

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ СССР
ПО ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИИ
И КОНТРОЛЮ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ

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

Выпуск

450

АТМОСФЕРНАЯ ДИФФУЗИЯ И ЗАГРЯЗНЕНИЕ ВОЗДУХА

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



ЛЕНИНГРАД ГИДРОМЕТЕОИЗДАТ 1982

В сборнике представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований распространения примеси. Приводятся теоретические оценки поля концентрации примеси в условиях сложного рельефа, годового и суточного распределения приземных концентраций, изложены принципы использования закономерностей атмосферной диффузии при прогнозе загрязнения атмосферы и регулировании выбросов. Рассматриваются вопросы учета синоптических и погодных условий при прогнозировании повышенного загрязнения воздуха. Приведена информация о совместных советско-американских экспериментах по изучению закономерностей формирования аэрозолей в естественных условиях и аэродинамическому моделированию загрязнения воздуха в холмистой местности.

Освещаются вопросы организации наблюдений и новые методы для изучения содержания вредных веществ в атмосфере. Излагаются результаты измерения вертикального распределения концентраций и особенности рассеивания тяжелых металлов в воздухе, вблизи промышленных предприятий.

Рассматривается химический состав атмосферных осадков.

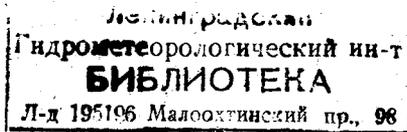
Сборник рассчитан на специалистов, занимающихся вопросами метеорологии, гигиены атмосферного воздуха, вентиляции и газоочистки, физики и химии аэрозолей.

Problems of theoretical and experimental investigations of pollutant turbulent diffusion in the atmosphere are considered. The influence of relief on the pollutant transport is investigated. The results of calculations of pollutant concentrations and their comparison with experimental data are presented.

Information on regularities of noxious pollutant diffusion in the atmosphere, on determination of background concentrations and horizontal transport of pollutants is given. Results of the study of climatic parameters for forecasting and prevention from high air pollution levels.

Pollutant effect on corrosion of metals is investigated. Methods for determination of noxious pollutants in the air as well as chemical composition of atmospheric precipitation and aerosols are described.

The volume may be of value for specialists in the field of meteorology, air pollution control, physics and chemistry of aerosols.



М. Е. Берлянд, Е. Л. Генцихович, И. Г. Грачева

ОСНОВЫ РАСЧЕТА ЗАГРЯЗНЕНИЯ ВОЗДУХА В УСЛОВИЯХ ПЕРЕСЕЧЕННОЙ МЕСТНОСТИ С УЧЕТОМ ТЕРМИЧЕСКОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ

1. Введение

Существующие методы расчета загрязнения воздуха, доведенные до широкого использования в практике, относятся главным образом к случаю сравнительно плоской подстилающей поверхности. В последнее время предпринимаются попытки усовершенствовать эти методы в плане учета реального рельефа местности. Несмотря на значительный рост числа публикаций в ряде стран по этим вопросам ([13]—[18] и др.) конкретных результатов, пригодных для обобщения и использования в практических расчетах, получено сравнительно мало. Во многом это объясняется сложностью изучаемого явления. Такое положение нередко связано с большим разрывом, существующим между чисто теоретическими (или экспериментальными) исследованиями в области изучения структуры воздушного потока и характеристик турбулентности над неоднородной подстилающей поверхностью, с одной стороны, и работами, в которых излагаются конкретные схемы расчета загрязнения воздуха, с другой стороны.

В течение ряда лет в Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова развивается комплексный подход к проблеме учета влияния орографии на атмосферную диффузию. При этом наряду с натурными исследованиями и разработкой методов моделирования в аэродинамических трубах ([1], [7], [9] и др.) значительное внимание уделяется разработке математических моделей и практических схем расчета загрязнения атмосферы в случае сложного рельефа местности ([2], [3], [6] и др.). Выполненные исследования позволили построить номограммы для расчета полей концентрации примеси от одиночного источника, расположенного вблизи изолированного препятствия (холм, впадина, уступ), вытянутого в перпендикулярном ветру направлении [4, 10]. В настоящей статье эти результаты обобщаются на случай термически

неоднородной подстилающей поверхности. Излагается пригодный для инженерных расчетов метод описания рассеивания в случае, когда рельеф местности не удается разделить на отдельные элементарные формы, а также приближенный способ учета трехмерного рельефа в задачах диффузии.

