшение повторяемости летом обусловлено большой длитель-

ностью полярного дня, зимой — усилением ветра. Над центром и югом ЕТС (Москва) отмечается плавное увеличение повторяемости приземных инверсий от зимы (20—30%) к лету с максимумом в августе — сентябре (30—40%) за счет высокой повторяемости ночных инверсий. На юго-востоке ЕТС (Оренбург), кроме летнего максимума, появляется второй — в феврале, когда повторяемость приземных инверсий возрастает и может оказаться больше, чем летом. Над обширной территорией, включающей Урал, Западную и Восточную Сибирь, имеет место зимнее повышение повторяемости инверсий. Здесь с апреля по август — сентябрь повторяемость приземных инверсий составляет 30—40%, а зимой увеличивается: на Урале до 45—50%, в Западной Сибири до 55—70%, а в Забайкалье и Якутии до 70—75%. Наибольшая повторяемость характерна для континентальных районов Магаданской области. В Сусумане, Сеймчане, Оймяконе с ноября по март она составляет 83—98% [2], т. е. практически в течение всей зимы приземные инверсии не разрушаются (Сусуман и Красноярск). Весной повторяемость приземных инверсий резко снижается, что обусловлено разрушением их нижней границы в дневные часы.

Существенное влияние на годовой ход повторяемости инверсий оказывают крупные водные объекты. Вблизи них важную роль в образовании приземных инверсий летом играет охлаждение нижних слоев под влиянием более холодной водной массы. В результате воздействия этого фактора наблюдается повышение повторяемости приземных инверсий в районе Аральского моря (до 55%), на берегу Братского водохранилища в ночное время летом до 50%, на берегах Каспийского моря в мае (Баку, Махачкала, Астрахань). На побережье Черного моря хорошо выражен максимум инверсий в октябре (Симферополь, Туапсе).

На побережье северных и северо-восточных окраинных морей (Салехард, мыс Шмидта, бухта Провидения (в весенний период (апрель — май) длительное и интенсивное таяние льда на море является причиной увеличения продолжительности периода преобладания инверсионного распределения температуры в приземном слое. На побережье дальневосточных морей под действием муссона создается летнее повышение повторяемости приземных инверсий. Сравнение годового хода повторяемости приземных инверсий во Владивостоке и в более северных широтах (бухта Нагаева, Охотск, Анадырь) показывает, что в южных широтах зимний максимум слабее, чем в северных. Заметно увеличение числа инверсий, связанное с началом летнего муссона в мае во Владивостоке и в июне в бухте Нагаева. В Средней Азии имеет место зимний максимум (в январе и декабре) приземных инверсий (40—70%). Кроме того, отмечается второй летний максимум до 40—60%, обусловленный высокой частотой инверсий летом в ночные и утренние часы. Несколько ниже повторяемость приземных инверсий в марте и октябре (до 35—45%) (г. Фрунзе).

**Мощность и интенсивность приземных инверсий температуры.** Над значительной частью территории СССР средняя мощность

приземных инверсий находится в пределах 0,3—0,5 км при интенсивности 2,5—4,0°C (см. табл. 1) (над ЕТС, в Средней Азии, Закавказье). К востоку от Урала  $\Delta H$  возрастает и достигает в отдельных районах 0,6—0,8 км (Абакан, Красноярск, Иркутск, Экимчан, Чита, Игарка, Анадырь, Салехард и др.) при интенсивности 5,0—7,0°C. Отмечается значительная изменчивость в годовом ходе мощности и интенсивности. За исключением Средней Азии и некоторых при-

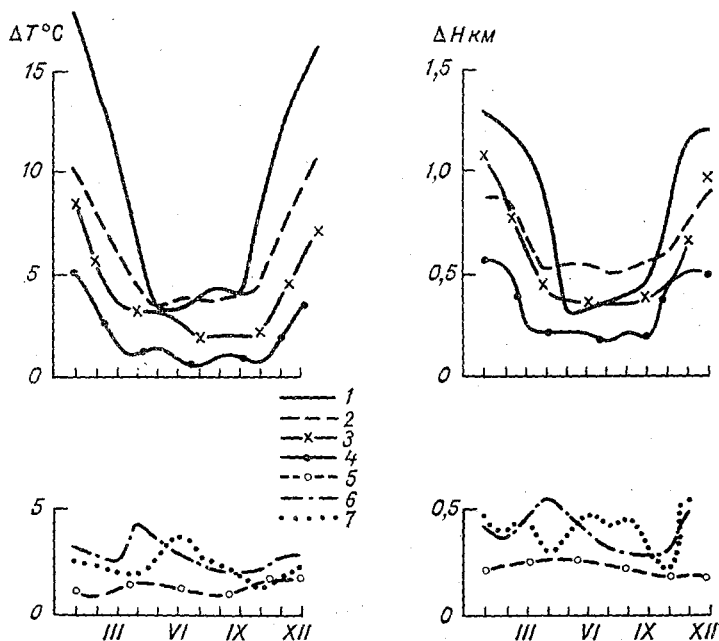


Рис. 3. Годовой ход интенсивности  $\Delta T$  и мощности инверсии  $\Delta H$  по данным разных городов.

1 — Сусуман; 2 — Красноярск, 3 — Казань, 4 — Ленинград, 5 — Туапсе, 6 — Махачкала, 7 — Нагаева, бухта.

брежных районов годовой ход указанных характеристик имеет максимум зимой и минимум летом для любого часа суток (рис. 3). Различия между отдельными районами проявляются в основном в зимнее время. Летом  $\Delta H = 0,25 \div 0,35$  км и  $\Delta T = 1 \div 4^\circ\text{C}$ ; они несколько увеличиваются с запада на восток.

Над большей частью ЕТС в январе — декабре мощность приземных инверсий составляет 0,45—0,70 км, интенсивность 4—7°C; над Средним Поволжьем и Уралом они увеличиваются соответственно до 0,85—1,0 км и 7—9°C (Казань, Куйбышев, Оренбург, Свердловск).

Над большей частью Сибири, в Забайкалье, на побережье северных морей приземные инверсии характеризуются средней мощ-

находится в слое 0,01—2,00 км, можно отметить (см. табл. 1), что почти 50% всех высотных инверсий, образующихся в слое до 2 км, являются низкими (с  $HГ \leq 0,50$  км). Поэтому особенности распределения их до некоторой степени сходны с таковыми для инверсий, имеющих  $HГ$  в слое до 0,5 км. Наибольшая повторяемость высотных инверсий в целом за год наблюдается на ЕТС с максимумом

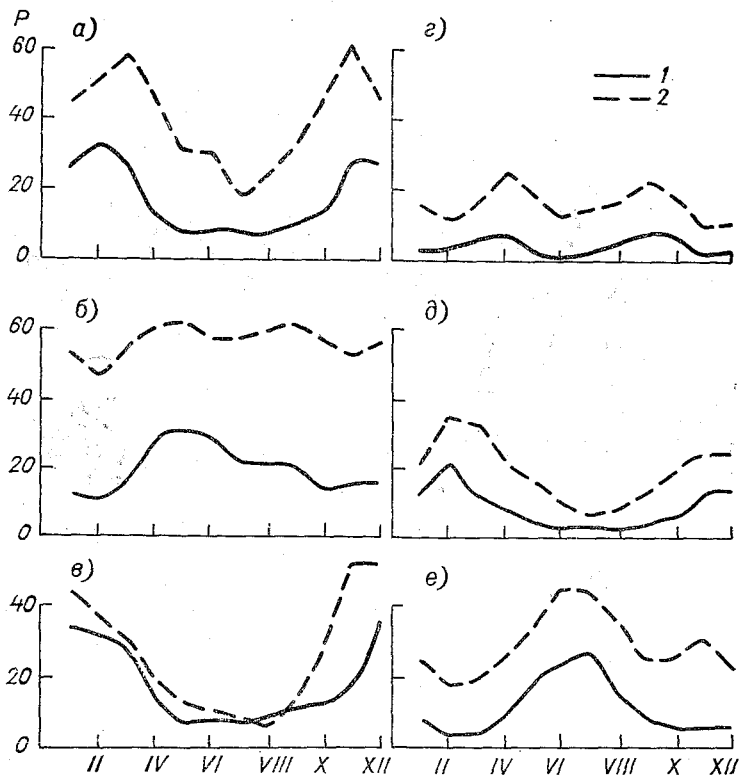


Рис. 5. Годовой ход повторяемости инверсий с  $HГ \leq 0,5$  (1) и с  $HГ \leq 2,0$  км (2) по данным разных городов.  
 а — Новосибирск, б — Туапсе, в — Куйбышев, г — Сусуман, д — Фрунзе, е — Николаевск-на-Амуре.

в районах Прибалтики, Белоруссии и центральной части ЕТС. Увеличена она также на побережье Черного и Каспийского морей (40—59%) и вдоль восточных окраинных морей (30—47%). К востоку от Урала повторяемости высотных инверсий уменьшаются до 20—18%, при этом минимальные значения отмечены в Средней Азии (11—20%).

Так же как и для инверсий с нижней границей в слое до 0,5 км, в северо-западных, центральных районах ЕТС, Поволжье и в Сред-

ней Азии наблюдается зимний максимум и летний минимум повторяемости высотных инверсий. При этом над ЕТС годовая амплитуда изменения повторяемости является наибольшей: зимой повторяемость высотных инверсий достигает 58—78%, летом снижается до 20—35%, а в отдельных местах до еще меньших значений (в Куйбышеве до 6%). В Средней Азии повторяемость высотных инверсий изменяется от 25—50% зимой до 5—10% летом. На Урале, в Западной Сибири и Красноярском крае годовой ход характеризуется двумя максимумами (40—60%): весенним (март) и осенним (ноябрь) и минимумами зимой (25—40%) и летом (10—20%). На побережье дальневосточных морей годовой ход не всегда выражен достаточно четко, однако на всех станциях отмечается повышение повторяемости высотных инверсий в теплое полугодие. Над территорией Восточной Сибири высотные инверсии не имеют самостоятельного значения, наблюдаются крайне редко и их сезонные изменения не выражены.

**Мощность и интенсивность высотных инверсий.** Инверсии с  $H \leq 0,5$  км достигают в 2—3 раза большей мощности по сравнению с приземными инверсиями. В ряде случаев у них отмечается и большая интенсивность. Эти инверсии характеризуются значительно большей мощностью и интенсивностью, чем инверсии, образующиеся выше. В среднем за год мощность их изменяется в пределах 0,8—1,2 км, а интенсивность от 3 до 12°C. Мощные инверсии ( $\Delta H \geq 1$  км) наблюдаются над значительной частью ЕТС, в Казахстане, Средней Азии, Сибири, на Дальнем Востоке. Интенсивность при этом составляет 6—10°C, за исключением Средней Азии и Дальнего Востока, где они несколько меньше (4—8°C).

Высотные инверсии могут оказывать большое влияние на рассеивание промышленных выбросов в атмосфере. Наличие задерживающих слоев на сравнительно небольшой высоте, но имеющих большое горизонтальное и вертикальное протяжение, препятствует переносу примесей и очищению нижних слоев атмосферы. При этом особенно важное значение они получают зимой. Мощность инверсий с  $H \leq 0,5$  км на востоке ЕТС, в южной и центральной части Сибири и на Дальнем Востоке достигает 2 км при интенсивности 10°C и более.

Даже летом, когда значения мощности и интенсивности по сравнению с зимними уменьшены более чем в 2 раза, они составляют 0,5—1,0 км и 2—3°C соответственно.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Безуглая Э. Ю. и др. Некоторые результаты изучения инверсий температуры для оценки потенциала загрязнения воздуха на Европейской территории СССР. — «Тр. ГГО», 1975, вып. 352, с. 78—92.
2. Безуглая Э. Ю. Температурные инверсии над территорией крайнего северо-востока СССР. — «Тр. ДВНИГМИ», 1965, вып. 19, с. 154—171.
3. Безуглая Э. Ю. и др. Связь приземных инверсий температуры со скоростью и направлением ветра (см. наст. сб.).

4. Безуглый И. М., Алексеев А. А. Характеристики приземных инверсий температуры над Якутском. — «Вестник Ленинградского университета», 1975, вып. 3, № 18, с. 104—107.
5. Берлянд М. Е. Современные проблемы атмосферной диффузии и загрязнения атмосферы. Л., Гидрометеиздат, 1975. 448 с.
6. Воронцов П. А. Методы аэрологического исследования пограничного слоя атмосферы. Л., Гидрометеиздат, 1961. 224 с.
7. Говш Р. К. О некоторых потенциальных условиях загрязнения воздуха в Куйбышеве. — «Сб. трудов КГМО», 1973, № 8, с. 8—10.
8. Говш Р. К. Повторяемость различных типов инверсий в районе г. Куйбышева и их связь с загрязненностью воздуха. — «Сб. трудов КГМО», № 8, с. 11—15.
9. Коноваленкова М. М., Неймарк А. И. Некоторые характеристики пограничного слоя атмосферы в Ленинграде и Петрозаводске, влияющие на концентрацию вредных примесей в приземном слое. — «Сб. трудов Ленинградской и Петрозаводской ГМО», 1970, вып. 7, с. 45—76.
10. Лебединский А. Б., Осокина В. Г. Некоторые особенности инверсий температуры на юго-востоке Западной Сибири. — «Тр. ЗСРНИГМИ», 1975, вып. 16, с. 108—113.
11. Петренко В. К. Об инверсиях температуры как главном компоненте потенциала загрязнения воздуха в Москве. — «Тр. ЦВГМО», 1975, вып. 4, с. 82—92.



*Э. Ю. Безуглая, Л. И. Елекоева, С. М. Ермолаева,  
Е. Л. Криуленко, Л. А. Лаврова, Е. Н. Мелехина*

## СВЯЗЬ ИНВЕРСИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ СО СКОРОСТЬЮ И НАПРАВЛЕНИЕМ ВЕТРА

Скорость и направление ветра являются важными характеристиками, позволяющими установить причину происхождения инверсии. Увеличение скорости ветра ведет к разрушению нижней границы и образованию приподнятых инверсий с основанием на некоторой высоте от поверхности земли [3]. Вследствие этого над крупными водоемами возрастает количество приподнятых инверсий. Весенние или снежные инверсии также часто сопровождаются сильными ветрами при оттепелях и их нижняя граница поднимается над поверхностью земли [6, 7]. В работе Шоу [5] было показано, что весенние инверсии разрушаются только при скорости ветра  $>15$  м/с, а в пасмурные дни — при 5—10 м/с.

Для изучения связей температурных инверсий со скоростью и направлением ветра были использованы данные обобщений аэрологических наблюдений за 10-летний период (1959—1968 гг.), выполненных в Управлениях Гидрометслужбы, по 67 станциям.

В табл. 1 для ряда городов СССР показана повторяемость приземных инверсий температуры при скорости ветра 0—1 м/с (от общего числа приземных инверсий за год). Из табл. 1 видно, что в континентальных районах ЕТС около 20—30% всех приземных инверсий связано со скоростью ветра 0—1 м/с (Вологда, Волгоград, Казань, Минск, Рязань). К юго-востоку ЕТС повторяемость таких инверсий возрастает до 40—50% (Куйбышев, Оренбург, Уфа, Пермь). Таким образом, на территории ЕТС от 50 до 80% приземных инверсий наблюдается при скоростях ветра  $\geq 2$  м/с. Например, в Казани зимой 55—64%, а летом 58—62% приземных инверсий наблюдаются при скоростях ветра 2—5 м/с, а в 1—3% случаев даже при ветре более 10 м/с.

В восточных районах страны решающее значение для образования приземных инверсий имеет радиационное выхолаживание подстилающей поверхности. Это отчетливо видно по данным повторяемости приземных инверсий при штилях и слабом ветре (табл. 1). На Урале, в Западной и Восточной Сибири повторяемость призем-

## Повторяемость приземных инверсий температуры при ветре 0—1 м/с за год (% от числа приземных инверсий)

| Станция                        | Повторяемость % | Станция                       | Повторяемость % |
|--------------------------------|-----------------|-------------------------------|-----------------|
| Абакан . . . . .               | 57              | Ленкорань . . . . .           | 49              |
| Алма-Ата . . . . .             | 66              | Махачкала . . . . .           | 32              |
| Анадырь . . . . .              | 29              | Минск . . . . .               | 28              |
| Архангельск . . . . .          | 30              | Москва . . . . .              | 46              |
| Аральск . . . . .              | 8               | Мурманск . . . . .            | 57              |
| Астрахань . . . . .            | 11              | Нагаева бухта . . . . .       | 9               |
| Баку . . . . .                 | 32              | Нарьян-Мар . . . . .          | (18)            |
| Барнаул . . . . .              | (32)            | Николаевск-на-Амуре . . . . . | 59              |
| Брест . . . . .                | (39)            | Новосибирск . . . . .         | 47              |
| Благовещенск . . . . .         | 53              | Омск . . . . .                | 50              |
| Владивосток . . . . .          | 44              | Оренбург . . . . .            | 46              |
| Вологда . . . . .              | (26)            | Пермь . . . . .               | (32)            |
| Волгоград . . . . .            | 23              | Рига . . . . .                | 45              |
| Горький . . . . .              | (26)            | Ростов-на-Дону . . . . .      | 26              |
| Джалал-Абад . . . . .          | 25              | Рязань . . . . .              | (24)            |
| Душанбе . . . . .              | 72              | Салехард . . . . .            | 40              |
| Ереван . . . . .               | 94              | Свердловск . . . . .          | 44              |
| Ивдель . . . . .               | (87)            | Сыктывкар . . . . .           | 31              |
| Игарка . . . . .               | 26              | Сусуман . . . . .             | 53              |
| Иркутск . . . . .              | 64              | Таллин . . . . .              | 20              |
| Казань . . . . .               | 20              | Тамды . . . . .               | 58              |
| Кандалакша . . . . .           | (26)            | Ташкент . . . . .             | 58              |
| Калининград . . . . .          | 22              | Термез . . . . .              | 44              |
| Каунас . . . . .               | 26              | Тобольск . . . . .            | 52              |
| Киров . . . . .                | (18)            | Туапсе . . . . .              | 30              |
| Комсомольск-на-Амуре . . . . . | 60              | Уфа . . . . .                 | (50)            |
| Кривой Рог . . . . .           | 18              | Фрунзе . . . . .              | 50              |
| Куйбышев . . . . .             | 47              | Хабаровск . . . . .           | 22              |
| Курган . . . . .               | (60)            | Чита . . . . .                | —               |
| Курск . . . . .                | (19)            | Экимчан . . . . .             | (85)            |
| Ленинград . . . . .            | 22              | Якутск . . . . .              | 62              |

ных инверсий при скорости ветра 0—1 м/с составляет 50—75%, а в отдельных местах и более (Ивдель — 77%, Экимчан — 85%). Особенно следует отметить Ереван, где более 90% приземных инверсий связаны со штилем.

В Средней Азии при штилях приземные инверсии наблюдаются довольно редко (12—34%), причем летом реже, чем зимой. Средняя скорость горного ветра, приносящего холодный воздух и усиливающего выхолаживание приземного слоя, составляет 2—3 м/с, но может быть 4—6 м/с и более. Для континентальных районов Советского Союза получена довольно тесная связь между повторяемостью приземных инверсий и слабых ветров (рис. 1). Она хорошо выражается уравнением регрессии следующего вида:

$$P'_{ин} = 31,4 + 0,29 P_{ш}, \quad (1)$$

где  $P'_{ин}$  — повторяемость приземных инверсий,  $P_{ш}$  — повторяемость скорости ветра 0—1 м/с. Степень несогласованности рассчитанных и наблюдаемых значений  $P_{ин}$  невелика. Значение разброса вычислось по формуле

$$S = \sqrt{\frac{\sum (P'_{ин} - P_{ин}^2)}{N}}, \quad (2)$$

где  $P'_{ин}$  — значения повторяемости приземных инверсий из (1), а  $P_{ин}$  — наблюдаемые значения повторяемости, и составило 3,7%.

По формуле (1) можно определить значения повторяемости приземных инверсий в континентальных районах для тех мест, где эти данные отсутствуют, но имеются сведения о повторяемости скорости ветра 0—1 м/с. Поскольку между повторяемостями приземных инверсий и слабых скоростей ветра в континентальных районах существует столь тесная зависимость, то очевидно, что обе характеристики должны определять и количество застоев воздуха (приземные инверсии при слабых ветрах). Эта характеристика является очень важной для оценки потенциала загрязнения атмосферы, однако, сведения о ее повторяемости имеются не для всех мест.

Была рассмотрена зависимость между указанными характеристиками с помощью графической регрессии (рис. 2). На графике

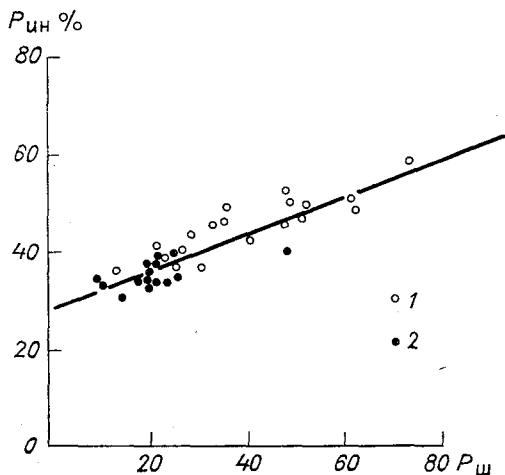


Рис. 1. Связь повторяемости приземных инверсий и скорости ветра 0—1 м/с.

в зависимости от повторяемости слабых ветров и приземных инверсий наносились значения повторяемости застоев. Обычно увеличение повторяемости двух первых характеристик ведет к увеличению повторяемости застоев. На рис. 2 даны изолинии повторяемостей застоев в зависимости от повторяемости исходных характеристик. Так, при значениях повторяемости приземных инверсий и слабых

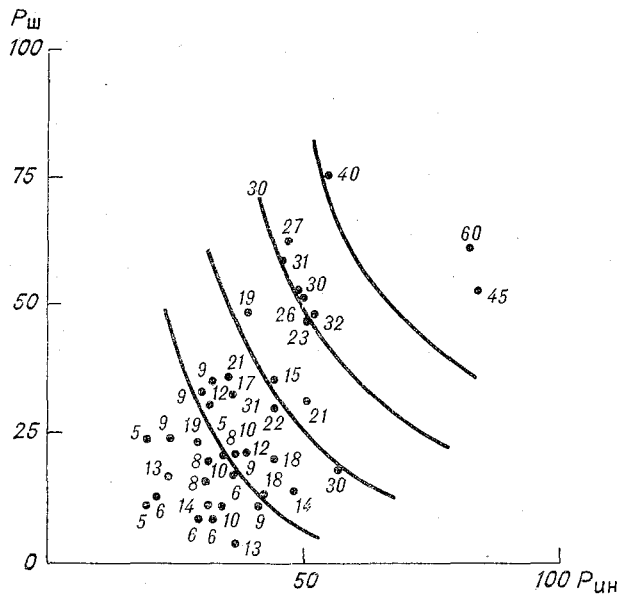


Рис. 2. Зависимость повторяемости застоев от повторяемости приземных инверсий и слабых ветров.

ветров более 50% повторяемость застоев воздуха может превышать 30%. При слабом ветре радиационные факторы способствуют более резкому выхолаживанию земной поверхности, в связи с чем возрастает интенсивность инверсий. По данным аэрологических наблюдений в Душанбе получена связь между средней месячной скоростью ветра и интенсивностью приземных инверсий температуры (рис. 3).

В прибрежных районах, вблизи крупных водоёмов в основном формируются адвективные инверсии температуры, хотя отмечаются также и инверсии радиационного типа. В этих районах только 20—30% приземных инверсий связано со слабыми ветрами и лишь во Владивостоке и Риге повторяемость достигает 45%. В Астрахани во все сезоны повторяемость приземных инверсий значительно меньше при скорости ветра 0—1 м/с, чем при больших скоростях. Наибольшая повторяемость приземных инверсий (51—58%) отмечается при ветре 2—5 м/с. При ветре 8 м/с и более наблюдается 10—20% приземных инверсий.

На побережье Охотского и Берингова морей приземные инверсии образуются в основном также при ветре 2—5 м/с. Как получено в работе [1], средняя скорость ветра у земли в период приземной инверсии зимой составляет на побережье Охотского моря (Нагавева бухта, Охотск) 4—6 м/с, на побережье Берингова и северных морей (Анадырь, Мыс Шмидта) — 6—7 м/с.

Зимой приземные инверсии в этом районе связаны главным образом со стоком холодного воздуха с континентальной части территории, где температура воздуха в это время понижается до 45—50°С. Наиболее типичный пример формирования стоковых вынужденных инверсий наблюдается на побережье Охотского моря (Охотск), вследствие своеобразных физико-географических условий. Всего в 400—500 км от побережья располагается полюс холода в районе Оймяконской впадины, ограниченной с юга хребтом Сунтар-Хаята. Средняя температура января в Оймяконе около —50°С, в Охотске —25°С. В сторону Охотска Оймяконская впадина открывается долинами рек Куйдусун и Охота. Постоянный заток холода усиливает выхолаживание нижнего слоя и интенсивность приземных инверсий. Временами сильные ветры разрушают приземную инверсию. Однако она постоянно восстанавливается притоком холодного воздуха. Летом на Дальнем Востоке существенную роль в формировании приземных инверсий играет муссон. Адвективные инверсии температуры образуются здесь при скоростях ветра 5—6 м/с, а в отдельных случаях даже при 15—20 м/с.

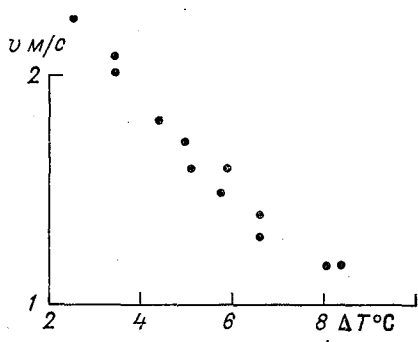


Рис. 3. Связь между средней месячной скоростью ветра и интенсивностью приземной инверсии температуры.

В табл. 2 показана повторяемость приземных инверсий при различных направлениях ветра и повторяемость преобладающего направления ветра из Справочника по климату [4]. Анализ этой таблицы указывает на четкое преобладание определенных направлений ветра в каждом районе при приземных инверсиях. Направление ветра, преобладающее в приземных инверсиях температуры, как правило, отличается от преобладающего климатологического направления ветра. В скобках в табл. 2 указано второе по значению повторяемости направление ветра, которое преобладает в приземных инверсиях.

В январе в северных и западных районах ЕТС обычно преобладают ветры юго-западного и западного направлений. В период образования приземной инверсии почти во всех пунктах этой территории отмечаются южные ветры. В других местах закономерности изменения направления ветра проявляются менее отчетливо. Так,

Преобладающее направление ветра (климатическое и в период приземной инверсии)

| Города                   | Январь  |            | Апрель  |            | Июль    |            | Октябрь |            |
|--------------------------|---------|------------|---------|------------|---------|------------|---------|------------|
|                          | климат. | в инверсии | климат. | в инверсии | климат. | в инверсии | климат. | в инверсии |
| Архангельск . . . . .    | ЮЗ, ЮВ  | Ю          | СЗ, ЮЗ  | Ю          | С, СЗ   | Ю          | ЮЗ      | З          |
| Брест . . . . .          | ЮЗ, З   | Ю          | ЮВ, СЗ  | Ю, ЮВ      | З       | Штиль      | Э       | Ю, ЮЗ      |
| Каунас . . . . .         | ЮЗ      | Ю          | ЮВ      | Ю          | З, ЮЗ   | Ю          | ЮЗ      | Ю          |
| Ленинград . . . . .      | З       | З, ЮЗ      | СВ(З)   | Ю          | З, СЗ   | Ю          | ЮЗ      | ЮЗ         |
| Минск . . . . .          | ЮЗ, Ю   | Ю          | ЮВ      | Ю          | З, СЗ   | Штиль      | ЮЗ, З   | Ю          |
| Печора . . . . .         | ЮВ(ЮЗ)  | Ю          | ЮВ      | ЮЗ, Ю      | С       | Ю          | ЮВ      | Ю          |
| Рига . . . . .           | ЮВ      | Ю          | Ю       | Ю          | ЮЗ      | Ю          | ЮЗ      | Ю          |
| Таллин . . . . .         | Ю(ЮЗ)   | Ю          | Ю, ЮЗ   | Ю          | З       | Ю          | ЮЗ      | Ю          |
| Москва . . . . .         | ЮЗ      | Штиль      | ЮВ      | В          | СЗ(З)   | Штиль      | З(ЮЗ)   | Штиль      |
| Курск . . . . .          | ЮЗ(З)   | З(В)       | ЮВ      | В          | СЗ(З)   | С(З)       | ЮЗ,З    | Ю          |
| Тамбов . . . . .         | ЮВ, Ю   | Ю          | ЮВ      | Ю          | СЗ, С   | С          | З(ЮЗ)   | Ю          |
| Куйбышев . . . . .       | ЮЗ      | В          | ЮЗ      | З          | СЗ      | СВ         | ЮЗ      | ЮЗ         |
| Астрахань . . . . .      | В       | В          | В       | В          | С       | В          | В       | В          |
| Ростов-на Дону . . . . . | В       | В          | В       | В          | З       | Штиль      | В       | В          |
| Баку . . . . .           | С       | Ю          | С       | Ю          | С       | С          | С, Ю    | Ю          |
| Ленкорань . . . . .      | СЗ, З   | СЗ         | ЮВ      | Ю          | ЮВ      | Ю          | З, СЗ   | ЮЗ         |

в инверсии на юго-востоке ЕТС (Куйбышев, Волгоград, Астрахань, Ростов-на-Дону) заметно преобладание восточных ветров.

В апреле в северной и западной частях ЕТС при общем преобладании направлений ветра ЮЗ, ЮВ, СЗ и З в период инверсии вновь наибольшую повторяемость имеет южное направление.

В июле в северной части ЕТС преобладает северный и северо-западный ветер, при приземных инверсиях он меняется на южный; на западе ЕТС западный преобладающий ветер — на южный и юго-западный, а в центральных и юго-восточных районах северо-западный преобладающий ветер заменяется в приземной инверсии на преобладающий северный.

В октябре, как и в январе, в приземной инверсии преобладает южное направление ветра в то время, как общим преобладающим направлением ветра является юго-западное (для севера, запада и центра ЕТС). Анализ данных о направлении преобладающего ветра при наличии приземных инверсий на территории СССР показывает четкое преобладание одного или двух направлений ветра. При этом для ряда мест преобладающее направление ветра в период приземной инверсии отличается большим постоянством, чем общее климатологическое преобладающее направление ветра. Постоянство преобладающего ветра в приземной инверсии указывает на значительную роль адвекции в формировании приземных инверсий температуры и позволяет объяснить повышенное загрязнение воздуха в ряде городов при южном и юго-западном направлениях ветра [2].

На побережье Балтийского и Баренцева морей наиболее часто в течение года приземные инверсии наблюдаются при южных ветрах. Зимой повторяемость приземных инверсий при южном ветре составляет 40% в Таллине, 37% в Риге, 34% в Каунасе, 25% в Минске, 23% в Калининграде, а в целом за год — 18—31%. С удалением от моря отмечается формирование приземных инверсий при двух направлениях ветра: южном и юго-западном. Повторяемость таких ветров при инверсиях составляет за год 32% в Пскове, 47% в Петрозаводске, 27% в Минске, 36% в Нарьян-Маре, 34% в Сыктывкаре, 33% в Рязани. Исключение составляет Ленинград, где в приземных инверсиях в 50% случаев наблюдаются южные, юго-западные или западные ветры.

В центре и на юго-востоке ЕТС преобладающее направление ветра, как видно из табл. 2, изменяется в зависимости от сезона и физико-географических условий и поэтому в целом за год выражено менее четко. Так, преобладающий ветер в инверсии может быть южный и северный (42% в Казани, 44% в Баку), северный и восточный (37% в Оренбурге), южный и юго-восточный (54% в Махачкале, 35% в Ростове-на-Дону), западный и восточный (38% в Астрахани, 34% в Волгограде). Хотя в предгорных районах Урала и в Западной Сибири решающее значение в формировании приземных инверсий имеют слабые ветры, здесь хорошо выделяется преобладающее южное или юго-западное направление ветра, харак-

терное для приземных инверсий в большей части страны. Оно составляет за год в Перми и Кургане 23%, Уфе 22%, Игарке 18%.

В Восточной Сибири приземные инверсии температуры в еще большей степени связаны с радиационным выхолаживанием подстилающей поверхности в период слабых ветров. Для юга Сибири и Приморского края сохраняется преобладание южных или юго-западных ветров (10% в Хакасской, 12% в Хабаровске, 24% в Комсомольске-на-Амуре), а в северных широтах — северных и северо-восточных (21% в Якутске, 15% в Оленьке, 38% в Сусумане). В Чите выражено преобладание в приземной инверсии восточного ветра, а в Иркутске — северо-восточного и северо-западного, обусловленного направлением долины р. Ангары. Интересно, что при северо-западном ветре при скорости  $\geq 10$  м/с приземные инверсии разрушаются от земли, а при юго-восточных они могут сохраняться и при больших скоростях.

В Средней Азии формируются приземные инверсии радиационного типа, усиленные в значительной степени за счет горно-долинных ветров. В Джалал-Абаде, например, приземные инверсии связаны со стоком холодного воздуха с Ферганского хребта, который усиливает выхолаживание нижнего слоя атмосферы. Инверсии эти в 85% случаев наблюдаются при северо-восточном и северном ветре. Горный ветер этих направлений появляется в вечерние часы, ускоряя формирование приземных инверсий, утром горный ветер меняется на долинный.

Во Фрунзе и Алма-Ате ярко выраженная горно-долинная циркуляция также создает исключительно благоприятные условия для возникновения и развития приземных инверсий (во Фрунзе 60% случаев при юго-восточном и южном ветре, в Алма-Ате 33% — при юго-восточном горном ветре). В Душанбе в течение почти всего года наблюдаются инверсии при восточном и юго-восточном ветрах — 30%, в Ташкенте, Термезе и Тамды 45—64% инверсий связаны с этими ветрами, т. е. не только с горно-долинной циркуляцией, но и с макромасштабным переносом.

Интересен режим приземных инверсий на побережье дальневосточной морей. Муссонный характер циркуляции в этих местах обуславливает преобладание зимой северного и северо-восточного (или северо-западного) направления ветра, а летом — западного и юго-западного (или юго-восточного и южного). На побережье Берингова моря (Анадырь) зимой приземные инверсии в 35% случаев связаны с преобладающим здесь северо-западным ветром, а летом в 54% случаев — с юго-восточным и южным. В 77% случаев при северо-западном и северном ветрах зимой формируются приземные инверсии температуры на Камчатке (Петропавловск-Камчатский). На побережье Охотского моря (бухта Нагаева) в январе 89% приземных инверсий наблюдаются при северо-восточном и восточном ветрах, а летом 66% этих инверсий отмечается при восточном и западном ветрах. Подробнее об условиях формирования адвективных инверсий теплого и холодного воздуха сказано в [1].



Во Владивостоке, как и в других местах на Дальнем Востоке, зимой приземные инверсии температуры наблюдаются или при северных ветрах (47% в январе), или при штиле (30%). В июле они сопровождаются юго-восточным и восточным ветрами (около 60% случаев), что указывает на их связь с муссоном. Смена зимнего муссона летним в переходные сезоны в связи с ослаблением сибирского максимума (весной) и летнего муссона (осенью) обуславливает уменьшение повторяемости приземных инверсий и отсутствие в них четко выраженного преобладания какого-либо направления ветра.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Безуглая Э. Ю. Температурные инверсии над территорией крайнего северо-востока СССР. — «Тр. ДВНИГМИ», 1965, вып. 19, с. 154—171.
2. Безуглая Э. Ю., Завадская Е. К. Распределение концентраций примесей в городском воздухе. — «Тр. ГГО», 1975, вып. 325, с. 87—97.
3. Воронцов П. А. Методы аэрологического исследования пограничного слоя атмосферы. Л., Гидрометеиздат, 1961. 224 с.
4. Справочник по климату. Ч. 3, вып. 1—34. Л., Гидрометеиздат, 1968 г.
5. Shau Y. The Meteorol. Magaz., v. 84, 1955, p. 998, Vertikalen temperature gradient in the first 2000 St. 2.
6. Молчанов П. А. Весенняя инверсия. — «Метеорологический вестник», № 1—4, 1922, с. 55—59.
7. Честная И. И. Об инверсиях снеготаяния. — «Тр. ГГО», вып. 38(100), 1953, с. 35—39.