2. Учет термических факторов

Общий метод учета влияния рельефа местности на закономерности атмосферной диффузии изложен в работах [2], [4] и [8]. При этом задача о переносе примеси в пересеченной местности рассматривается как вторичная по отношению к задаче определения поля скоростей и характеристик турбулентности над неоднородной подстилающей поверхностью. Классические методы гидродинамики в данном случае нуждаются в известной модификации, поскольку возникающие на неровности земной поверхности пограничные слои формируются внутри сдвигового потока. В связи с тем, что углы наклона склонов реальной местности достигают $10-30^\circ$ и более, принципиальное значение имеет переход к связанной с подстилающей поверхностью системе координат, в которой уравнения движения могут быть упрощены до уравнений пограничного слоя. Важен также правильный выбор «фонового» потока (начального приближения к искомому полю скоростей, температур и характеристик турбулентности), мало отличающегося от искомого течения.

В качестве привилегированной системы координат будем использовать переменные Бусинеска $q_1 = \varphi$, $q_2 = y$ и $q_3 = \psi$, где φ и ψ — вещественная и мнимая части аналитической функции, осуществляющей конформное отображение области течения на полуплоскость.

После перехода к новым переменным в уравнениях движения, неразрывности и баланса энергии турбулентности выполняются упрощения теории пограничного слоя [3, 8]. Получившиеся уравнения имеют вид:

$$u_1 \frac{\partial u_1}{\partial q_1} + u_3 \frac{\partial u_1}{\partial q_3} + u_1^2 \frac{1}{V} \frac{\partial V}{\partial q_1} = \frac{\partial}{\partial q_3} k \frac{\partial u_1}{\partial q_3} + f \frac{V_\infty}{V^3} u_2 - g \frac{w_n}{V^4} - \frac{1}{\rho V^2} \frac{\partial P}{\partial q_1}; \quad (1)$$

$$\frac{1}{\rho V^2} \frac{\partial P}{\partial q_3} + g \frac{u_n}{V^4} + u_1^2 \frac{1}{V} \frac{\partial V}{\partial q_3} = 0; \quad (2)$$

$$u_1 \frac{\partial b}{\partial q_1} + u_3 \frac{\partial b}{\partial q_3} = \alpha \frac{\partial}{\partial q_3} k \frac{\partial b}{\partial q_3} + k V^2 \left\{ \left(\frac{\partial u_1}{\partial q_3} \right)^2 + \frac{4}{V} \frac{\partial V}{\partial q_3} u_1 \frac{\partial u_1}{\partial q_3} \right\} - \frac{cb^2}{V^2 k}; \quad (3)$$

$$\frac{\partial u_1}{\partial q_1} + \frac{\partial u_3}{\partial q_3} = 0. \quad (4)$$

Здесь ρ и P — плотность и давление воздуха; k — коэффициент турбулентного обмена; $V = (u_{\pi}^2 + \omega_{\pi}^2)^{1/2}$ — модуль скорости потенциального течения, а u_{π} и ω_{π} — ее составляющие вдоль осей q_1 и q_3 ; V_{∞} — значение V на бесконечном удалении от подстилающей поверхности; u_1, u_2, u_3 — компоненты скорости потока вдоль линий тока ($\psi = \text{const}$), вдоль оси y и линий равного потенциала ($\varphi = \text{const}$), нормированные на V ; $f = 2\omega \sin \Phi$ — параметр Кориолиса, $\omega = 7,29 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$ — угловая скорость вращения Земли; Φ — широта места; g — ускорение свободного падения; α и c — константы, принимаемые соответственно равными 0,73 и 0,046. Для того чтобы включить в рассмотрение термические эффекты, проведем аналогичные преобразования в уравнении притока тепла для случая, когда рельеф местности однороден в перпендикулярном ветру направлении. Тогда в безразмерных переменных

$$\xi_1 = \frac{\varphi}{V_{\infty} L} \quad \text{и} \quad \xi_3 = \frac{\psi}{V_{\infty} L} \quad (5)$$

это уравнение будет иметь вид

$$u_1 \frac{\partial \theta}{\partial \xi_1} + u_3 \frac{\partial \theta}{\partial \xi_3} = \frac{\partial}{\partial \xi_3} k \frac{\partial \theta}{\partial \xi_3} + \frac{\partial}{\partial \xi_3} \left(k - \frac{V_{\infty}^2}{V^2} \dot{k} \right) \frac{d\theta}{d\xi_3} - u_3 \frac{d\theta}{d\xi_3}. \quad (6)$$

Здесь θ — отклонение потенциальной температуры Θ от температуры набегающего потока Θ_0 , нормированные на величину $\Delta\Theta_0$ перепада температур на подстилающей поверхности, k и \dot{k} — коэффициенты турбулентности в произвольной точке области и в набегающем потоке, нормированные на $V_{\infty} L$ (L — характерный размер обтекаемого препятствия).