*Е. С. Селезнева*

## **СОЛЕВОЙ ОБМЕН МЕЖДУ АТМОСФЕРОЙ И ОКЕАНОМ ПО ДАННЫМ О ХИМИЧЕСКОМ СОСТАВЕ АТМОСФЕРНЫХ ОСАДКОВ**

В сложном процессе взаимодействия океана и атмосферы важное место занимает солевой обмен. Изучению механизма обмена и солевого баланса в последние годы уделяется много внимания океанологами и гидрохимиками [1, 3, 5, 6, 14].

Одной из составляющих солевого баланса является вымывание солей из атмосферы облаками и осадками. Процесс вымывания охватывает значительный слой атмосферы и имеет глобальное значение. При рассмотрении макрообмена солями самый нижний приводный слой может не учитываться, так как этот слой преимущественно заполняют крупные капли, которые быстро возвращаются на океаническую поверхность в результате гравитационного оседания. Концентрация таких капель резко уменьшается с высотой и выше 20—30 м аэрозоль состоит в основном из более мелких капель, дающих начало солевым частичкам, которые переносятся на большие расстояния и участвуют в макрообмене [8, 18]. Поэтому необходимо получить характеристику содержания солей выше приводного слоя в нижней и средней тропосфере.

По данным о составе осадков можно оценить количество циркулирующих в тропосфере морских солей и определить долю возвращаемых в океаны и выносимых на континенты. Химический состав осадков изучается продолжительное время в разных странах и в настоящее время имеется возможность привести общую характеристику состава осадков на континентах. Сведения о химическом составе осадков, выпадающих на акватории мирового океана, весьма скудны. В литературе приводятся лишь некоторые данные по береговым или островным пунктам [1, 2, 9, 11, 13, 15], для открытых океанических пространств данные практически отсутствуют. Поэтому большую ценность представляют результаты химического анализа дождевой воды, собранной в разных частях Тихого океана научно-исследовательскими судами Гидрометеорологической служ-

бы СССР. Эти результаты рассматривались в статье [10], ими воспользуемся и в настоящей работе.

Основной особенностью химического состава морских осадков, как известно, является преобладание в них хлоридов, в отличие от осадков континентальных, в которых преобладают сульфаты и гидрокарбонаты при небольшой концентрации хлоридов. Данные анализы проб тихоокеанских осадков позволяют уточнить соотношения отдельных компонентов для акваторий, удаленных от континентов, в чистых океанических условиях.

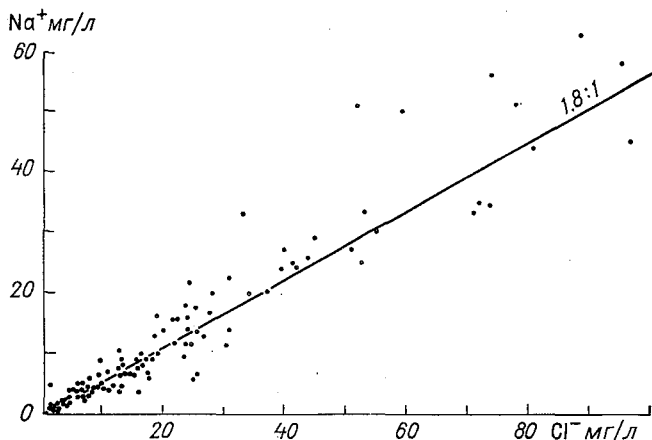


Рис. 1. Соотношение между концентрациями ионов  $\text{Cl}^-$  и  $\text{Na}^+$  в океанических дождях.

В проанализированных пробах дождевой воды концентрация ионов хлора и суммы всех ионов изменяются в широких пределах, причем распределение этих величин не подчиняется нормальному закону, а имеет резко асимметричный характер. Максимум частот приходится на область небольших значений. Крайние высокие значения концентрации имеют незначительную повторяемость. Так, в 50% случаев дождей сумма ионов ( $\Sigma i$ ) меньше 30 мг/л, а концентрация хлора  $C_{\text{Cl}^-}$  меньше 15 мг/л; в 75% случаев дождей  $\Sigma i < 60$  мг/л,  $C_{\text{Cl}^-} < 30$  мг/л. При таком асимметричном распределении концентрации ионов в качестве средних характеристик предпочтительно пользоваться медианными значениями. По имеющимся данным для рассматриваемой акватории Тихого океана медианное значение суммы ионов равно 28 мг/л, а концентрации ионов хлора — 14,5 мг/л.

При изучении макрообмена и баланса солей следует разобраться, несут ли океанические осадки только соли океанического происхождения или содержат примеси и другой природы. Известно, что

Средняя концентрация морских хлоридов (4 мг/л) в континентальных осадках определена на основании наших и других опубликованных данных [11, 17].

Таким образом, составляющие годового баланса солевого обмена северного полушария следующие:

|  |                            |
|--|----------------------------|
| Поступает в атмосферу с океана . . . . .   | 4,22·10 <sup>9</sup> т/год |
| Возвращается в океан с осадками . . . . .  | 3,90·10 <sup>9</sup> т/год |
| Переносится на сушу и выпадает с осадками (возвращается с речным стоком в океан) . . . . . | 0,32·10 <sup>9</sup> т/год |

Оценки этих составляющих солевого баланса приводили и другие авторы из других соображений и по другим исходным данным. По порядку величин полученные значения сходны, но все же отличаются в несколько раз. Так, по Эриксону [14] общий вынос морских солей в атмосферу составляет  $1 \cdot 10^9$  т/год, по Бруевичу и др. [3] —  $5 \cdot 10^9$  т/год, по Грабовскому [4] —  $27 \cdot 10^9$  т/год. Эти величины относятся ко всему Мировому океану, для северного полушария они должны быть уменьшены в 2,5—3 раза. Одни из приведенных оценок явно занижены, другие, по-видимому, преувеличены. Не останавливаясь на обсуждении особенностей подхода каждого автора, заметим только, что эти величины получены путем косвенных расчетов.

Значения, приведенные в табл. 1, конечно, нуждаются в дальнейшем уточнении. Необходима детализация по отдельным океанам и континентальным районам с учетом количества осадков и их солевого состава, что требует специальных исследований.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алехин О. А. Химия океана. Л., Гидрометеиздат, 1966. 248 с.
2. Андреев Б. Г., Рожкова Н. Г. Исследование химического состава атмосферных осадков на Дальнем Востоке. — «Тр. ДВНИГМИ», 1971, вып. 32, с. 213—227.
3. Бруевич С. В., Иваненков В. Н. Проблемы химического баланса Мирового океана. — «Океанология», т. 11, 1971, вып. 5, с. 835—841.
4. Грабовский Р. И. Атмосферные ядра конденсации. Л., Гидрометеиздат, 1956. 163 с.
5. Корж В. Д. Содержание ионов  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Mg}^{+2}$ ,  $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{HCO}_3^-$  в атмосферной влаге над Атлантическим океаном по маршруту 13-го рейса НИС «Академик Курчатов». — «Океанология», 1973, № 6.
6. Мировой водный баланс и водные ресурсы Земли. Л., Гидрометеиздат, 1974.
7. Петренчук О. П., Дроздова В. М. Химический состав облачной воды при разных метеорологических условиях. «Тр. ГГО», 1969, вып. 238, с. 201—209.
8. Процессы переноса вблизи поверхности раздела океан — атмосфера. Под ред. А. С. Дубова. Л., Гидрометеиздат, 1974.
9. Распространение морских солей в прибрежной зоне. — «Тр. ГГО», 1974, вып. 343, с. 70.
10. Селезнева Е. С. Некоторые физико-химические характеристики атмосферных осадков на акватории Тихого океана. — «Тр. ГГО», 1974, вып. 343, с. 46—53.

11. Юнге Х. Химический состав и радиоактивность атмосферы. М., Изд. иностр. лит., 1965. 423 с.
12. Blanchard D. C. Szydek-Variation in Aitken and giant nuclei in marine air.—„J. Phys. Oceanography”, 1972, v. 2, N. 3, p. 255—262.
13. Eriksson E. The chemical composition of Hawaiian rainfall.—„Tellus”, 1957, v. 9, N 4, p. 509—520.
14. Eriksson E. The yearly circulation of Chloride and sulfur in nature.—„Tellus”, 1, 1959, v. 11, N 4; 2, 1960, v. 12, N 1.
15. Handa B. K. Chemical composition of monsoon rains over Calcutta.—„Tellus”, 1, 1969, v. 21, p. 95—100; p. 101—106.
16. Junge C. E. Our Knowledge of the physics-chemistry of aerosol in the undisturbed marine environment.—„J. Geoph. Research. Oceans and Atmospheres,” 1972, v. 77, N. 27, p. 5183—5200.
17. Selezneva E. S. Estimation of the background contamination of the atmosphere from the chemical composition of precipitation.—„Tellus”, 1972, v. 24, N 2, p. 122—127.
18. Toba J. On the giant sea-salt particles in the atmosphere.—„Tellus”, 1965, v. 17, p. 131—145, 364—381.

*О. П. Петренчук*

## **ОЦЕНКА КОРРОЗИОННОЙ АГРЕССИВНОСТИ АТМОСФЕРЫ В ПРИБРЕЖНЫХ РАЙОНАХ**

Коррозионная агрессивность атмосферы определяется комплексом метеорологических факторов, среди которых наиболее важными являются температурно-влажностный режим и содержание примесей в воздухе. Исходя из особенностей протекания электрохимических процессов на металлах под пленками электролита, атмосферную коррозию подразделяют на три вида: сухую, влажную и мокрую [1]. Наиболее резкое увеличение скорости коррозии происходит в процессе влажной коррозии при относительной влажности воздуха менее 100%, но больше некоторого критического значения. В этом случае процесс коррозии протекает под невидимым слоем влаги толщиной порядка 10—100 Å. Присутствие в воздухе сернистых соединений или частиц морской соли существенно повышает скорость коррозии металла уже при относительной влажности менее 80% [1, 6].

Так как значительную часть времени года относительная влажность воздуха на морских побережьях, как правило, довольно высока, то атмосфера морских районов является особенно агрессивной.

Выполненные нами исследования на Черноморском побережье Крыма [4] показали, что изменение значений коррозии экспонируемых стальных образцов с удалением от берега моря имеет почти параллельный ход с изменением концентрации хлоридов. Этот факт послужил основанием для отыскания эмпирической зависимости значений коррозии от концентрации хлоридов.

Важной особенностью, которая была обнаружена при изучении химического состава аэрозолей в приморских районах, является постоянное присутствие сульфатных ионов. В прибрежной зоне района Кацивели промышленные источники поступления соединений серы в атмосферу отсутствовали. Однако концентрация сульфатов в аэрозолях составляла в среднем около 10 мкг/м<sup>3</sup>, и она мало менялась от пункта к пункту в пределах всей береговой зоны шириной до 2 км. Так как сульфаты, растворяясь в пленке влаги на поверхности металла образуют электролит, то они оказывают несомненное влияние на процесс атмосферной коррозии и, следовательно,

при оценке скорости коррозии ими нельзя пренебрегать. В связи с этим нами было учтено совместное действие хлоридов и сульфатов. Аналитический вид зависимости скорости коррозии металла от концентрации примесей в воздухе имеет вид

$$\lg K = M + N \lg C_1, \quad (1)$$

где  $C_1$  — суммарная концентрация хлоридов и сульфатов в воздухе в  $\text{мкг/м}^3$ ,  $K$  — скорость коррозии стали в  $\text{г/м}^2$ ,  $M=1,087$ ,  $N=0,37$ .

Формула (1), полученная при использовании результатов измерений коррозии и концентрации хлоридов и сульфатов в воздухе на Черноморском побережье Крыма, применялась нами для расчета скорости коррозии в других районах, в частности на Черноморском побережье Кавказа в Батуми и на побережье Баренцева моря в Дальних Зеленцах [4]. Вычисленные значения коррозии совпадали в (пределах 20%) с фактическими, что свидетельствует о том, что из совокупности факторов, оказывающих влияние на коррозию, определяющими в прибрежных районах являются коррозионно-активные примеси в атмосфере.

Как было установлено, поступление солевых частиц в атмосферу в прибрежных районах определяется скоростью ветра и топографией береговой зоны. На основе анализа экспериментального материала для Черноморского побережья Крыма, побережий Баренцева и Балтийского морей получено эмпирическое соотношение, выражающее связь между концентрацией хлоридов в воздухе  $C$  и скоростью ветра  $u$ :

$$\lg C = A \lg u + B, \quad (2)$$

где  $A$  и  $B$  — численные значения коэффициентов для различных районов.

Таким образом, зная среднюю за месяц скорость морского ветра в некотором прибрежном районе, можно рассчитать среднемесячную концентрацию хлоридов в нем, а затем с помощью формулы (1) оценить этот район с точки зрения его коррозионной агрессивности. Для нахождения средней скорости ветра целесообразно использовать многолетние климатологические данные.

Если в таблицы с вероятностью ветра различной скорости по направлениям, которые приводятся в «Справочниках по климату СССР» вместо градаций скорости ветра подставить соответствующие им рассчитанные концентрации хлоридов, то средняя за месяц концентрация выразится как

$$C = \sum_{i=1}^n C_{iM} p_{iM} + \sum_{i=1}^n C_{iK} p_{iK}, \quad (3)$$

где  $n$  — число градаций скорости ветра,  $C_{iM}$ ,  $C_{iK}$  — концентрация хлоридов в воздухе при морском и континентальном ветре при скорости  $u_i$ ,  $p_{iM}$ ,  $p_{iK}$  — вероятность морского и континентального ветра со скоростью  $u_i$ . Величина  $C_{iM}$  для всех градаций скорости ветра

рассчитывается по формуле (2). В качестве  $C_{ик}$  берется фоновое значение концентрации хлоридов, наблюдающееся в конкретном районе при штилевых условиях.

Рассмотрим применение предложенного метода на конкретном примере ст. Кацивели для февраля 1972 г. Следует отметить, что непосредственно для Кацивели данные о вероятности ветра различной скорости по направлениям в Справочнике [7] отсутствуют, поэтому используем данные по ближайшей станции, в частности ст. Черноморской.

Таблица 1

Вероятность ветра различной скорости и соответствующей концентрации хлоридов для февраля

| № п/п | Скорость ветра, м/с | Концентрация хлоридов, мкг/м <sup>3</sup> | Вероятность морских ветров, $p_{им}$ % | Вероятность континентальных ветров, $p_{ик}$ % | $C_i p_{им}$ |
|-------|---------------------|---|--|--|--------------|
| 1     | 0—1                 | 0,12                                      | 6,1                                    | 1,2  | 0,7          |
| 2     | 2—5                 | 26,40                                     | 31,4                                   | 8,7  | 829          |
| 3     | 6—9                 | 220,0                                     | 19,8                                   | 9,5  | 4350         |
| 4     | 10—13               | 711,0                                     | 9,9                                    | 6,1  | 7050         |
| 5     | 14—17               | 1590,0                                    | 3,5                                    | 1,9  | 5570         |
| 6     | 18—20               | 2800,0                                    | 0,7                                    | 2,0  | 1960         |
| 7     | 21—24               | 4800,0                                    | 0,1                                    | 0,1  | 480          |
| 8     | 25—28               | 7100,0                                    | 0,04                                   | —  | 284          |
| Сумма |                     |   |  | 29,5   | 20523,7      |

В табл. 1 приводятся исходные значения по ветру и рассчитанные по ним концентрации хлоридов.

Принимая значение концентрации хлоридов при континентальном ветре  $C_{ик}$ , равным 0,12 мкг/м<sup>3</sup>, и учитывая, что  $\sum_{i=1}^n p_i = 1$ , получаем окончательное значение среднемесячной концентрации хлоридов в воздухе для февраля при использовании формулы (3)

$$C = \frac{20523,7 + 29,5 \cdot 0,12}{100} = 208,7 \text{ мкг/м}^3.$$

Ранее было показано, что концентрация сульфатов в прибрежной зоне в районе Кацивели мало зависит от скорости ветра и в среднем равна 10 мкг/м<sup>3</sup> [3]. С учетом средних значений концентрации хлоридов и сульфатов рассчитанная по формуле (1) скорость коррозии металла составляет 89,5 г/м<sup>2</sup>. Фактическое значение коррозии в феврале, полученное в результате измерений, равно 91,7 г/м<sup>2</sup>.

Аналогичным способом при использовании климатологических данных была рассчитана коррозия для всех месяцев года. Полученные результаты представлены на рис. 1. Как видно, расхождение между фактическими и расчетными значениями коррозии составляет 8—18%.



Расчет скорости коррозии производился также для ст. Дальние Зеленцы (Баренцево море) и по двум месяцам для ст. Нида (Балтийское море). Рассчитанные и среднемноголетние фактические значения коррозии в Дальних Зеленцах приводятся на рис. 2. Видно, что ход кривых одинаков, однако расхождения в отдельные месяцы составляют от 6 до 30%. Столь большие значения, очевидно, объясняются тем, что при получении расчетных значений коррозии

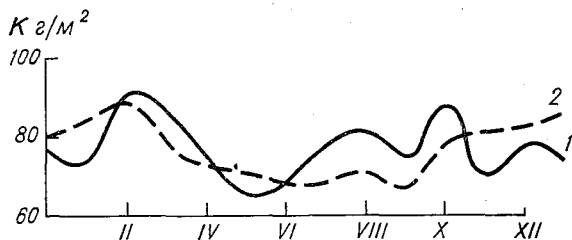


Рис. 1. Годовой ход скорости коррозии стали на ст. Кацивели.

1 — фактический, 2 — рассчитанный по климатологическим данным.

мы пользовались средними за месяц концентрациями сульфатов, рассчитанными по измеренным за отдельные дни. Так как в непосредственной близости от метеостанции на расстоянии 600—800 м находится источник загрязнения атмосферы сернистым газом (местная отопительная котельня), то концентрация сульфатов при изменении направления ветра может меняться от дня ко дню, и для получения более надежной среднемесечной величины, вероятно, следовало бы проводить ежедневные измерения. При использовании максимальных значений концентрации сульфатов, измеренных за каждый месяц, расчетные величины (кривая 3) довольно близко соответствуют фактическим. В Ниде экспериментальные исследования проводились лишь в августе — сентябре. Рассчитанная за эти

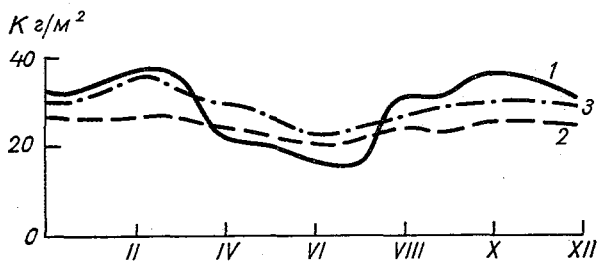


Рис. 2. Годовой ход скорости коррозии стали на ст. Дальние Зеленцы.