Учет термических эффектов ведет также к появлению в уравнении движения (1) слагаемого

$$\frac{gL\Delta\Theta_0}{V^2} \int_{\xi_3}^{\infty} \frac{\partial}{\partial \xi_1} \left(\frac{\theta}{\Theta_0} \right) d\xi_3.$$

Это выражение можно получить в результате интегрирования уравнения статики (2) с учетом упрощений теории свободной конвекции. В уравнении баланса энергии турбулентности (3) появится

член $\frac{c^{1/2}gL}{VV_{\infty}\Theta_0} k \frac{\partial \theta}{\partial \xi_3}$, описывающий генерацию энергии турбу-

лентности за счет сдвига температуры. Результирующая система будет при этом, кроме (6), включать следующие уравнения:

$$u_1 \frac{\partial u_1}{\partial \xi_1} + u_3 \frac{\partial u_1}{\partial \xi_3} = \frac{\partial}{\partial \xi_3} k \frac{\partial u_1}{\partial \xi_3} + (1 - u_1^2) \frac{1}{V} \frac{\partial V}{\partial \xi_1} -$$

$$- \frac{V_{\infty}^3}{V^3} \frac{d}{d\xi_3} \dot{k} \frac{du_1}{d\xi_3} + \frac{1}{V} \frac{\partial}{\partial \xi_1} \int_{\xi_3}^{\infty} (1 - u_1^2) V \frac{\partial V}{\partial \xi_3} + \frac{\beta L \Delta\Theta_0}{V^2} \int_{\xi_3}^{\infty} \frac{\partial \theta}{\partial \xi_1} d\xi_3;$$

$$\begin{aligned}
 u_1 \frac{\partial b}{\partial \xi_1} + u_3 \frac{\partial b}{\partial \xi_3} &= \alpha \frac{\partial}{\partial \xi_3} k \frac{\partial b}{\partial \xi_3} + c^{1/2} k \left\{ \frac{V^2}{V_\infty^2} \left[\left(\frac{\partial u_1}{\partial \xi_3} \right)^2 + \right. \right. \\
 &+ \left. \left. \frac{4}{V} \frac{\partial V}{\partial \xi_3} u_1 \frac{\partial u_1}{\partial \xi_3} \right] - \frac{\beta L \Delta \theta_0}{V V_\infty} \left(\frac{\partial \theta}{\partial \xi_3} + \frac{\partial \vartheta}{\partial \xi_3} \right) - \frac{V_\infty^2}{V^2} \frac{b^2}{k^2} \right\}; \\
 u_1 \frac{\partial Q}{\partial \xi_1} + u_3 \frac{\partial Q}{\partial \xi_3} &= \frac{\partial}{\partial \xi_3} k \frac{\partial Q}{\partial \xi_3}; \\
 \frac{\partial u_1}{\partial \xi_1} + \frac{\partial u_3}{\partial \xi_3} &= 0,
 \end{aligned} \tag{7}$$

где \dot{u}_1 — распределение u_1 в набегающем потоке, b — энергия турбулентности, нормированная на $c^{-1/2} V_\infty^2$, Q — концентрация примеси от линейного источника, $\beta = \frac{g}{\dot{\theta}}$ — параметр плавучести. Для замыкания (6) — (7) используется, как и в [3], [8], соотношение

$$\frac{\partial k}{\partial \xi_3} - \frac{k}{b} \frac{\partial b}{\partial \xi_3} = \kappa \frac{V_\infty}{V} b^{1/2}, \tag{8}$$

где $\kappa = 0,4$ — постоянная Кармана.

Если рассматривается задача о трансформации в пересеченной местности воздушного потока, набегающего с плоской подстилающей поверхностью, то функции $\dot{u}_1(\xi_3)$ и $\dot{\theta}(\xi_3)$ должны задаваться априори, а распределение с высотой $\dot{b}(\xi_3)$ и $\dot{k}(\xi_3)$ (энергии турбулентности и коэффициента обмена) следует определять как не зависящее от x решение системы (6) — (8) при соответствующих граничных условиях. Для частного случая адиабатического набегающего потока аналитическое решение этой задачи получено в [3] и имеет вид:

при $\xi_3 \leq h$

$$\dot{u}_1 = \frac{v_*}{\kappa} \ln \frac{\xi_3 + \xi_{00}}{\xi_{00}}, \quad \dot{b} = v_*^2, \quad \dot{k} = \kappa v_* (\xi_3 + \xi_{00}); \tag{9}$$

при $\xi_3 > h$

$$\begin{aligned}
 \dot{u}_1 &= 1, \quad \dot{b} = v_*^2 \left[1 + \frac{r-1}{r} \frac{\xi_3 - h}{h + \xi_{00}} \right]^{-\frac{2}{r-1}}, \\
 \dot{k} &= \kappa v_* (h + \xi_{00}) \left[1 + \frac{r-1}{r} \frac{\xi_3 - h}{h + \xi_{00}} \right]^{\frac{r-2}{r-1}};
 \end{aligned} \tag{9'}$$

где

$$v_* = \kappa \left(\ln \frac{h + \xi_{00}}{\xi_{00}} \right)^{-1}, \quad r = \left(\frac{6\kappa^2 \alpha}{\sqrt{c}} \right)^{1/2} \approx 1,8;$$

ξ_{00} , h — нормированные параметр шероховатости и высота приземного слоя. При $\frac{d\dot{\theta}}{d\xi_3} \neq 0$ характеристики набегающего потока мо-

гут быть получены путем численного решения системы (6) — (8) методом стационарирования по ξ_1 .