1 — фактический, 2 — рассчитанный по климатологическим данным, 3 — рассчитанный с учетом максимальных значений концентрации сульфатов.

месяцы коррозия равна соответственно 28 и 28,6 г/м<sup>2</sup>. Фактические же величины составляют 37,8 и 36,6 г/м<sup>2</sup>.

Таким образом, видим, что предложенный метод определения скорости коррозии дает довольно хорошее совпадение между фактическими и вычисленными значениями коррозии.

В случае если приходится иметь дело с морским побережьем, для которого неизвестна зависимость выноса морских солей от скорости ветра, но топографические особенности которого близки по своему характеру к одному из уже исследованных нами районов, то, как показывает анализ, при расчетах к этому побережью можно применить формулу (2) с коэффициентами, найденными для

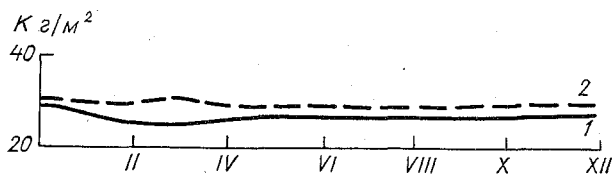


Рис. 3. Годовой ход скорости коррозии стали в Батуми. 1 — фактический, 2 — рассчитанный по климатологическим данным.

указанного района. Далее, используя климатологические данные, можно рассчитать среднемесячную концентрацию хлоридов, а затем по формуле (1) определить возможную коррозию металла на этом побережье. При отсутствии промышленных источников загрязнения на побережье следует учесть фоновую концентрацию сульфатов, которая имеет порядок 5—10 мкг/м<sup>3</sup>.

Проиллюстрируем вышесказанное на конкретном примере. В период проведения исследований на Черноморском побережье Кавказа в районе Батуми [5] из-за довольно устойчивого ветрового режима, характеризующегося слабыми скоростями ветра, здесь не удалось установить зависимость выноса солей от ветра. Однако так как прибрежная зона в Батуми имеет плоский ровный берег, то в первом приближении ее можно отождествить с побережьем Балтийского моря и применить к Батуми формулу (2) с коэффициентами *A* и *B*, найденными для Ниды. Нами был вычислен таким образом годовой ход коррозии для Батуми, изображенный на рис. 3. Сопоставление рассчитанных величин с фактическими обнаруживает весьма хорошее согласование.

Следовательно, пользуясь предложенным методом, в отдельных случаях возможно оценить коррозионную агрессивность некоторых прибрежных районов, не проводя в них предварительных измерений концентрации хлоридов в воздухе. Этот метод оценки более объективно и правильно характеризует прибрежный район, с точки зрения его коррозионной агрессивности, по сравнению с методом, основанным на учете только продолжительности общего увлажнения поверхности металлической системы.

Действительно, если исходить из длительности увлажнения, то наиболее активным в коррозионном отношении оказывается побережье Балтийского моря, где продолжительность увлажнения наибольшая и превышает 3250 ч/год [2]. Фактически же скорость коррозии здесь примерно в 2 раза ниже, чем на Черноморском побережье Крыма. Анализ показывает, что коррозионная агрессивность атмосферы может изменяться на различных побережьях одного и того же моря. Хотя в районе Батуми продолжительность увлажнения больше, чем в Крыму, скорость коррозии в Батуми также примерно в 2 раза ниже.

Таким образом, при оценке коррозионной агрессивности атмосферы морского района, наряду с продолжительностью увлажнения и действия морских ветров важно и необходимо учитывать топографию прибрежной зоны. Разные физико-географические особенности береговой зоны обуславливают различный вынос солей с моря на сушу, который в конечном счете оказывается определяющим в процессе коррозии, так как значительную часть времени относительная влажность воздуха на большинстве побережий открытых морей довольно высока.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Берукштин Г. К., Кларк Г. Б. Коррозионная устойчивость металлов и металлических покрытий в атмосферных условиях. М., «Наука», 1971, с. 3—158.
2. Единая система защиты от коррозии и старения. Коррозионная агрессивность атмосферы. ГОСТ 9.039-74. М., Изд-во стандартов, 1975, с. 1—20.
3. Петренчук О. П., Лавриненко Р. Ф. Химический состав аэрозолей на морском побережье Крыма. — «Тр. ГГО», 1974, вып. 314, с. 168—180.
4. Петренчук О. П. О закономерности распределения концентрации хлоридов в воздухе и коррозии металла в прибрежных районах. — «Тр. ГГО», 1974, вып. 314, с. 181—191.
5. Петренчук О. П. О влиянии метеорологических факторов на коррозионную агрессивность атмосферы в прибрежных районах. — «Тр. ГГО», 1975, вып. 352, с. 119—129.
6. Розенфельд И. Л. Атмосферная коррозия металлов. М., Изд. АН СССР, 1960, с. 150—232.
7. Справочник по климату СССР. 1967, вып. 10. Ч. 3. Л., Гидрометеоздат, 681 с.

М. А. Беляшова

## НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЯДЕР АЙТКЕНА В ПРИБРЕЖНОЙ ЗОНЕ БАЛТИЙСКОГО МОРЯ

Ранее нами был рассмотрен характер распределения ядер Айткена в приземном слое атмосферы по результатам работ, проведенных на побережье Баренцева и Черного морей. Результаты этих исследований частично изложены в работах [2, 3, 4].

В настоящей статье проведен анализ данных по распространению ядер конденсации на побережье Балтийского моря.

С 27 VIII по 11 IX 1975 г. были организованы наблюдения за концентрацией частиц Айткена на косе Куршю-Неринга примерно в 2 км к западо-северо-западу от поселка Нида, расположенного на берегу Куршского залива. Наблюдения проводились на трех

Таблица 1

Распределение концентраций ядер Айткена на побережье Балтийского моря

| Пункт                | Расстояние от моря (высота над уровнем моря), м | $\bar{N}$ | $n$ | $N_{med}$ | $N_{max}$ | $N_{min}$ | $\sigma$ |
|----------------------|---|-----------|-----|-----------|-----------|-----------|----------|
| Общие характеристики |   |           |     |           |           |           |          |
| I                    | 2—3 (1)   | 5150      | 61  | 3590      | 25 990    | 680       | 340      |
| II                   | 60 (5)  | 3940      | 65  | 2770      | 33 290    | 520       | 420      |
| III                  | 245 (5)   | 3250      | 77  | 2250      | 28 040    | 350       | 300      |
| Ветер с моря         |   |           |     |           |           |           |          |
| I                    | 2—3 (1)   | 3330      | 25  | 2520      | 6 200     | 680       | 430      |
| II                   | 60 (5)  | 2340      | 38  | 1990      | 6 430     | 520       | 290      |
| III                  | 245 (5)   | 1960      | 41  | 1670      | 4 170     | 350       | 290      |
| Ветер с суши         |   |           |     |           |           |           |          |
| I                    | 2—3 (1)   | 6550      | 36  | 4400      | 25 990    | 1 131     | 380      |
| II                   | 60 (5)  | 7750      | 27  | 5190      | 33 290    | 1 321     | 460      |
| III                  | 245 (5)   | 5170      | 36  | 3470      | 28 040    | 1 111     | 400      |

пунктах; их местоположение по отношению к морю представлено в табл. 1.

**Распространение ядер Айткена с удалением от берега.** Концентрация частиц на каждом из пунктов измерялась счетчиком Шольца в четыре срока: 6, 12, 18 и 24 часа по московскому времени. Кроме того, в отдельные дни были выполнены ежечасные исследования. В отличие от методики самолетных исследований [1] забор проб воздуха осуществлялся методом всасывания, чтобы максимально исключить потерю частиц за счет переходного крана насоса. За короткий период исследований в узкой прибрежной полосе было взято 2030 проб воздуха, которые осреднялись за 3—5-минутный интервал времени по 10 пробам при каждом наблюдении. В общей сложности таких наблюдений было 203. Результаты исследований представлены в табл. 1, где  $\bar{N}$ ,  $N_{med}$ ,  $N_{max}$ ,  $N_{min}$  и  $\sigma$  — средние, медианные, максимальные, минимальные концентрации частиц и средние квадратические отклонения,  $n$  — число наблюдений.

Концентрации частиц на морских побережьях, как было показано ранее в [3], подчинены закону логарифмически нормального распределения. В таких случаях хорошей характеристикой величины является среднее геометрическое или медианное значение [5, 10]. Квадратические отклонения распределения средних выборки вычислялись по формуле

$$\lg \sigma = \sqrt{\frac{\sum (\lg N_i - \lg N_{med})^2}{n(n-1)}}. \quad (1)$$

Величина  $\sigma$  в соответствии с  $N_{med}$  изменялась от 290 при морских ветрах до 460 при континентальных. Наибольшая дисперсия соответствовала континентальным условиям погоды.

Как видно из табл. 1, происходит потеря ядер по мере удаления от моря в глубь побережья, при этом уже на расстоянии 250 м концентрация частиц уменьшалась примерно в 1,5 раза. Наиболее интенсивная потеря ядер была при выносе воздушных масс с моря на сушу. При ветре, дующем с континента, намечается обратная зависимость — происходит увеличение концентрации частиц с расстоянием от моря, однако на третьем пункте число частиц снова уменьшается, что, очевидно, связано с местоположением пункта наблюдений, окруженного лесным массивом.

Концентрации частиц на морском побережье Балтийского моря несколько ниже концентрации Крымского побережья [3]. Несмотря на это имеется общая тенденция в их распространении с расстоянием от берега. Так что и для побережья Балтийского моря характер изменения концентрации частиц  $N$  в приземном слое с удалением от берега моря можно представить уравнением вида

$$\lg N = a \lg x + b, \quad (2)$$

где  $N$  — в  $10^3 \text{ см}^{-3}$ ,  $x$  — в метрах,  $a$  и  $b$  — параметры, которые можно определить графическим путем или вычислить методом наименьших квадратов. Определенные нами параметры  $a$  и  $b$  для среднего

распределения соответственно равны 0,095 и 0,76; для воздушных масс, поступающих с моря,  $a = -0,12$ ,  $b = 0,58$ . Для побережья Крымского полуострова в период штормящего моря  $a = -0,14$ , при спокойном состоянии  $a = 0,1$ .

Таким образом абсолютные значения параметра  $a$  примерно одинаковы  $|a| \approx 0,1$ . Это говорит о том, что рассеяние аэрозолей в узкой прибрежной полосе подчинено одному и тому же закону. Однако вынос аэрозолей с различных морей различен. Так, на берегу Балтийского моря при морском ветре в 17 случаях из 25 наблюдалось значительное волнение моря (3—4 балла) с высотой волны 0,75 м, в двух случаях был шторм, один из которых сопровождался ливневыми осадками. В штормовых условиях, после выпадения осадков концентрации ядер была меньше обычно наблюдаемой на целый порядок величины. 7 сентября в 18 часов при скорости ветра 14 м/с и штормящем море обнаружено всего лишь 68 частиц в  $\text{см}^{-3}$ , несмотря на сильную насыщенность воздуха водяными каплями за счет разбрызгивания. Такое ничтожное количество ядер в штормовых условиях Прибалтики можно объяснить, с одной стороны, вымыванием аэрозолей только что выпавшими осадками, с другой стороны, наличием крупных капель, которые еще не успели испариться и, наконец, большой прозрачностью воздуха, пришедшего из Атлантики на смену континентальным воздушным массам. Морские штормы Прибалтики в период отсутствия атмосферных осадков способствуют образованию «инверсионных» слоев» аэрозолей в свободной атмосфере над водной поверхностью [2].

Штормовые условия погоды у скалистых берегов Черного моря вызывали значительно большее ядрообразование. Так, только при одном шторме число мелких частиц от значения фоновых  $2 \cdot 10^3 \text{ см}^{-3}$  увеличивалось на целый порядок до  $25 \cdot 10^3 \text{ см}^{-3}$ , при этом относительная влажность окружающего воздуха была 52—57%. В случаях высокой влажности иногда и в Крыму наблюдались концентрации ядер ниже фоновых значений.

**Влияние ветра на распределение ядер Айткена в приземном слое атмосферы.** Роза концентрации частиц в зависимости от переноса воздушных масс изображена на рис. 1 (в скобках указано число случаев). Наименьшее количество ядер отмечено на всех пунк-

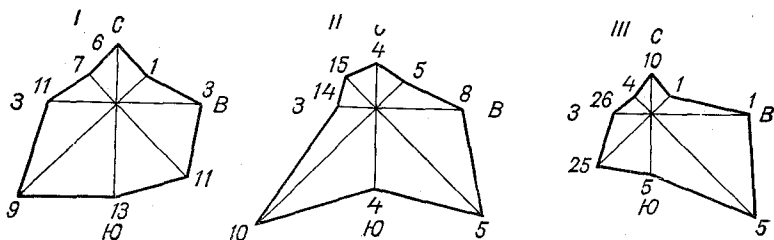


Рис. 1. Распределение ядер Айткена в зависимости от направления ветра на трех пунктах (I, II и III).

тах при морских ветрах, максимальное — при континентальных. Особенно большое количество аэрозолей наблюдалось на пунктах I и II, что объясняется открытостью местности как со стороны континента, так и со стороны песчаного берега и частично кочующих песчаных дюн. Третий пункт с этой стороны защищен кустарниками и лесным массивом. Довольно существенный вклад в загрязнение

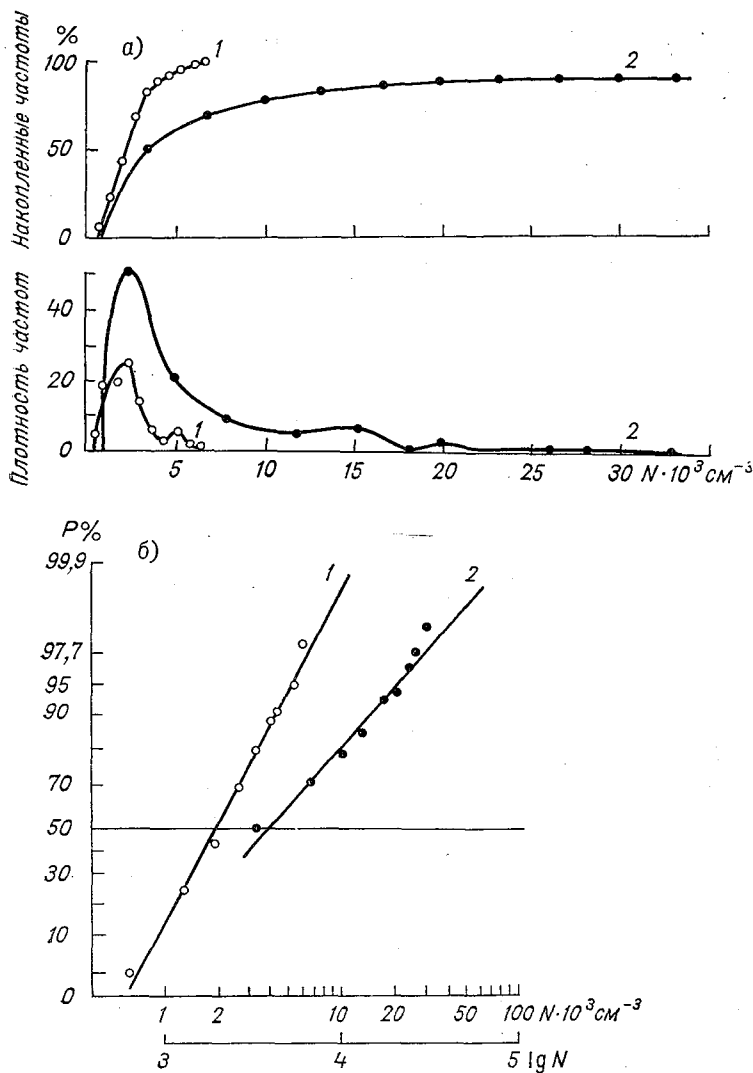


Рис. 2. Распределение повторяемостей ядер Айткена (а) и их интегральные характеристики в вероятностно-логарифмических координатах (б).

1 — при ветре с моря, 2 — при ветре с континента.

воздуха вносят и антропогенные локальные источники загрязнения (пос. Нида, дорожный транспорт).

Повторяемость разных значений концентрации ядер конденсации и их интегральные характеристики в зависимости от адвекции морских и континентальных воздушных масс представлены на рис. 2, из которого следует, что имеются существенные различия в распределениях ядер Айткена. По приведенным данным можно заключить, что  $\sim 15\%$  от общего количества ядер составляют частицы, переносимые морским ветром, а  $\sim 85\%$  — частицы, приносимые континентальным ветром.

**Суточный ход ядер конденсации.** Суточные вариации атмосферных ядер конденсации в значительной степени связаны с местными условиями. В монографии Грабовского [6] по работам иностранных ученых приводятся три типа суточного хода ядер конденсации: городской, сельский и горный.

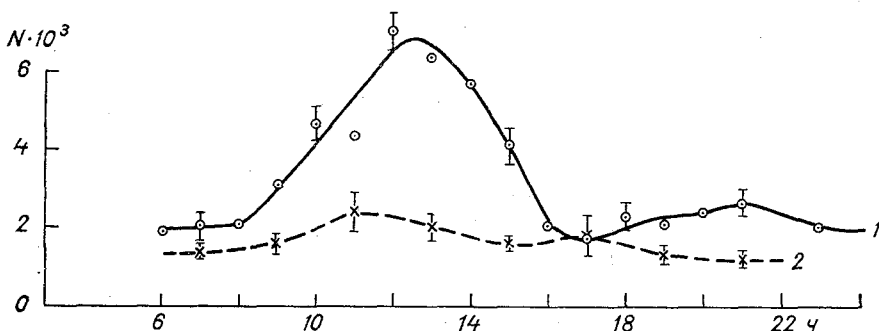


Рис. 3. Суточный ход концентрации ядер конденсации на морских побережьях. 1 — Балтийское море, 2 — Баренцево море.

Что касается суточных вариаций ядер конденсации в приземном слое атмосферы над морями и их побережьями, то таких данных крайне мало. Так, в исследованиях Айткена, приведенных в [11], на береговой станции Кингайрлах были обнаружены минимальные значения ядер ранним утром ( $N=800 \text{ см}^{-3}$ ), максимальные — в послеполуденное время ( $N=1600 \text{ см}^{-3}$ ). Данные измерений Уента [14] в 10 км от моря при морском бризе также имели минимум ранним утром (несколько сотен ядер в  $\text{см}^{-3}$ ).

Отдельные непрерывные круглосуточные измерения Ота над открытой поверхностью Тихого океана вдали от берегов установили равномерный суточный ход ядер конденсации ( $\bar{N}=500 \text{ см}^{-3}$ ). Дневные изменения им были найдены на побережье Японского моря [12]. В ясные дни концентрация частиц увеличивалась в середине дня. Экспериментальные исследования Верцара [13] указали на увеличение ядер под воздействием солнечного света, причем пик концентрации частиц появлялся, когда солнечные лучи освещали камеру под прямым углом, затем происходил быстрый спад.



На рис. 3 представлен суточный ход ядер конденсации в прибрежной полосе Балтийского моря. Минимум концентрации частиц в приземном воздухе характерен для утренних и вечерних сроков наблюдений, максимум — для дневных. На этом же рисунке для сравнения нанесен суточный ход концентраций на побережье Баренцева моря в условиях полярного дня [2]. Как видно из рис. 3, суточный ход ядер конденсации в тундре отсутствует.

Суточные вариации с дневным максимумом в прибрежной зоне Балтийского моря, с одной стороны, можно объяснить усиленным турбулентным обменом, способствующим непрерывному поступлению аэрозолей в атмосферу с открытой песчаной поверхности и их вертикально-горизонтальному переносу в дневное время. С другой стороны, однако, мы также склонны считать, что пополнение частиц Айткена в ясные дни идет и за счет терпенов, выделяемых растительностью, и фотохимических реакций, усиливающихся в дневное время.

Поскольку счет ядер происходит у поверхности земли непосредственно над источником загрязнений (песчаная подстилающая поверхность), то вполне вероятно, что максимум частиц в некоторой мере будет обязан и турбулентному обмену, который, по данным градиентных наблюдений, имеет суточный ход с дневным максимумом [7, 8, 9].

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Александров Н. Н., Петренчук О. П. Метод измерения ядер конденсации в свободной атмосфере. — «Тр. ГГО», 1959, вып. 93, с. 81—87.
2. Беляшова М. А. О распределении аэрозолей над морями. — «Тр. ГГО», 1973, вып. 293, с. 138—154.
3. Беляшова М. А. Содержание в приземном слое атмосферы мелкодисперсных аэрозолей (ядер Айткена) на побережьях Баренцева и Черного морей. — «Тр. ГГО», 1974, вып. 343, с. 20—33.
4. Беляшова М. А. Вымывание частиц мелкодисперсной фракции атмосферных осадками на побережье Кольского полуострова. — «Тр. ГГО», 1975, вып. 352, с. 200—206.
5. Брукс К., Карузерс Н. Применение статистических методов в метеорологии. (Пер. с англ.) Л., Гидрометеиздат, 1963, с. 44—50.
6. Грабовский Р. И. Атмосферные ядра конденсации. Л., Гидрометеиздат, 1956, с. 48—52.
7. Грачева В. П. Географическое распределение коэффициента турбулентности в приземном слое атмосферы летом в дневное время. — «Тр. ГГО», 1968, вып. 207, с. 164—169.
8. Грачева В. П. О коэффициенте турбулентного обмена в приземном слое атмосферы летом в дневное время в различных географических районах СССР. — «Тр. ГГО», 1968, вып. 234, с. 152—161.
9. Огнева Т. А. Коэффициент турбулентности как один из факторов метеорологического потенциала загрязнения атмосферы. — «Тр. ГГО», 1975, вып. 352, с. 130—136.
10. Румшинский Л. З. Математическая обработка результатов эксперимента. М., «Наука», 1971, с. 54—55.

11. Landsberg H. The variations of Nuclei and their Correlation with other Meteorological Elements, *Ergebnisse der Kosmischen Physik*—„Leipzig”, 1938, Band III, p. 196—198.
12. Ohta S. On the contents of condensation nuclei and uncharged nuclei on the Pacific Ocean and the Japan Sea.—„Bulletin of the American Meteorological Society”, 1951, v. 32, N 1, p. 30—31.
13. Verzar F., Kunz Y. Production of atmospheric condensation nuclei by Solar radiation.—„Geofisica pura e applicata”. 1957/III v. 38, p. 215—220.
14. Went F. W. On the nature of Aitken Condensation nuclei.—„Tellus”, 1966, v. 18, N 2—3, p. 549—556.

## КОНЦЕНТРАЦИЯ И ДИСПЕРСНЫЙ СОСТАВ АЭРОЗОЛЕЙ НА ПОБЕРЕЖЬЕ БАЛТИЙСКОГО МОРЯ

Известно, что моря являются источниками аэрозолей, которые образуются в процессе разбрызгивания морской воды.

Проведенные многими исследователями измерения концентрации и дисперсного состава аэрозолей в прибрежных районах показывают, что концентрация морских аэрозолей размером более 1 мкм не превышает 1 см<sup>-3</sup>, а концентрация аэрозолей крупнее 0,1 мкм колеблется в пределах 1—10 см<sup>-3</sup> [5]. Но несмотря на такие низкие концентрации частицы морских солей могут играть существенную роль в образовании в облаке крупных капель и таким образом в возникновении дождя. Поэтому исследование концентраций и дисперсного состава аэрозолей представляет несомненный интерес.

В течение ряда экспедиций нами проводились исследования аэрозолей на побережьях Черного [4], Баренцева и Балтийского морей.

Отбор проб аэрозолей производился с помощью 3-каскадного импактора [1]. Пробы отбирались в течение 20—30 мин на стеклянные пластинки, покрытые иммерсионным маслом, при скорости аспирации 15—20 л/мин. Непосредственно после отбора пробы фотографировались через микроскоп и обсчитывались на полуавтоматической установке Дьяченко [2].

Концентрация частиц вычислялась по формуле

$$N = \frac{nS}{VS_1}, \quad (1)$$

где  $n$  — среднее число частиц на одном кадре,  $S$  — площадь аэрозольного следа,  $S_1$  — площадь фотографируемого участка следа,  $V$  — объем пропущенного воздуха.

Нами было показано, что относительная ошибка определения числа частиц в единице объема воздуха составляет 13% [4]. Область размеров частиц, эффективно улавливаемых импактором, составляла в среднем  $0,5 \text{ мкм} < r \leq 20 \text{ мкм}$ .

Исследование концентраций и дисперсного состава аэрозолей на побережье Балтийского моря проводилось в сентябре 1975 г. на ст. Нида. Пробы отбирались в двух пунктах: 1) в пункте № 1 на берегу моря; 2) в пункте № 3 на расстоянии 300 м от берега моря. Всего было отобрано 20 проб аэрозолей. Полученные данные были разбиты на две группы:

1) пробы, отобранные при направлениях ветра ЮЗ, ЗЮЗ, З, ЗСЗ, СЗ, т. е. при ветре с моря.

2) пробы, отобранные при направлениях ветра от ЮЮЗ до С, т. е. при ветре с континента.

Результаты определения счетной и массовой концентрации аэрозолей представлены в табл. 1.

Таблица 1

| Направление ветра | Пункт | Счетная концентрация аэрозолей, см |       |      | Массовая концентрация аэрозолей, мкг/м <sup>3</sup> |       |      | $\beta$ |
|-------------------|-------|------------------------------------|-------|------|---|-------|------|---------|
|                   |       | мин.                               | макс. | ср.  | мин.  | макс. | ср.  |         |
| С моря            | 1     | 0,11                               | 0,38  | 0,21 | 9,4   | 76,5  | 34,9 | 1,70    |
|                   | 3     | 0,03                               | 0,16  | 0,10 | 18,4  | 61,0  | 35,8 | 1,75    |
| С континента      | 1     | 0,08                               | 0,24  | 0,15 | 30,5  | 94,7  | 56,2 | —       |
|                   | 3     | 0,10                               | 0,20  | 0,15 | 28,9  | 103,3 | 59,7 | —       |

Из табл. 1 видно, что в среднем счетная концентрация аэрозолей уменьшается с удалением от берега моря. Проведенный нами анализ показал, что между концентрациями аэрозолей на первом и третьем пунктах существует линейная зависимость, которую можно представить уравнением

$$y = 0,59x + 38, \quad (2)$$

где  $x$  — концентрация аэрозолей на первом пункте, а  $y$  — на третьем.

Если сравнить счетные концентрации аэрозолей на одном и том же пункте при различных направлениях ветра, то можно заметить, что на первом пункте при морских направлениях ветра концентрации аэрозолей выше, чем при континентальных направлениях ветра. На третьем пункте более высокие концентрации аэрозолей наблюдались при ветре с континента.

При рассмотрении распределений аэрозолей по размерам (рис. 1) видно, что при направлении ветра с моря распределение частиц по размерам имеет форму, подчиняющуюся закону Юнге

$$\frac{dN}{d(\lg r)} = Cr^{-\beta}, \quad (3)$$

где  $N$  — концентрация аэрозолей в единице объема воздуха,  $C$  — постоянная величина,  $r$  — радиус аэрозолей,  $\beta$  — показатель степени. Но значения показателя  $\beta$  низки и в среднем равны 1,7.

Интересно отметить, что в результате исследования распределения аэрозолей по размерам на побережье Баренцева моря в пос. Дальние Зеленцы нами были определены значения показателей  $\beta$ , которые оказались равными в среднем 1,3. Такие небольшие значения показателя  $\beta$  говорят о низком содержании мелкодисперсной фракции аэрозолей, составляющей основную массу счетной концентрации. И, действительно, общая счетная концентрация аэрозолей в том и другом случае невелика (не превосходит  $0,24 \text{ см}^{-3}$ ).

При направлениях ветра с континента кривые распределения аэрозолей по размерам для первого и третьего пунктов почти совпадают. Распределение Юнге нарушено местным максимумом

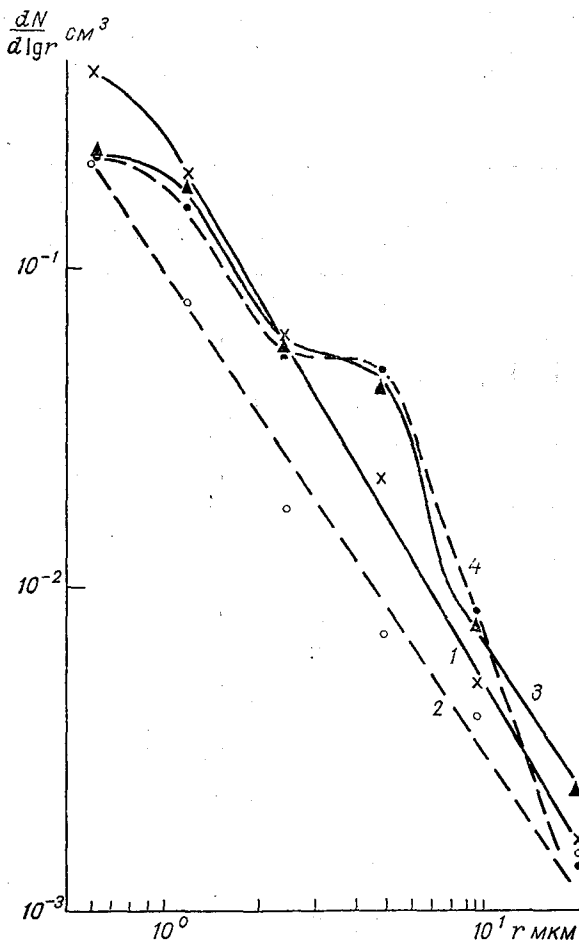


Рис. 1. Распределение аэрозолей по размерам.  
 1) первый пункт, ветер с моря; 2) третий пункт, ветер с моря; 3) первый пункт, ветер с континента; 4) третий пункт, ветер с континента.

в области 5 мкм. По-видимому, здесь сказывается влияние какого-то источника, поставляющего аэрозоли данного размера.

Зная распределение аэрозолей по размерам, можно рассчитать их массовую концентрацию по формуле

$$M = \frac{4}{3} \pi \rho \int_{r_1}^{r_2} \frac{dN}{d(\lg r)} r^2 dr, \quad (4)$$

где  $M$  — массовая концентрация аэрозолей,  $\rho$  — плотность частиц.

Рассчитанную массовую концентрацию аэрозолей можно сравнить с концентрацией частиц NaCl, которая вычисляется по содержанию ионов  $Cl^-$  в воздухе [4]. Определение концентрации ионов  $Cl^-$  в воздухе производилось при химическом анализе проб, отобранных на фильтры АФА-ХП-18 [3]. Пробы на фильтры отбирались одновременно с пробами, отобранными при помощи импактора.

Таблица 2

| Дата               | Пункт | Ветер       |              | Счетная концентрация аэрозолей, см <sup>-3</sup> | Массовая концентрация аэрозолей, мкг/м <sup>3</sup> | Массовая концентрация частиц NaCl, мкг/м <sup>3</sup> | Доля частиц NaCl, % |
|--------------------|-------|-------------|--------------|--|---|---|---------------------|
|                    |       | направление | скорость м/с |  |   |   |                     |
| Ветер с моря       |       |             |              |  |   |   |                     |
| 29/VIII            | 1     | ЗСЗ         | 1            | 0,24   | 39,4  | 5,6   | 14,2                |
| 4/IX               | 1     | ЗСЗ         | 3            | 0,11   | 9,4   | 3,0   | 31,8                |
|                    | 3     | З           | 5            | 0,07   | 18,4  | 3,3   | 17,9                |
| 5/IX               | 3     | ЗСЗ         | 6            | 0,03   | 28,5  | 3,3   | 11,5                |
|                    | 1     | ЗСЗ         | 6            | 0,15   | 26,7  | 8,6   | 32,2                |
| 6/IX               | 1     | СЗ          | 7            | 0,26   | 76,5  | 5,8   | 7,6                 |
|                    | 1     | ЮЗ          | 5            | 0,38   | 61,7  | 6,1   | 9,9                 |
|                    | 3     | З           | 4            | 0,23   | 25,7  | 8,8   | 28,2                |
|                    | 3     | З           | 4            | 0,16   | 61,0  | 2,6   | 4,3                 |
| Ветер с континента |       |             |              |  |   |   |                     |
| 30/VIII            | 1     | Ю           | 1            | 0,24   | 40,8  | 0   | 0                   |
|                    | 3     | ЮЮВ         | 1            | 0,20   | 32,9  | 2,0   | 6,1                 |
| 3/VIII             | 1     | ВСВ         | 6            | 0,16   | 30,5  | 1,3   | 4,3                 |
|                    | 3     | ССВ         | 5            | 0,14   | 82,3  | 0   | 0                   |
| 1/IX               | 3     | ЮВ          | 4            | 0,18   | 109,3   | 0   | 0                   |
|                    | 1     | ЮВ          | 4            | 0,08   | 94,7  | 0   | 0                   |
|                    | 3     | ЮВ          | 4            | 0,14   | 68,2  | 0   | 0                   |
| 2/IX               | 1     | С           | 6            | 0,12   | 82,4  | 1,3   | 1,6                 |
|                    | 3     | С           | 1            | 0,12   | 35,4  | 1,8   | 5,1                 |
| 3/IX               | 3     | ЮЮВ         | 7            | 0,10   | 28,9  | 1,7   | 5,9                 |
|                    | 1     | ЮЮВ         | 7            | 0,15   | 32,8  | 3,0   | 9,4                 |

В табл. 2 представлены данные сравнения массовых концентраций частиц NaCl и аэрозолей, а также общее содержание аэрозолей в воздухе.

Из табл. 2 видно, что на первом пункте при ветре с моря частицы вносят ощутимый вклад в массовую концентрацию аэрозолей. При чисто морских направлениях ветра (ЗСЗ и З) этот вклад зависит от скорости ветра.

Значения концентраций частиц NaCl невелики и сравнимы с концентрациями, которые наблюдались на побережье Черного моря при скоростях ветра меньших 2 м/с [4], что объясняется различием рельефа прибрежной зоны в исследуемых пунктах Балтийского и Черного морей. На Крымском побережье Черного моря берег скалистый и поэтому разбрызгивание волн более значительно, чем на пологом побережье Балтийского моря.

Интересно сравнить полученные значения концентраций частиц NaCl в приземном слое с их значениями в свободной атмосфере. В период научно-исследовательских полетов в ноябре — декабре 1974 г. нами проводился отбор проб аэрозолей на фильтры для последующего химического анализа. Пробы отбирались на разных высотах над морем в 100 км от берега и над береговой зоной в районе Паланги. Всего было отобрано 25 проб.

Получены следующие концентрации частиц NaCl на разных высотах (табл. 3).

| Т а б л и ц а 3     |        |         |         |      |
|---------------------|--------|---------|---------|------|
| Н м . . . . .       | 75—140 | 190—250 | 400—500 | 2240 |
| Над морем . . . . . | 2,01   | 1,74    | 1,11    | —    |
| Над сушей . . . . . | —      | 1,63    | 1,11    | 0,91 |

Из табл. 3 видно, что значения концентрации частиц NaCl, в свободной атмосфере вплоть до высот 2000 м сопоставимы с концентрациями этих частиц, полученными в прибрежной зоне. Таким образом, на основании полученных результатов можно сделать вывод, что в исследуемом районе вклад морских солей в общее содержание аэрозолей заметно ощутим только в непосредственной близости от берега моря. С удалением от берега моря концентрация частиц становится сравнимой с концентрациями этих частиц в свободной атмосфере на высоте 250 м.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Александров Н. Н., Петренчук О. П., Хусанов Г. Х. Исследование аэрозолей посредством импактора. — «Тр. ГГО», 1973, вып. 293, с. 123—132.
2. Дьяченко П. В. Установка для обработки микрофотографий капель облаков и туманов. — «Тр. ГГО», 1968, вып. 224, с. 130—134.
3. Петренчук О. П., Лавриненко Р. Ф. Химический состав аэрозолей на морском побережье Крыма. — «Тр. ГГО», 1974, вып. 314, с. 168—180.
4. Петренчук О. П., Ионин В. А. Концентрация и дисперсный состав аэрозолей на морском побережье Крыма. — «Тр. ГГО», 1974, вып. 343, с. 3—11.
5. Юнге Х. Химический состав и радиоактивность атмосферы. М., «Мир», 1965, с. 5—423.