Для повышения точности определения характеристик течения вблизи подстилающей поверхности в системе уравнений (6) — (9) осуществлялась замена переменных:

$$\xi_1' = \xi_1; \quad \xi_3' = \int_0^{\xi_3} \frac{d\xi_3}{\bar{k}(\xi_3)}. \quad (10)$$

В качестве иллюстрации изложенной схемы рассмотрим задачу о течении воздушного потока в окрестности одиночного препятствия (холма или впадины), задаваемого конформным отображением [8] полуплоскости $\tau = \frac{1}{L}(\varphi + i\psi)$ на физическую область течения $t = \frac{1}{L}(x + iz)$:

$$t = \tau + \frac{\lambda}{\pi} \left[\ln \frac{d - \tau}{d + \tau} + p(\tau) \ln \frac{1 + d - \tau}{d - \tau} - p(-\tau) \ln \frac{1 + d - \tau}{d + \tau} + 24\gamma\tau^3 + (6\gamma^3 - 9\gamma)\tau \right], \quad (11)$$

где $p(\tau) = 1 + 10(d - \tau)^3 + 15(d - \tau)^4 + 6(d - \tau)^5$, $\gamma = 2d + 1$, L характеризует потоковую протяженность бокового склона препятствия, λ — безразмерная высота холма (при $\lambda > 0$) или глубина впадины (при $\lambda < 0$), d — безразмерная протяженность средней плоской части.

Система уравнений (6) — (8) решалась численно на ЭВМ БЭСМ-6 методом сеток. Вычисления производились для холма с параметрами: $\lambda = 0,2$, $d = 0,5$, $\xi_{00} = 0,2 \cdot 10^{-4}$, $h = 0,3$. Полученные результаты приведены на рис. 1. Символом « \sim » обозначены относительные характеристики течения на фиксированном уровне Δ над подстилающей поверхностью

$$\hat{v} = \frac{v_{x_1}(\bar{x}_1, h(\bar{x}_1) + \Delta)}{\hat{v}_{x_1}(\Delta)}; \quad \hat{b} = \frac{b_{x_1}(\bar{x}_1, h(\bar{x}_1) + \Delta)}{\hat{b}_{x_1}(\Delta)}; \quad \hat{k} = \frac{k_{x_1}(\bar{x}_1, h(\bar{x}_1) + \Delta)}{\hat{k}_{x_1}(\Delta)}. \quad (12)$$

Здесь $\bar{x}_1 = \frac{x_1}{L}$. Таким образом, \hat{v} , \hat{b} , \hat{k} характеризуют отношение соответствующей величины на фиксированной высоте Δ над холмом к ее значению в набегающем потоке на той же высоте.

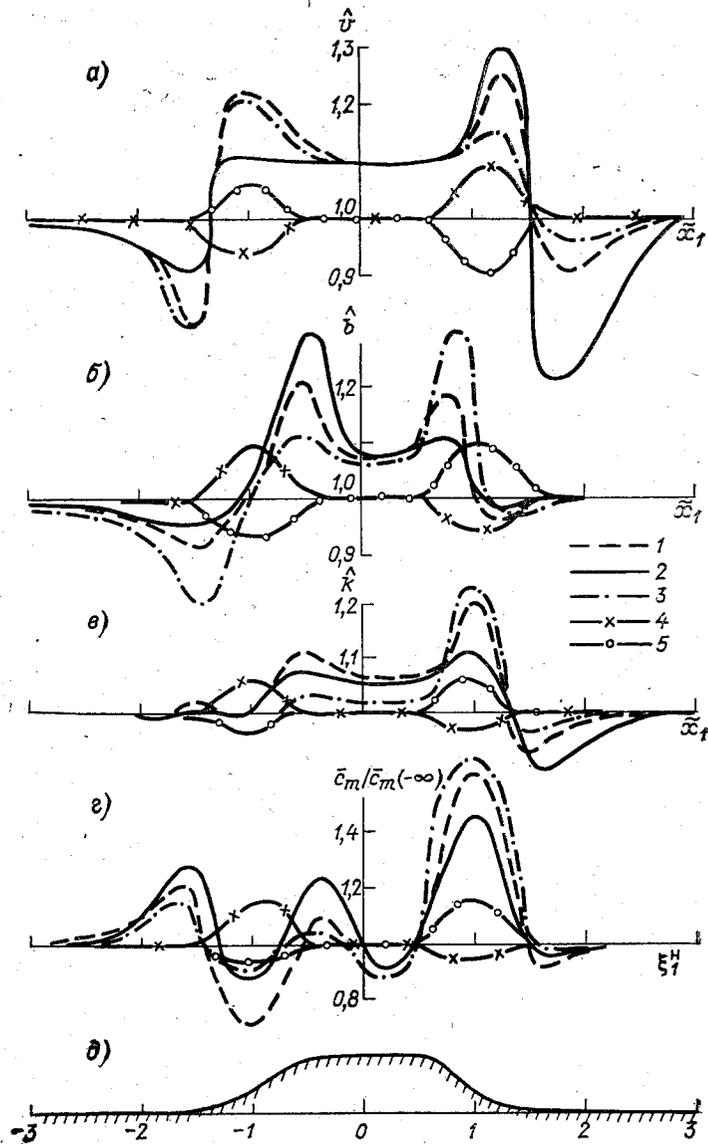


Рис. 1. Распределение над термически неоднородной искривленной подстилающей поверхностью относительных скоростей (а), энергии турбулентности (б), коэффициента обмена (в), зависимость $\bar{c}_m/\bar{c}_m(-\infty)$ от положения источника (г) в различных участках рельефа (д).

| | | | | | |
|---------------------|-----|-----|-----|---|----|
| Кривая | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| λ | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0 | 0 |
| S | 0 | 1 | -1 | 1 | -1 |

При расчете поля температуры использовалось граничное условие

$$\begin{aligned} \theta|_{\xi_3=0} &= S \cdot f(\xi_1), \text{ где } f(\xi_1) = \\ &= \begin{cases} 0 & \text{при } \xi_1 < -1,5, \quad -0,5 \leq \xi_1 < 0,5, \quad \xi_1 \geq 1,5 \\ 1 & \text{при } -1,5 \leq \xi_1 < -0,5 \\ -1 & \text{при } 0,5 \leq \xi_1 < 1,5 \end{cases} \end{aligned} \quad (13)$$

Параметр S выбирался равным $+1$, что соответствует положительному перегреву наветренного склона и отрицательному — подветренного, и -1 , что соответствует обратному распределению температуры. Граничные условия для остальных характеристик потока были выбраны в обычном виде [4, 8]:

при $\xi_3 = 0$

$$\begin{aligned} u_1 = u_3 = 0; \quad k \frac{\partial b}{\partial \xi_3} = k \frac{\partial Q}{\partial \xi_3} = 0; \\ k = \kappa_{\xi_{30}} \frac{V_{\infty}}{V} b^{1/2}; \end{aligned} \quad (14)$$

при $\xi_3 \rightarrow \infty$

$$u_1 \rightarrow \dot{u}_1; \quad b \rightarrow \dot{b}; \quad Q \rightarrow 0. \quad (14')$$

Результаты расчетов приведены на рис. 1. Из рисунка видно, что в области перед холмом поток несколько тормозится ($\hat{v} < 1$), затем на наветренном склоне отношение становится больше единицы (область разгона). На верхнем плато поток снова начинает тормозиться, а при $\hat{x}_1 > 0$, отношение \hat{v} снова возрастает. На обратном склоне происходит торможение потока, а затем, при удалении от холма, — постепенный разгон (затухание возмущения). Включение термических эффектов несколько изменяет эту картину. В случае когда наветренный склон теплее, а подветренный — холоднее, торможение и ускорение потока в передней части холма существенно меньше, так как над нагретым участком наблюдается падение температуры с высотой (неустойчивая стратификация). Это приводит к усилению турбулентного обмена, в результате чего амплитуды изменения скорости несколько уменьшаются. В районе начала подветренного склона и в конце его амплитуды изменения \hat{v} возрастают, так как здесь наблюдается инверсия температуры, которая способствует затуханию турбулентности. Чтобы исследовать влияние только термического фактора, рассматривались случаи с ровной термически неоднородной границей. Если при этом вначале поток натекает на теплый участок, а затем на холодный (кривая 4), то сначала отмечается незначительное торможение, а над холодным участком — разгон. При $S = -1$ (кривая 5) имеет место обратная картина: сначала отношение \hat{v} увеличивается, затем уменьшается над нагретым участком.