*Н. Ш. Вольберг, З. Г. Тульчинская*

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ СЕРНИСТОГО ГАЗА В ПОЛЕВЫХ УСЛОВИЯХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СОРБЦИОННЫХ ТРУБОК

В [1] был описан метод определения двуокиси серы в атмосфере парарозанилин-формальдегидным методом с отбором проб на токопленочный сорбент — стеклянные гранулы, смоченные невысыхающим поглотительным раствором. Было показано, что при отборе в обычных условиях сорбционная трубка, содержащая такой сорбент, имеет ряд преимуществ перед жидкостными поглотительными приборами: невозможность отравления благодаря существенно меньшему содержанию сулемы, а также вследствие того, что раствор нанесен на стекло; прочность и компактность.

Целью настоящего исследования явилась проверка эффективности поглощения двуокиси серы сорбционными трубками при температурах, реально встречающихся во время отборов в полевых условиях, при воздействии наиболее важных сопутствующих примесей, а также при пропускании больших объемов воздуха, необходимых для измерения очень низких концентраций газа.

Влияние отрицательных температур изучалось в полевых условиях. Опыты проводились при наиболее часто встречающихся температурах воздуха от  $-16$  до  $+7^{\circ}\text{C}$  и с объемами проб до нескольких кубических метров. Для определения проскока отбор производился в две последовательно соединенные трубочки. Для пропитки трубок исследовался раствор состава:  $0,04$  М тетрахлормеркурат натрия (ТХМ),  $1,6\%$ -ный ацетат натрия и  $15\%$ -ный этиленгликоль. Контроль объема протянутого воздуха обеспечивался газовым счетчиком марки ГСБ-400. Скорость протягивания воздуха составляла  $2$  л/мин. Полученные результаты представлены в табл. 1.

Данные табл. 1 свидетельствуют о том, что во всем исследованном диапазоне температур и объемов проскок во вторую трубку практически отсутствовал, хотя метод позволял определить величину проскока с чувствительностью  $0,1\%$ . И лишь в единичных случаях проскок составил несколько процентов.



Полученные данные позволяют сделать вывод, что сорбционные трубки могут быть применены не только при положительных, но и при отрицательных температурах, т. е. в условиях когда жидкостные поглотительные приборы не могут быть использованы. Это является весьма важным преимуществом твердых сорбентов, поскольку определение двуокиси серы особенно актуально именно в зимний период.

Большой практический интерес представляет исследование эффективности поглощения и сохраняемости проб во время отбора при высоких температурах воздуха (до  $+40^{\circ}\text{C}$ ), часто встречающихся

Таблица 1

**Проверка эффективности поглощения двуокиси серы сорбционными трубками при низких температурах воздуха**

| Объем пробы воздуха, м <sup>3</sup> | Интервал температур, °C<br>от до | Найдено SO <sub>2</sub> (интервал концентраций) |                   | Проскок, % |
|-------------------------------------|----------------------------------|---|-------------------|------------|
|                                     |                                  | мкг в пробе                                     | мг/м <sup>3</sup> |            |
| 0,4 ± 0,1                           | -16 -14                          | 40-120  | 0,080-0,210       | 0,2        |
| 0,4 ± 0,1                           | -2 +2                            | 8-30  | 0,013-0,045       | 0          |
| 0,7 ± 0,1                           | -2 +2                            | 6-16  | 0,010-0,020       | 0          |
| 1,4 ± 0,2                           | +3 +7                            | 16-45   | 0,013-0,028       | 2,0        |
| 1,8 ± 0,2                           | +3 +7                            | 140-180   | 0,100-0,190       | 0,1        |

в южных районах страны. Опыты проводились в водяном термостате. Заданные концентрации двуокиси серы получали с помощью диффузионного дозатора [2]. Первые же опыты показали, что эффективность поглощения SO<sub>2</sub> быстро снижается, что, по-видимому, было связано с испарением этиленгликоля. Замена его на менее летучий глицерин существенно улучшила степень улавливания SO<sub>2</sub>. Поэтому дальнейшие опыты проводились с раствором состава: 0,04 М ТХМ, 15%-ный глицерин и 1,6%-ный ацетат натрия. В результате проведенных исследований было установлено, что при максимальном объеме пробы воздуха 1 м<sup>3</sup> и  $t = +40^{\circ}\text{C}$  проскок во вторую трубку составил  $3 \pm 0,5\%$ . Таким образом, при высокой температуре анализируемого воздуха проскок возрастает, хотя и в небольшой степени. Учитывая, что в опытах объем протянутой пробы воздуха в несколько десятков раз превышал обычно рекомендуемую величину, можно полагать, что при обычных анализах повышение температуры не приведет к заметному увеличению проскока.

Как известно, высокая температура ускоряет окисление сульфит-иона. Поэтому было важно проверить устойчивость проб в процессе отбора при высоких температурах воздуха. Проверка проб на сохраняемость оценивалась при протягивании через трубки с заданной концентрацией двуокиси серы 1 м<sup>3</sup> очищенного воздуха при температурах 20, 30, 35 и  $40^{\circ}\text{C}$  в течение 8 часов. Скорость протяги-

вания воздуха равнялась 2 л/мин. Данные по сохраняемости представлены на рис. 1.

Из приведенных результатов видно, что даже при температуре +40°C потери двуокиси серы составляют всего около 15%. Следует отметить, что влияние высоких температур проверялось в довольно жестких условиях, а именно отбор в течение 8 часов при +40°C, тем не менее отбор сернистого газа с использованием сорбционных трубок может проводиться в указанном диапазоне температур. Проверка показала, что при разовом отборе в течение 20 мин не происходит потерь двуокиси серы при повышенных температурах. Вместе с тем во избежание потерь SO<sub>2</sub> отобранные пробы желательно хранить в холодильнике.

При отборе в жидкостные поглотительные приборы определению двуокиси серы мешает присутствие озона и двуокиси азота. В работах [3, 4] указано, что мешающее влияние NO<sub>2</sub> и O<sub>3</sub> устраняются

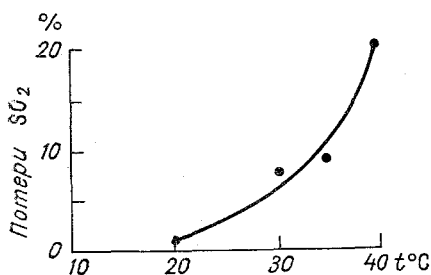


Рис. 1. Влияние температуры на потери SO<sub>2</sub> при отборе проб в сорбционные трубки.

добавлением сульфаминовой кислоты и выдерживанием пробы перед анализом. Нужно было проверить эффективность такого способа при отборе в сорбционные трубки. Для получения заданных концентраций NO<sub>2</sub> использовался абсолютный дозатор, представляющий собой ампулу, изготовленную из фторопласта и заполненную сжиженной двуокисью азота. Озон генерировали электролизом хлорной кислоты. Заданные концентрации сернистого газа получали при помощи абсолютного дозатора [1]. На сорб-

ционную трубку одновременно подавалась заданная концентрация сернистого газа и примерно тройной избыток двуокиси азота или озона. Проверка проводилась при концентрациях SO<sub>2</sub> = 0,16 мг/м<sup>3</sup>, NO<sub>2</sub> = 0,50 мг/м<sup>3</sup> и O<sub>3</sub> = 0,45 мг/м<sup>3</sup>. Результаты проверки, средние из пяти определений, представлены в табл. 2.

Таблица 2

Влияние NO<sub>2</sub> и O<sub>3</sub> на определение сернистого газа при отборе проб в сорбционные трубки

| Задано, мкг     |                 |                | Найдено SO <sub>2</sub> , мкг |
|-----------------|-----------------|----------------|-------------------------------|
| SO <sub>2</sub> | NO <sub>2</sub> | O <sub>3</sub> |                               |
| 1,58            | 5,0             | —              | 1,58                          |
| 3,18            | 10,0            | —              | 3,17                          |
| 1,67            | —               | 4,5            | 1,70                          |
| 3,45            | —               | 9,0            | 3,50                          |

Из полученных результатов видно, что ни двуокись азота, ни озон не мешают определению сернистого газа при отборе проб в сорбционные трубки.

Установлено, что трубки с тонкопленочным сорбентом могут быть использованы для отбора проб воздуха на двуокись серы как при отрицательных, так и при повышенных температурах анализируемого воздуха. Для отбора при отрицательных температурах для пропитки трубок рекомендуется раствор, содержащий этиленгликоль, при повышенных температурах — глицерин.

Показана возможность отбора больших объемов воздуха: не менее 2 м<sup>3</sup> при отрицательных температурах и не менее 1 м<sup>3</sup> при повышенных температурах. Найдено, что озон и двуокись азота не мешают определению SO<sub>2</sub> при отборе проб в сорбционные трубки.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вольберг Н. Ш., Тульчинская З. Г. Определение двуокиси серы в атмосфере парарозанилин-формальдегидным методом с отбором проб сорбционными трубками. — «Тр. ГГО», 1975, вып. 352, с. 163—168.
2. Вольберг Н. Ш., Скнар В. Н. Дозирующие устройства для двуокиси серы. — «Тр. ГГО», 1975, вып. 352, с. 159—162.
3. Scaringelli F. P., Saltzman B. E. and Frey S. A. Spectrophotometric Determination of Atmospheric Sulfur Dioxide. Anal. Chem 39, 1709 (1967).
4. Zurlo N. and Griffini A. M. Measurement of the SO<sub>2</sub> Content of Air in the Presence of Oxides of Nitrogen and Heavy Metals. Med. Lavoro, 53, 330, (1962).

*Н. Н. Александров, А. И. Гунченко  
Д. Р. Монаселидзе, Н. А. Паничев*

## **ОСОБЕННОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕМЕНТНОГО СОСТАВА АТМОСФЕРНОЙ ПЫЛИ МЕТОДОМ ЭМИССИОННОГО СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА**

Одним из видов загрязнения атмосферы является атмосферная пыль, представляющая собой грубодисперсную фракцию аэрозолей. Она может быть естественного и искусственного происхождения и ее появление обусловлено действием различных источников, таких, как разрушение и выветривание горных пород, сгорание в атмосфере космических тел и извержение вулканов, химические и физико-химические реакции в атмосфере, хозяйственная деятельность человека. Так как источники происхождения и условия образования пыли различны, она имеет не только изменчивый дисперсный состав и форму, но и сложный химический состав. Вследствие этого данные о составе аэрозолей и его изменении во времени имеют большое практическое значение.

Вредное воздействие пыли на окружающую среду и организм человека определяется в значительной степени ее химическим составом и, в частности, наличием в ней Pb, Cr, Mn, V, Cu, Cd, Ni, Hg и других элементов.

Определение концентрации металлов в воздухе проводится эпизодически и не носит характера регулярных наблюдений. Объясняется это, по-видимому, тем, что анализ атмосферной пыли представляет собой трудную аналитическую задачу, а существующие методики либо не позволяют проводить одновременное определение всех металлов [3], либо требуют сложной аппаратуры, недоступной большинству аналитических лабораторий.

В настоящее время в ряде управлений Гидрометслужбы внедряются новые методы определения металлов в атмосферном воздухе с помощью эмиссионного спектрального анализа. Главное достоинство метода эмиссионного спектрального анализа заключается в возможности одновременного определения большой группы элементов на стандартной аппаратуре с достаточной чувствительностью и точностью. Этот метод может быть использован для анализа проб пыли, собранной на фильтры, после предварительного определения

ее весовой концентрации. Но при этом имеется ряд трудностей, как, например, мешающее влияние элементов основы определяемых микроэлементов, а также фона от фильтров [1, 2].

Состав основы довольно изменчив и зависит в значительной степени от характера подстилающей поверхности и окружающей местности. Эту изменчивость можно проиллюстрировать табл. 1.

Сложность анализа проб пыли заключается в разнообразии и непостоянстве ее химического состава. В зависимости от источника выбросов, реакций, протекающих в атмосфере, определяемые

Таблица 1

Относительное содержание окислов металлов в зольном остатке пробы пыли в %

| Город                    | Вес золы, мг | SiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | CaO | MgO | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Сум-<br>ма |
|--------------------------|--------------|------------------|--------------------------------|-----|-----|--------------------------------|------------|
| Сухуми . . . . .         | 3,88         | 33               | 11                             | 18  | 6   | 3                              | 71         |
| Баку . . . . .           | 5,11         | 20               | 16                             | 40  | 7   | 6                              | 89         |
| Астрахань . . . . .      | 5,70         | 50               | 14                             | 17  | 6   | 9                              | 96         |
| Ростов-на-Дону . . . . . | 5,77         | 18               | 16                             | 14  | 3   | 7                              | 58         |

элементы могут находиться в виде сульфатов, сульфидов, галогенидов, окислов, нитратов и т. д. [7, 11]. Чтобы устранить влияние переменного состава пробы на результаты анализа, необходима предварительная подготовка проб, имеющая своей целью переводение всех соединений в единую форму.

Описанные в литературе методы спектрального анализа атмосферной пыли в зависимости от способа подготовки проб к анализу можно подразделить на три группы:

- 1) прямой анализ фильтра с пылью;
- 2) растворение примесей с последующим анализом раствора или сухого остатка;
- 3) озоление фильтров с последующим анализом зольного остатка.

Прямой метод анализа, который заключается в том, что фильтр с пробой непосредственно без какой-либо обработки вводится в источник света [4, 12], привлекает возможностью упростить процедуру подготовки проб и увеличить экспрессность определений.

Разновидностью этого способа подготовки проб к анализу является растворение изоамилацетатом части фильтра с пылью на торце электрода [8]. Однако на точности определения концентрации металлов данным способом может сказаться присутствие органической части фильтра и неравномерность распределения металлов на его поверхности. Как показали экспериментальные данные, влияние органической части материала фильтра довольно существенно.

На рис. 1 приведены градуировочные графики для определения олова. Аналогичные результаты получены для определения Pb, Cr, Zn, Mn, Ba. Такую зависимость можно объяснить тем, что при сгорании органической части материала фильтра происходит интенсивный вынос определяемых элементов из зоны разряда.

Как известно [13], частицы пыли на фильтре распределены неравномерно и могут отличаться размером, степенью грануляции и химическим составом. Для оценки погрешности определения примесей за счет неравномерности распределения частиц пыли по площади фильтра, был произведен сравнительный анализ каждой из частей фильтра, разделенного на 12 секторов (табл. 2).

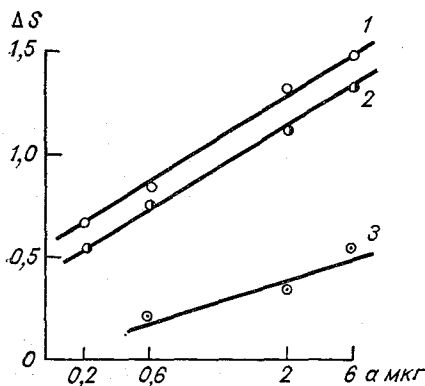


Рис. 1. Градуировочные графики для определения олова.

1 — без фильтра, 2 — в  $\frac{1}{8}$  части фильтра,  
3 — в целом фильтре.

те экспериментов было обнаружено, что коэффициент извлечения примесей из фильтра для таких элементов, как Pb, Cr, Mn, Zn может достигать 30—70%; он непостоянный для разных проб и зависит от количества двуоксида кремния на фильтре, которая сорбирует и прочно удерживает ионы металлов, формы соединений определяемых элементов и др.

Третий способ подготовки основан на предварительном сухом озонении [14, 15]. Из имеющихся литературных данных по деструкции поливинилхлорида [9] известно, что материал фильтра разлагается при 430°C. В ходе исследования было выяснено, что при этой температуре фильтры озонятся в течение нескольких суток. Оптимальной температурой озонения является температура около 500°C, при которой полное озонение происходит в течение 1 часа. Для оценки этого способа нами были определены потери примесей для 18 элементов: Ba, Pb, Cr, Sn, Mn, Ni, Mo, V, Ti, Zn, Sr, As, Sb, Tl, Cd, Ja, Bi, Co.

Для этого на чистые фильтры наносилось определенное количе-

Отклонения отдельного измерения от среднего значения для разных секторов колеблются от единиц до 103%. Поэтому фактическая ошибка определения общего количества элемента на всем фильтре может превышать 100%. Несмотря на это, данный способ подготовки проб пыли к анализу может использоваться, но только для проведения предварительных, оценочных анализов степени загрязненности воздуха, учитывая крайнюю простоту его исполнения.

Чаще всего при анализе пыли применяется второй способ подготовки проб — растворение определяемых элементов различными кислотами. Однако в результа-

Таблица 2

Результаты определения содержания металлов по отдельным секторам анализируемого фильтра с пылью

| Сектор  | Cu   |     | Pb   |     | Sn   |    | Cd   |    | Mn   |    |
|---------|------|-----|------|-----|------|----|------|----|------|----|
|         | мкг  | %   | мкг  | %   | мкг  | %  | мкг  | %  | мкг  | %  |
| 1       | 0,50 | 36  | 0,08 | 11  | 0,12 | 0  | 0,05 | 67 | 0,29 | 16 |
| 2       | 0,39 | 47  | 0,07 | 22  | 0,09 | 25 | 0,04 | 33 | 0,28 | 12 |
| 3       | 0,53 | 28  | 0,06 | 33  | 0,09 | 25 | 0,03 | 0  | 0,16 | 64 |
| 4       | 0,62 | 16  | 0,00 | 100 | 0,06 | 50 | 0,03 | 0  | 0,19 | 76 |
| 5       | 0,45 | 39  | 0,08 | 1   | 0,09 | 25 | 0,02 | 33 | 0,14 | 56 |
| 6       | 0,68 | 8   | 0,07 | 22  | 0,10 | 17 | 0,01 | 67 | 0,15 | 60 |
| 7       | 0,80 | 8   | 0,11 | 33  | 0,14 | 17 | 0,02 | 33 | 0,24 | 4  |
| 8       | 1,34 | 81  | 0,12 | 33  | 0,13 | 8  | 0,03 | 0  | 0,28 | 12 |
| 9       | 0,77 | 4   | 0,12 | 33  | 0,13 | 8  | 0,03 | 0  | 0,32 | 28 |
| 10      | 1,50 | 103 | 0,17 | 89  | 0,23 | 92 | 0,04 | 33 | 0,41 | 64 |
| 11      | 0,52 | 30  | 0,09 | 0   | 0,09 | 25 | 0,02 | 33 | 0,11 | 56 |
| 12      | 0,74 | 0   | 0,14 | 55  | 0,16 | 33 | 0,04 | 33 | 0,04 | 84 |
| Среднее | 0,74 |     | 0,09 |     | 0,12 |    | 0,03 |    | 0,25 |    |

ство смеси синтетических порошков с известной концентрацией определяемых элементов. Оценка потерь производилась на основе спектральных определений методом «введено — найдено». Как показали результаты, в данных условиях озоления ( $T=500^{\circ}\text{C}$ , время озоления 1 час) потери некоторых элементов (Pb, Sn, Zn, Bi, Tl, As) могут быть значительны и достигать 50—100%. Эти потери можно объяснить образованием легколетучих хлоридов, образующихся при взаимодействии примесей с хлористым водородом, который выделяется при разложении фильтров типа ФПП и АФА. Самым надежным является способ комбинированного озоления, при котором примеси на фильтре вначале переводятся под действием концентрированной серной кислоты с добавлением азотной [5, 15] в труднолетучую форму — сульфаты. После выпаривания кислот на песчаной бане фильтры озолются при температуре  $500^{\circ}\text{C}$ . В этом случае потери вышеуказанных 17 элементов (за исключением As) в пределах ошибок применяемого метода спектрального анализа не наблюдалось. В отличие от других способов озоления систематическая ошибка этого способа не зависит от формы соединений, входящих в состав пыли.

Помимо способа подготовки проб анализ атмосферной пыли обладает еще одной особенностью. Навеска пыли на фильтре может меняться в зависимости от ряда факторов (места и времени отбора проб, степени загрязненности воздуха). Отсюда вытекает неизбежность проведения анализа разовых проб атмосферной пыли из разных навесок. Очевидно, что величина навески на фильтре

определяется составом макрокомпонентов. Поэтому вопрос о влиянии величины навески связан с влиянием макрокомпонентов, величина которых определяется составом макропримесей.

При изучении вопроса о влиянии состава атмосферной пыли на интенсивность спектральных линий определяемых элементов нами исследовалось влияние каждого макроэлемента в отдельности. Были изучены зависимости разности почернений аналитических линий и фона от абсолютных количеств отдельного макроэлемента на электроде при одинаковом абсолютном количестве определяющих примесей (2 мкг). Зависимость разности почернений Bi, Cr, Sn, Cd, Zn от количества введенного Al свидетельствует о том, что его влияние на интенсивность линий определяемых элементов существенно. Аналогичные зависимости наблюдаются для других элементов основы:

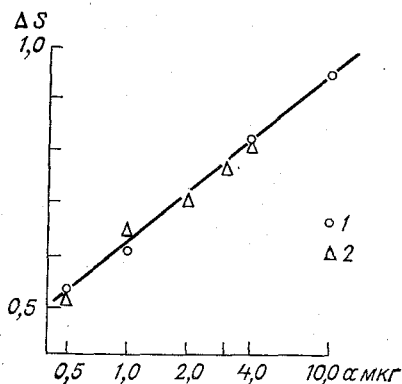


Рис. 2. Градуировочный график для определения свинца.

1 — навески четырех эталонов по 2 мг при концентрациях 0,025; 0,05; 0,2; 0,5% соответственно, 2 — навески пяти эталонов по 0,5; 1,0; 2,0; 3,0; 4,0 мг при концентрации в них свинца 0,1%.

Si, Ca, Mg. Характер влияния элемента, основы определения его физико-химическими свойствами. Это влияние выражается в изменении положения градуировочной кривой, что ведет к значительному снижению точности анализа.

Для подавления этого влияния в качестве буфера была выбрана смесь углеродного порошка и хлористого натрия. Хлористый натрий вводился в виде раствора на электроды в количестве 2 мкг. После его высушивания в канал электрода помещались зольные остатки, разбавленные угольным порошком в отношении 1:4. Условия фотографирования спектров: ток 9А, экспозиция 30 с. Введение такого буфера обеспечило стабилизацию температуры, изменение которой контролировалось по разности почернения фикспары V для дуговой (V 318,5 нм) и искровой (V 311,0 нм) его линий.

В результате оказалось, что для определения примесей в разных основах при введении буфера можно пользоваться одним градуировочным графиком. Из рис. 2 видно также, что относительное почернение аналитической линии не зависит от величины навески пробы в электроде при одинаковом абсолютном количестве элемента. Проведенная оценка показала, что погрешность определения содержания в пробах различных элементов из навесок пыли  $\geq 0,5$  мг составляет в среднем 15% и не превышает 25% (табл. 3).

Однако большое количество микропримесей, содержащихся в чистых фильтрах [2], по-видимому, обусловленное загрязнением первичного материала в процессе производства, может искажать результаты измерений. Но так как содержание микропримесей в фильтре из ткани ФПП-15 без марлевой подложки площадью



Таблица 3

Абсолютные пределы обнаружения примесей в составе атмосферной пыли и погрешность их определения по методике с комбинированным озонением

| Элемент | Аналитические линии, нм | Пределы обнаружения, $10^{-6}$ г | Интервал определяемого содержания, $10^{-6}$ г | Средняя относительная погрешность $\delta$ , % |
|---------|-------------------------|----------------------------------|--|--|
| Ba      | 233,53                  | 0,1                              | 0,6—60   | 25   |
| Bi      | 289,80                  | 0,1                              | 0,6—60   | 17   |
| Cd      | 326,10                  | 0,1                              | 0,6—60   | 25   |
| Mn      | 293,31                  | 0,07                             | 0,2—60   | 15   |
| Zr      | 327,30                  | 0,27                             | 0,2—60   | 20   |
| Cr      | 284,32                  | 0,05                             | 0,2—60   | 14   |
| Sn      | 283,99                  | 0,05                             | 0,2—60   | 17   |
| Ni      | 305,08                  | 0,05                             | 0,2—60   | 20   |
| Ti      | 324,20                  | 0,03                             | 0,2—60   | 16   |
| Co      | 345,35                  | 0,03                             | 0,2—60   | 16   |
| Pb      | 283,31                  | 0,02                             | 0,06—60  | 17   |
| No      | 317,03                  | 0,02                             | 0,06—60  | 18   |
| V       | 318,54                  | 0,02                             | 0,06—60  | 18   |
| Cu      | 324,75                  | 0,008                            | 0,02—20  | 12   |

40 см<sup>2</sup>, применяющемся в ГМС, существенно выше предела обнаружения, то порог чувствительности методики определяется «фоном» фильтра.

В табл. 4 в качестве примера приведены предел обнаружения микроэлементов, фон фильтра и порог чувствительности методики, обусловленный фоном фильтров.

При номинальном расходе воздуха 200 л/мин, обеспечиваемом стандартными аспираторами на сети ГМС и продолжительности отбора проб 20 мин с учетом фона фильтров (табл. 4) предельная концентрация микропримесей, определяемая с помощью данной методики, на несколько порядков ниже ПДК. Этого вполне достаточно для контроля загрязнения промышленных городов. При условии применения чистых фильтров пороговая чувствительность определения ряда элементов может быть повышена на 1—2 порядка.

Разработанная методика, учитывающая отмеченные особенности, прошла испытания в спектральных лабораториях УГМС Грузинской и Казахской ССР, а также в Вильнюсе при анализе атмосферной пыли в ряде городов (Тбилиси, Алма-Ата, Вильнюс и Запорожье). По результатам испытаний была уточнена методика

Содержание микропримесей в «чистых фильтрах» и порог чувствительности

| Характеристика   | Элемент |      |       |      |       |      |      |      |      |       |       |       |       |      |
|--|---------|------|-------|------|-------|------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|------|
|  | Mn      | Ni   | Ti    | V    | Cr    | Zr   | Ba   | Pb   | Cd   | Sn    | Mo    | Co    | Cu    | Bi   |
| Предел обнаружения элемента, мкг . . . . .                 | 0,07    | 0,05 | 0,03  | 0,02 | 0,05  | 0,07 | 0,10 | 0,02 | 0,10 | 0,05  | 0,02  | 0,03  | 0,008 | 0,10 |
| Фон от чистого фильтра, мкг . . . . .                      | 0,13    | 0,40 | 0,05  | 0,07 | 0,13  | —    | —    | 0,05 | —    | 0,01  | 0,01  | —     | —     | —    |
| Погрешность определения фона $\pm 3\sigma$ , мкг . . . . . | 0,06    | 0,24 | 0,02  | 0,04 | 0,05  | —    | —    | 0,03 | —    | 0,005 | 0,005 | —     | —     | —    |
| Порог чувствительности на фильтре, мкг . . . . .           | 0,19    | 0,64 | 0,07  | 0,11 | 0,18  | 0,07 | 0,10 | 0,08 | 0,10 | 0,05  | 0,02  | 0,03  | 0,008 | 0,10 |
| Порог чувствительности, мкг/м <sup>3</sup> . . . . .       | 0,016   | 0,06 | 0,005 | 0,01 | 0,013 | 0,02 | 0,03 | 0,02 | 0,03 | 0,013 | 0,005 | 0,008 | 0,002 | 0,03 |

и составлена «Инструкция по определению металлов в разовых пробах атмосферного воздуха методом эмиссионного спектрального анализа».

В основу этой методики положены: а) прямой анализ 1/12 части фильтра с пылью, который растворяется изоамилацетатом на торце электрода (способ А), предназначенный для предварительной оценки содержания металлов в пробе; б) анализ пробы после предварительной ее подготовки путем комбинированного озоления (способ Б).

Таблица 5

Результаты спектрального анализа разовых проб атмосферной пыли в Тбилиси (пункт 4). 1973 г.

| Элемент                 | I VIII      |      |      | 2 VIII |      |      |
|-------------------------|-------------|------|------|--------|------|------|
|                         | Время, часы |      |      |        |      |      |
|                         | 16          | 19   | 22   | 7      | 10   | 13   |
| Пыль, мг/м <sup>3</sup> | 0,2         | 0,3  | 0,2  | 0,3    | 0,2  | 0,2  |
| Pb мкг/м <sup>3</sup>   | 0,18        | 0,66 | 0,27 | 0,03   | 0,07 | 0,38 |
| Sn                      | 0,06        | 0,01 | 0    | 0      | 0    | 0,01 |
| Mn                      | 0,21        | 2,06 | 2,05 | 0,21   | 0,47 | 1,47 |
| Ni                      | 0,16        | 0,32 | 0    | 0      | 0,17 | 0,16 |
| Mo                      | 0           | 0,06 | 0    | 0      | 0    | 0    |
| V                       | 0,22        | 0,13 | 0,32 | 0      | 0,05 | 0,16 |
| Ti                      | 0,53        | 1,52 | 0,81 | 0      | 0,46 | 0,31 |
| Sr                      | 0,03        | 0,28 | 0    | 0      | 0,03 | 0,05 |
| Ba                      | 0,45        | 0,13 | 0    | 0      | 0,62 | 0,42 |

Некоторые результаты анализа образцов атмосферной пыли в Тбилиси приведены в табл. 5.

Из анализа данных табл. 5 следует, что суточный ход концентрации микроэлементов не соответствует суточному ходу концентраций пыли, а такие элементы, как Sr, Bi, Cd и Co вовсе не были обнаружены. Причины такого несоответствия должны выясняться при дальнейших исследованиях.

Принципиальная особенность настоящей методики, которая отличает ее от существующих методов, заключается в возможности использования малой навески и, что наиболее важно, возможности проведения количественных определений из навесок различной массы.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Александров Н. Н. и др. Спектральный метод определения ряда элементов в атмосферных аэрозолях. — «Тр. ГГО», 1968, вып. 234, с. 196—204.
2. Александров Н. Н. и др. Спектральный метод определения состава атмосферной пыли. — «Тр. ГГО», 1974, вып. 314, с. 104—113.

3. Соловьева Т. В., Хрусталева В. А. Руководство по методам определения вредных веществ в атмосферном воздухе. М., «Медицина», 1974. 300 с.
4. Бурцев И. И. и др. Методика определения содержания свинца в атмосферном воздухе и осадках.— В кн.: Защита атмосферы от загрязнения. Вып. 2. Методы определения загрязнений атмосферы. Вильнюс, Изд. АН Лит. ССР, с. 40—43.
5. Быховская М. С. Гинзбург С. Л., Халилова О. Д. Методы определения вредных веществ в воздухе. М., «Медицина», 1966. 595 с.
6. Виноградов А. Н. Технический прогресс и защита биосферы.— «Вестник АН СССР», 1973, № 9, с. 7—15.
7. Дунаевская Л. В. Биофизические аспекты загрязнения биосферы. М., «Наука», 1973, с. 54—67.
8. Жигаловская Т. Н., Шилина А. И. Способ подготовки проб пыли для спектрального анализа микроэлементов в аэрозолях.— Авторское свидетельство № 373574. Бюлл. открытий, изобрет., промышл. образцов и товарных знаков, 1973, № 14.
9. Зильберман Е. Н. Получение и свойства поливинилхлорида, М., «Химия», 1968. 472 с.
10. Volchok H. L., Bogen D. C. Atmospheric trace metal studies, Progress in analytical chemistry. Vol. 5. Chemical analysis of the environment and other modern techniques, New-York-London, 1973, p. 546.
11. Loha K., Rolle W. Zur Ausbreitung von Schadstoffen in der Atmosphäre and einigen Voraussetzungen für dabei mögliche chemische Reaktionen.— „Chemischen Technology“, 1973, 25, 12, 713—718.
12. Frigieri P. Analisi spectroscopica di elementi presenti nel pulviscolo atmosferico.— „La chimica e l'industria“, 1972, t. 54, p. 12—17.
13. Pierce J. O., Meier J. H. Technical note sampling and analysis consideration in evaluating levels of atmospheric lead Atmospheric environment.— „Pergamon Press“, 1971, 5, 9, p. 811—813.
14. Hoshler M. E., Kanabroski E. L., Moore C. E. The determination of Ca, Mg, Cu and Fe in airborne particulates over Chicago Metropolitan area.— „Appl. spectroscopy“, 1972, v. 27, p. 185—188.
15. Kometani T. Y., Bove J. V., Natanson B., Siebenberg S., Magyar M. Dry ashing of airborne particulate matter on paper and glass fiber filter for trace metal analysis.— „Environmental science and technology“, 1972, v. 6, p. 617—620.

А. М. Царев

## К ВОПРОСУ О ВЛИЯНИИ ГОРОДА НА РЕЖИМ ТУМАНОВ

Известно, что туманы наносят значительный экономический ущерб народному хозяйству. Развитие промышленности и связанное с ним загрязнение воздушного бассейна оказывает существенное влияние на метеорологический режим городов и в частности на режим туманов.

В данной статье рассматриваются некоторые характеристики туманов на примере городов Ленинграда и Москвы и двух ближайших загородных станций. Для этой цели использованы материалы наблюдений на парах метеорологических станций Ленинград (город) — Воейково за период с 1946 по 1974 г. и Москва (ГМО) —

Таблица 1

Среднегодовое количество дней с туманом

| Пункт наблюдения | Годы      |           |           |           |           |           |
|------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
|                  | 1946—1950 | 1951—1955 | 1956—1960 | 1961—1965 | 1966—1970 | 1971—1974 |
| Ленинград        | 30,2      | 25,2      | 29,4      | 19,2      | 17,8      | 15,0      |
| Воейково         | 71,5      | 68,4      | 59,6      | 54,6      | 49,4      | 45,5      |
| Москва           | 32,3      | 24,6      | 16,8      | 9,8       | 11,6      | 5,8       |
| Подмосковная     | 22,0      | 23,8      | 29,0      | 36,8      | 27,2      | 17,7      |

Подмосковная за период с 1948 по 1974 г. При этом станции выбирались таким образом, чтобы одна из них располагалась на территории города, а другая за городом, но на таком расстоянии друг от друга, чтобы обе станции находились под влиянием одних и тех же синоптических процессов.

Часто в городе воздух суше и теплее [3] и, следовательно, туманы, должны наблюдаться реже, чем в сельской местности. Но вследствие загрязнения воздуха промышленными выбросами наблюдается обратное явление [6, 7, 8]. В табл. 1 приведено среднее за год число дней с туманами для выбранных пар станций, полученное по архивным материалам (таблицы ТМ-1).

Из табл. 1 видно, что несмотря на рост темпов валовой продукции (промышленного потенциала города) и числа жителей, наблюдается уменьшение числа дней с туманом. Из таблицы также следует, что на загородных станциях число дней с туманом, как правило, выше чем в городе. Безусловно, на повторяемость туманов большое влияние оказывает местоположение станции, ее высота, формы рельефа и ряд других факторов. Возможно этим обусловлено, что в Воейково число дней с туманом за рассматриваемый период выше, чем в Ленинграде, в то время как для второй пары станций в отдельные периоды в городе дней с туманами наблюдалось больше, чем за городом. Подтверждением сказанного предположения могут служить данные опубликованные в работе [5]. Они

Т а б л и ц а 2  
Среднегодовое число дней с туманами  
за период 1946—1950 гг.

| Пункт                  | Число дней с туманом |               |        |
|------------------------|----------------------|---------------|--------|
|                        | Холодный период      | Теплый период | За год |
| Ленинград . . . . .    | 18,8                 | 11,4          | 30,2   |
| Тихвин . . . . .       | 15,2                 | 23,0          | 38,2   |
| Новая Ладога . . . . . | 26,0                 | 20,6          | 46,6   |
| Осьмино . . . . .      | 18,6                 | 28,2          | 46,8   |
| Кингисепп . . . . .    | 21,8                 | 31,6          | 53,4   |
| Будогощь . . . . .     | 20,4                 | 33,8          | 54,2   |
| Белогорка . . . . .    | 32,0                 | 25,0          | 57,0   |
| Токсово . . . . .      | 40,4                 | 26,2          | 66,6   |
| Воейково . . . . .     | 38,8                 | 32,4          | 71,2   |
| Колтуши . . . . .      | 33,3                 | 38,3          | 71,4   |
| Рощино . . . . .       | 49,2                 | 30,6          | 79,8   |

частично приведены в табл. 2. Для Ленинграда и 10 станций, расположенных на расстоянии до 200—250 км от города, приведено среднее число дней с туманом за год и отдельно для теплого и холодного периода.