Сопоставление кривых для $\hat{v}(\Delta)$ и $\hat{b}(\Delta)$ показывает, что поведение энергии турбулентности сходно с поведением скорости ветра. Действительно, вблизи границы градиенты скорости велики там, где велики сами скорости, так что значение трансформационного слагаемого в уравнении баланса в значительной степени определяется скоростью ветра. Характер изменения \hat{k} в основном определяется поведением масштаба турбулентности (l), так как $k = l\sqrt{b}$. Как видно из рис. 1 *в*, зона торможения перед препятствием, начало верхнего плато и в особенности подветренный склон — это области усиления турбулентного обмена. Над нагретыми участками наблюдается увеличение \hat{k} , так как в этом случае при сильно развитой турбулентности увеличивается как энергия турбулентности, так и масштаб вихрей. Над холодными участками создаются устойчиво стратифицированные слои и турбулентный обмен уменьшается.

На рис. 1 *г* приведена зависимость от координаты источника ξ_1^H отношения $\bar{c}_m(\xi_1^H)/\bar{c}_m(-\infty)$ (максимальной наземной концентрации $\bar{c}_m(\xi_1^H)$ от источника, расположенного в точке $(\xi_1^H, 0, \xi_3^H)$, к максимальной наземной концентрации $\bar{c}_m(-\infty)$ от источника, расположенного на той же линии тока $\xi_3 = \xi_3^H$, но на бесконечном удалении от препятствия). Как видно из рисунка, это отношение максимально при размещении источника у конца нагретого подветренного склона ($S = -1$), так как в этом случае эффекты динамической и термической генерации турбулентных вихрей суммируются, приводя к усиленному переносу примеси от источника к подстилающей поверхности. Следует отметить, что увеличение параметра $\frac{\beta L \Delta \theta_0}{v_\infty^2}$, определяющего значение термической неоднородности подстилающей поверхности, приведет к возрастанию роли термических факторов, т. е. к возрастанию влияния препятствия на характер распространения примеси от источника.

3. Расчет распространения примеси в случае трехмерного рельефа местности

Полученные результаты относились к «двумерным» препятствиям, т. е. к препятствиям, однородным в перпендикулярном ветру направлении (длинные холмы — гряды или впадины — ложбины). При этом с точки зрения практического использования наиболее важным является обоснование применимости так называемого метода потенциальных течений. Точнее, в [4] показано, что для пологих двумерных препятствий, высота которых не превышает удвоенной высоты источников выбросов, расчет поля концентрации примеси можно производить на основе решения уравнения диффузии, коэффициенты которого получаются из соответствующих коэффи-

циентов для случая плоской подстилающей поверхности заменой вертикальной координаты z на функцию тока ψ .

В случае когда на подстилающей поверхности могут быть выделены отдельные изолированные двумерные препятствия, учет влияния рельефа выполняется с помощью приведенных в [4] и [10] номограмм. Однако в реальных условиях подстилающая поверхность, как правило, не представляет конгломерат изолированных двумерных препятствий. Тем не менее целесообразно и в этом случае воспользоваться удобным аппаратом потенциальных течений. Такое приближение возможно в случаях, когда отсутствуют ярко выраженные боковые затоки, но в то же время препятствие не является настолько узким, чтобы не искажать воздушный поток. Реализованный в виде программы на ЭВМ БЭСМ-6 алгоритм позволяет для каждого источника примеси и каждого фиксированного направления ветра построить квазиплоский поток, с которым переносится примесь. Исходная информация задается при этом в виде набора высот местности в регулярной сетке точек, получаемых путем оцифровки топографической карты. В алгоритме предусматривается возможность учета таких особенностей рельефа местности путем задания отметок особых точек, не попавших в узлы сетки.

При заданном направлении ветра для каждого источника выбирается направленная по ветру полоса шириной $10H$ (где H — высота источника). Реальный рельеф местности заменяется на некоторый сглаженный, полученный осреднением внутри полосы в поперечном ветру направлении. Затем для области с границей, соответствующей этому сглаженному рельефу, строится конформное отображение на полуплоскость, т. е. определяется функция тока из уравнения Лапласа

$$\Delta\psi = 0. \quad (15)$$

Численное решение (15) в сеточной области производится методом верхней релаксации, причем параметр релаксации выбран таким образом, чтобы обеспечить быструю сходимость к аналитическому решению задачи для кусочно-линейной границы (см. (17)). В тех случаях, когда отметки местности при $x \rightarrow +\infty$ и при $x \rightarrow -\infty$ не одинаковы, используется асимптотика при $|x| + |z| \rightarrow \infty$ решения уравнения Лапласа для случая, когда подстилающая поверхность имеет форму уступа:

$$\psi_a(x, z) = z - h_0/2 [1 + \text{sign}(x)] + \frac{h_0}{\pi} \text{arctg} \frac{z}{x}, \quad (16)$$

где h_0 — разность уровней рельефа при $x = +\infty$ и $x = -\infty$.