Среди приведенных пунктов имеются как поселки, так и небольшие города. Однако среднее число дней с туманом в Ленинграде ниже, чем на любой из приведенных станций. Исключение составляют только Осьмино и Тихвин, для которых в холодный период число дней с туманом оказалось несколько ниже, чем в городе.

Какими же причинами можно объяснить уменьшение числа дней с туманами в городах Ленинграде и Москве? Возможно это свя-

зано с климатическими факторами или обусловлено теми мерами, которые принимаются для улучшения состояния городского воздуха (централизация отопления, перевод на газовое топливо и др.). Так, в [2] было отмечено, что замена жидкого топлива на газ приводит к заметному снижению числа дней с туманами в городе. В Ленинграде и Москве за рассматриваемый период был проведен большой ряд мероприятий в области охраны внешней среды. Они несомненно должны были привести к оздоровлению воздушного бассейна города и в свою очередь оказать влияние на метеорологический режим и, в частности, на повторяемость туманов.

При изучении связи туманов с загрязнением воздушного бассейна чаще рассматривается горизонтальная видимость в туманах.

Известно, что уже само наличие тумана приводит к тому, что в его каплях концентрируется не только та примесь, которая находится вблизи подстилающей поверхности, но также значительная часть примеси из вышележащих и наиболее загрязненных слоев воздуха [1]. Таким образом, чем выше верхняя граница тумана, тем из большего слоя воздуха происходит аккумуляция примеси. Фактический материал о вертикальной протяженности тумана мало. Поэтому мы воспользовались той характеристикой, которая имеется в Наставлении. Туманы принято рассматривать как просвечивающие ( $\equiv$ ) и плотные  $\equiv$ [4].

Таблица 3

Повторяемость (число дней) плотных и просвечивающих туманов по годам

| Год  | Москва   |          | Подмосковная |          | Год  | Москва   |          | Подмосковная |          | Год  | Москва   |          | Подмосковная |          |
|------|----------|----------|--------------|----------|------|----------|----------|--------------|----------|------|----------|----------|--------------|----------|
|      | $\equiv$ | $\equiv$ | $\equiv$     | $\equiv$ |      | $\equiv$ | $\equiv$ | $\equiv$     | $\equiv$ |      | $\equiv$ | $\equiv$ | $\equiv$     | $\equiv$ |
| 1948 | 26       | 14       | 7            | 7        | 1957 | 11       | 3        | 10           | 19       | 1966 | 16       | 3        | 36           | 14       |
| 1949 | 11       | 15       | 8            | 24       | 1958 | 14       | 3        | 16           | 10       | 1967 | 8        | 2        | 29           | 4        |
| 1950 | 26       | 6        | 20           | 5        | 1959 | 8        | 1        | 13           | 13       | 1968 | 10       | 1        | 19           | 4        |
| 1951 | 27       | 5        | 24           | 14       | 1960 | 20       | 2        | 43           | 16       | 1969 | 5        | 3        | 14           | 3        |
| 1952 | 29       | 4        | 20           | 8        | 1961 | 8        | 1        | 39           | 19       | 1970 | 10       | 2        | 13           | 8        |
| 1953 | 20       | 5        | 14           | 11       | 1962 | 9        | 1        | 36           | 14       | 1971 | 9        | 0        | 8            | 4        |
| 1954 | 15       | 12       | 10           | 6        | 1963 | 10       | 1        | 29           | 4        | 1972 | 4        | 0        | 7            | 8        |
| 1955 | 19       | 4        | 21           | 2        | 1964 | 12       | 0        | 19           | 4        | 1973 | 6        | 0        | 13           | 1        |
| 1956 | 19       | 11       | 9            | 7        | 1965 | 7        | 0        | 14           | 3        | 1974 | 4        | 0        | 4            | 29       |

Те и другие имеют одинаковое ограничение горизонтальной видимости, но первые в отличие от вторых предполагают, что сквозь них видно небо или облака, находящиеся над наблюдателем. Эта характеристика является чисто качественной, но тем не менее характеризующей вертикальную мощность слоя тумана. Отсюда естественно предположить, что просвечивающий туман будет более опасен при низких источниках выброса, а плотный одинаково опасен как при низких, так и при высоких выбросах примеси. Ниже мы рассмотрим повторяемость плотных и просвечивающих туманов в городе и за городом.

В табл. 3 приведено число дней с плотными и просвечивающими туманами по годам для станций Москва (ГМО) и Подмосковная, взятое из таблиц ТМ-1. Из данных таблицы видно, что в городе преимущественно наблюдаются плотные туманы; в то время как за городом число дней с плотными туманами в отдельные годы меньше, чем с просвечивающими.

Вероятно условия города препятствуют возникновению в первую очередь просвечивающих туманов. Туманы большего вертикального

развития и достаточной горизонтальной протяженности могут только ослабляться на начальной стадии их возникновения. Именно этим, наверно, можно объяснить довольно низкую повторяемость просвечивающих туманов в Москве.

Рассмотрим повторяемость плотных и просвечивающих туманов за теплое и холодное полугодие (табл. 4). Из анализа таблицы следует, что для городских станций характерной является высокая повторяемость числа дней с туманами в холодное полугодие.

Это относится как к плотным, так и просвечивающим туманам. На загородных станциях в холодный период наблюдаются преимущественно плотные туманы, а в теплый — просвечивающие. Так,

Таблица 4

Повторяемость (%) числа дней с плотными и просвечивающими туманами в холодное и теплое полугодия за период 1946—74 гг.

| Пункт                  | Плотные туманы |       | Просвечивающие туманы |       |
|------------------------|----------------|-------|-----------------------|-------|
|                        | X—III          | IV—IX | X—III                 | IV—IX |
| Ленинград . . . . .    | 69             | 31    | 67                    | 33    |
| Воейково . . . . .     | 59             | 41    | 41                    | 59    |
| Москва . . . . .       | 82             | 18    | 80                    | 20    |
| Подмосковная . . . . . | 53             | 47    | 32                    | 68    |

в Ленинграде в холодное полугодие отмечено около 70% случаев плотных и просвечивающих туманов, в то время как в Воейково за этот же период их количество достигает 59 и 41% соответственно. Для Москвы, расположенной в условиях более континентального климата, это явление проявляется еще более отчетливо и повторяемость дней с плотными и просвечивающими туманами в городе в холодное полугодие достигает 80%.

Влияние города должно сказываться и на суточном ходе туманов. На рис. 1. приведены кривые суточного хода плотных и просвечивающих туманов для Ленинграда и Воейкова, построенные для всего рассматриваемого периода. Из рисунка видно, что на обеих станциях максимальное число просвечивающих, плотных туманов наблюдается в утренние сроки, причем в городе максимум наступает на 2 часа позже, чем за городом. Минимальное число туманов отмечается после 14 часов. Обращает на себя внимание отсутствие четко выраженного минимума в городе. Особенностью города является то, что днем здесь просвечивающих туманов больше, чем за городом.

На рис. 2 показано отношение суточного хода плотных и просвечивающих туманов в городе к суточному ходу их за городом за два десятилетия. Видно, что повторяемость плотных туманов в Ле-



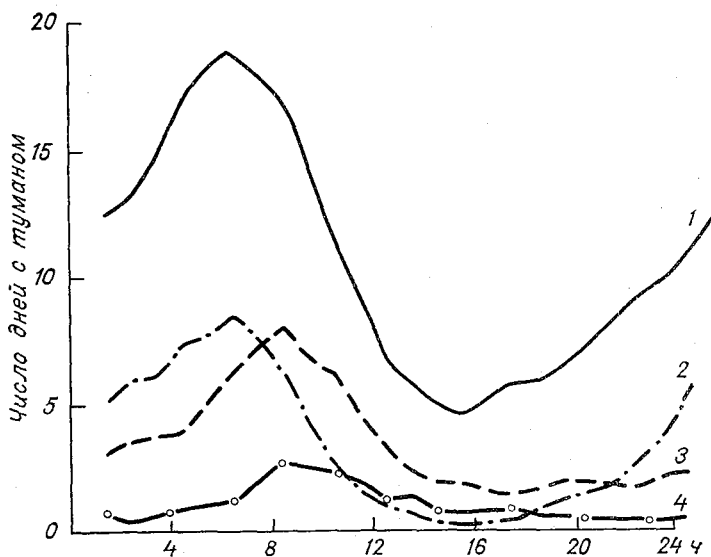


Рис. 1. Суточный ход туманов (среднее за год) в Воейково (1, 2) и в Ленинграде (3, 4).  
1 и 3 — плотные туманы; 2 и 4 — просвечивающие.

нинграде меньше, чем в Воейково, в то время как в Москве в дневное время за период с 1951 по 1960 г. она выше, чем за городом. Повторяемость просвечивающих туманов в дневное время в Москве, так же как и в Ленинграде, превышает повторяемость их за городом. Это связано с тем, что загрязнение воздуха в городе, с одной стороны, препятствует возникновению тумана, но, с другой стороны, уже возникшие туманы могут сохраняться более длительное время.

В последующие годы (1961—1970 гг.) диспропорция в повторяемости туманов в городе и за городом заметно уменьшается. В Москве повторяемость плотных туманов становится меньше, чем за городом, а для просвечивающих она достигает значений, сравнимых со значениями на ст. Подмосковная. В Ленинграде же повторяемость более чем в 2 раза выше, чем в Воейково.

В связи с заметным уменьшением в последние годы числа дней с туманом была рассмотрена отдельно продолжительность плотных и просвечивающих туманов по трем десятилетиям для Ленинграда и Воейкова в процентах от общей продолжительности тумана (табл. 5). Возможные изменения режима туманов под влиянием климатического фактора на каждой паре станций должны проявляться одинаково. Местные же условия могут только усилить или уменьшать степень изменчивости числа дней с туманами и, следовательно, общий ход на каждой паре станций должен быть одинаков.

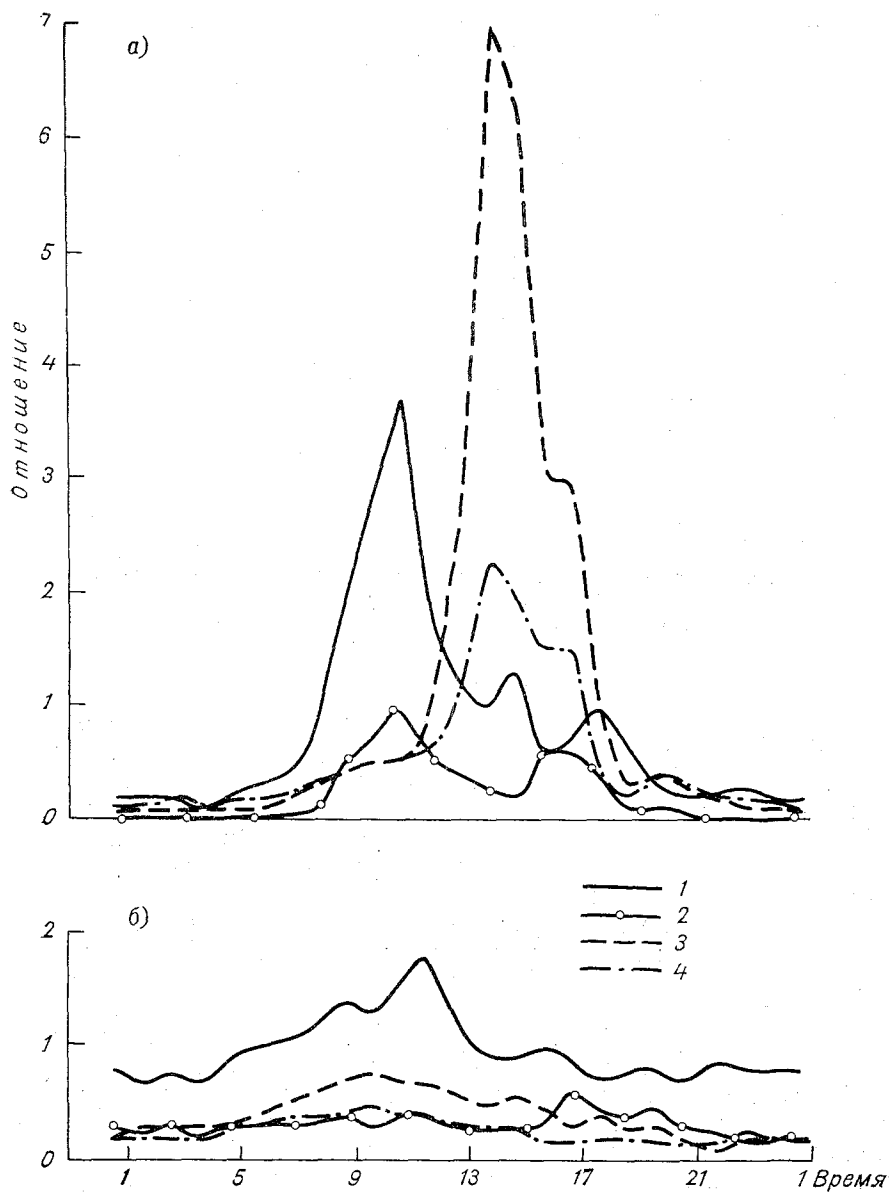


Рис. 2. Отношение суточного хода просвечивающих (а) и плотных (б) туманов в городе к их суточному ходу за городом в Москве (1, 2) и в Ленинграде (3, 4).  
1 и 3) 1951—1960 гг., 2 и 4) 1961—1970 гг.

Таблица 5

## Повторяемость (в %) плотных и просвечивающих туманов по периодам

| Пункт     | Тип тумана     | Периоды наблюдения, годы |               |               |
|-----------|----------------|--------------------------|---------------|---------------|
|           |                | 1946—<br>1955            | 1956—<br>1965 | 1966—<br>1974 |
| Ленинград | Просвечивающий | 30                       | 14            | 16            |
|           | Плотный        | 70                       | 86            | 84            |
| Воейково  | Просвечивающий | 22                       | 20            | 28            |
|           | Плотный        | 78                       | 80            | 72            |

Из данных табл. 5 следует, что для ст. Воейково процентное отношение продолжительности плотных и просвечивающих туманов в каждом десятилетии практически не менялось. В Ленинграде за этот же период продолжительность плотных туманов увеличилась на 16%, а просвечивающих уменьшилось почти в 2 раза.

Полученные результаты позволяют сделать вывод, что город оказывает значительное влияние на метеорологический режим, в том числе и на режим туманов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Берлянд М. Е. Современные проблемы атмосферной диффузии и загрязнения атмосферы. Л., Гидрометеониздат, 1975. 448 с.
2. Годев Н., Кандъов И. Метеорологични и неметеорологични фактори, влияещи върху режима на мъглите над София. — «Хидрол. и метеорол.», 1972, 21, № 2, с. 23—30.
3. Крайцер П. А. Климат города. М., Изд. иностр. лит., 1958. 240 с.
4. Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. Вып. 3, ч. 1. Л., Гидрометеониздат, 1958. 223 с.
5. Осипова Г. И. Особенности территориального и временного распределения туманов на северо-западе Европейской территории СССР. — «Тр. ГГО», 1957, вып. 71, с. 209—228.
6. Jenkins J. Decrease in the Frequency of — for in central London.—, «Meteorol. Mag.», 1971, 100, N 1192, p. 317—322.
7. Landsberg H. E. The climate of towns. Man's role in changing the face of the earth Univ. Chicago Press., 1956.
8. Tschirhart C. Caractéristiques physiques generaleres des blouillards.— „Monogr. Meteorol. hat.», 1974, N 92, 48 p.

## СОДЕРЖАНИЕ

|  |     |
|--|-----|
| М. Е. Берлянд, Е. Л. Генихович, Р. И. Оникул. К нормированию выбросов от наземных источников   | 3   |
| М. Е. Берлянд, Е. Л. Генихович, М. Н. Зашихин, Р. И. Оникул. К оценке опасных скоростей ветра для высоких источников   | 13  |
| М. Е. Берлянд, Р. И. Оникул. К проверке и сопоставлению методов расчета рассеивания примесей   | 23  |
| Е. Л. Генихович, С. С. Чичерин. К сравнению результатов расчета вертикальных распределений концентрации примеси с данными измерений  | 37  |
| Б. Б. Горошко, Л. Р. Сонькин. Вопросы организации работ по защите атмосферы от загрязнения в периоды неблагоприятных метеоусловий  | 41  |
| Р. А. Першина, Л. Р. Сонькин. Возможности прогнозирования загрязнения воздуха в городе методом линейного регрессионного анализа  | 47  |
| В. А. Храпаченко. Вопросы прогнозирования загрязнения воздуха в летний сезон   | 52  |
| В. В. Клинго. К скорости образования озона при фотохимическом смоге в атмосферном воздухе  | 59  |
| А. Н. Андрианов, Б. Б. Горошко, Б. Н. Пьянцев. Некоторые особенности распределения вредных примесей от промышленных центров  | 67  |
| А. С. Зайцев, И. А. Янковский. К вопросу о стандартизации правил контроля показателей качества воздуха населенных пунктов  | 74  |
| И. В. Васильченко. Способ расчета коэффициента турбулентности в пограничном слое атмосферы по вертикальному профилю ветра  | 79  |
| Э. Ю. Безуглая, Е. В. Виноградова, Л. И. Елекоева, Б. Н. Жабарова, В. Ф. Лебедева, Е. А. Разбегаева, Г. Б. Захарова, К. Э. Церфас. Инверсии температуры над территорией СССР   | 88  |
| Э. Ю. Безуглая, Л. И. Елекоева, С. М. Ермолаева, Е. Л. Криуленко, Л. А. Лаврова, Е. Н. Мелехина. Связь инверсий температуры со скоростью и направлением ветра                  | 101 |
| Е. С. Селезнева. Солевой обмен между атмосферой и океаном по данным о химическом составе атмосферных осадков   | 110 |
| О. П. Петренчук. Оценка коррозионной агрессивности атмосферы в прибрежных районах  | 116 |
| М. А. Беляшова. Некоторые особенности распределения ядер Айткена в прибрежной зоне Балтийского моря  | 122 |
| В. А. Ионин. Концентрация и дисперсный состав аэрозолей на побережье Балтийского моря  | 129 |
| Н. Ш. Вольберг, З. Г. Тульчинская. Определение сернистого газа в полевых условиях с использованием сорбционных трубок  | 134 |
| Н. Н. Александров, А. И. Гунченко, Д. Р. Монаселидзе, Н. А. Паничев. Особенности определения элементарного состава атмосферной пыли методом эмиссионного спектрального анализа | 138 |
| А. М. Царев. К вопросу о влиянии города на режим туманов   | 147 |