Формула (16) получена с помощью исследования поведения при $|t| \rightarrow \infty$ интеграла Кристоффеля—Шварца [19].

$$t = \frac{1}{\alpha_0} \int_{h_0/2}^{\tau} \left(\frac{\tau}{h_0} + \frac{1}{2} \right)^{-\frac{\alpha_0}{\pi}} \left(\frac{\tau}{h_0} - \frac{1}{2} \right)^{\frac{\alpha_0}{\pi}} d\tau + \frac{h_0}{2} \text{ctg} \alpha_0 + i \frac{h_0}{2}, \quad (17)$$

осуществляющего отображение верхней полуплоскости на область с кусочно-линейной границей типа «уступа» (параметр α_0 определяет здесь угол наклона склона). С вычислительной точки зрения вместо функции $\psi(x, z)$ удобнее находить функцию

$$\psi' = \psi - \psi_a. \quad (18)$$

При этом если точка с координатами $(0, 0)$ лежит вне физической области, т. е. ниже границы, то функция ψ_a и, следовательно, $\psi'(x, z)$ удовлетворяет уравнению Лапласа

$$\frac{\partial^2 \psi'}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi'}{\partial z^2} = 0 \quad (19)$$

с граничными условиями:

$$\psi' |_{x \rightarrow \pm \infty} = \psi' |_{z \rightarrow \infty} = 0; \quad \psi' |_{z=f(x)} = -\psi_a(x, f(x)), \quad (20)$$

где $z = f(x)$ — уравнение границы.

Функция $\varphi(x, z)$ определяется из соотношения

$$\varphi(x, z) = \int_{-ll}^x \frac{\partial \psi}{\partial z} dx + \varphi(-ll, z). \quad (21)$$

Здесь ll — достаточно большое расстояние от начала координат, при котором можно для функции $\varphi(x, z)$ воспользоваться ее асимптотикой $\varphi_a(x, z)$, имеющей вид

$$\varphi_a(x, z) = x + \frac{h_0}{2\pi} \ln \frac{x^2 + z^2}{h_0^2}. \quad (22)$$

Расчет рассеивания примеси для модельного рельефа местности (рис. 2) выполняется по формулам, учитывающим начальный подъем факела в соответствии с [4]. Определяются максимальная приземная концентрация $c_{\text{мр}}$ и расстояние от источника до точки, где эта концентрация достигается $x_{\text{мр}}$:

$$\begin{aligned} c_{\text{мр}} &= c_m(\tilde{\omega}_0) \chi \beta_1; \\ x_{\text{мр}} &= x(\varphi_m - \varphi_H, 0); \end{aligned} \quad (23)$$

где

$$\chi = \left(\frac{Hv_\infty}{\psi_H} \right)^{2,3}, \quad \beta_1 = \left(1 - \frac{\ln \chi}{2,3 \ln H/z_0} \right), \quad \tilde{\omega}_0 = \beta_1 \omega_0,$$

$$c_m(\tilde{\omega}_0) = \frac{AFm_p n_p}{H^2 \sqrt[3]{\pi R_0^2 \tilde{\omega}_0 \Delta T}};$$

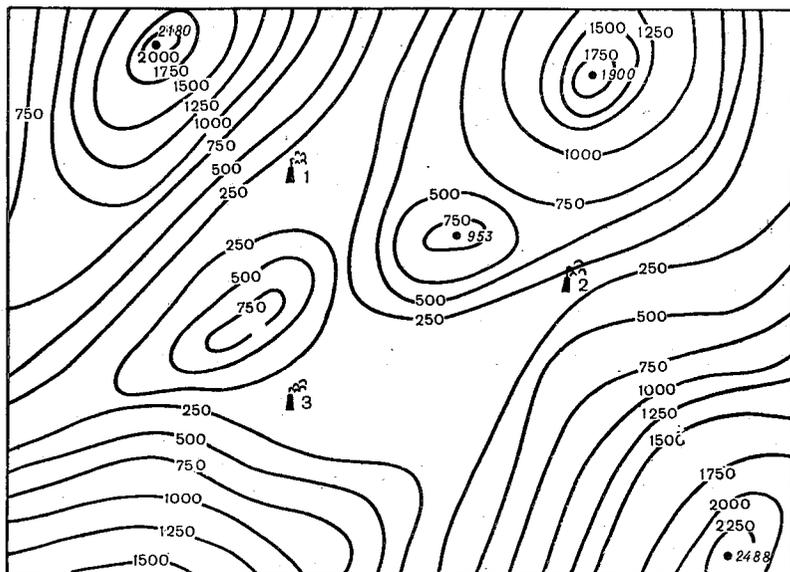


Рис. 2. Рельеф местности, использованной при модельных расчетах.

w_0 , ΔT — скорость и перегрев выходящих газов; R_0 — радиус устья трубы; φ_H , ψ_H — потоковые координаты источника; z_0 — шероховатость подстилающей поверхности; A — коэффициент, учитывающий климатологию диффузионных параметров в рассматриваемой области; F — коэффициент, зависящий от скорости осаждения примеси;

$$m_p = (0,67 + 0,1 \sqrt{f_p} + 0,34 \sqrt[3]{f_p})^{-1};$$

$$n_p = \begin{cases} 3 - \sqrt{(v_{mp} - 0,3)(4,36 - v_{mp})} & \text{при } 0,3 \text{ м/с} \leq v_{mp} \leq 2 \text{ м/с} \\ 3 & \text{при } v_{mp} < 0,3 \text{ м/с} \\ 1 & \text{при } v_{mp} > 2 \text{ м/с;} \end{cases}$$

$$f_p = 10^3 \frac{2R_0 \bar{w}_0^2}{H^2 \Delta T}; \quad v_{mp} = 0,65 \sqrt[3]{\frac{\pi R_0^2 \bar{w}_0 \Delta T}{H}}; \quad \varphi_m = d_p H \beta_1^{-1} \chi^{-0,5};$$

$$d_p = \begin{cases} 4,95 v_{mp} (1 + 0,28 \sqrt[3]{f_p}) & \text{при } v_{mp} \leq 2 \text{ м/с} \\ 7 \sqrt{v_{mp}} (1 + 0,28 \sqrt[3]{f_p}) & \text{при } v_{mp} > 2 \text{ м/с.} \end{cases}$$

Вычисление зависимости c/c_m от x/x_m производится по формулам, полученным для плоской подстилающей поверхности [12] и переписанным в потоковые переменные

$$c_p/c_{mp} = \begin{cases} 3r^4 - 8r^3 + 6r^2 & \text{при } r \leq 1 \\ \frac{1,13}{0,13r^3 + 1} & \text{при } 1 < r \leq 8 \\ \frac{r}{3,58r^2 - 35,2r + 120} & \text{при } r > 8 \end{cases} \quad (24)$$

Здесь $r = \frac{\varphi - \varphi_H}{\varphi_H}$, а φ — потоковое расстояние от источника до точки, где определяется концентрация c_p .

На рис. 3 показаны результаты расчетов осевой приземной концентрации от источника 1 (см. рис. 2) при опасных метеорологических условиях в зависимости от направления ветра, а также соответствующие разрезы местности, полученные после осреднения. При расчетах принимались следующие параметры источника единичной мощности: высота 100 м, диаметр устья дымовой трубы 5 м,

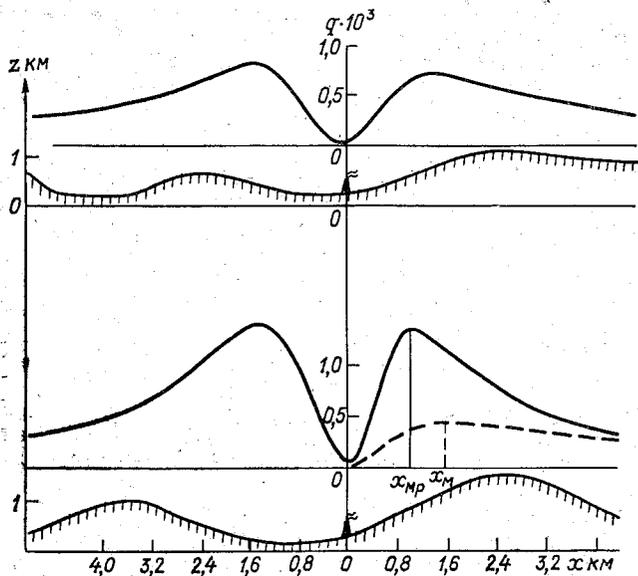


Рис. 3. Распределение приземных осевых концентраций для различных направлений дымового факела.

начальная скорость и перегрев дымовых газов 10 м/с и 100 °С соответственно. Коэффициент A принимался равным 200, что соответствует, например, районам Сибири [12]. На рис. 3 нанесено (пунктир) распределение осевой приземной концентрации для источника с аналогичными параметрами, но расположенного в условиях ровного места. Как видно из этого рисунка, наличие повышенной формы рельефа на некотором удалении от источника, как и следовало ожидать, увеличивает максимум наземной концентрации и приближает его к источнику. Если по мере удаления от источника местность повышается, то это приводит к уменьшению скорости убывания концентрации с расстоянием за точкой максимума. Кроме того, наиболее неблагоприятными являются такие направления ветра, при которых на источник натекает воздушный поток со стороны наиболее высоких и крупных препятствий (так

как относительно этих препятствий источник оказывается расположен во впадине — форме рельефа, приводящей к максимальному поправочному множителю для концентрации [4]).

В случае когда на пересеченной местности расположено несколько источников, изложенный алгоритм позволяет определить суммарное поле концентрации методом суперпозиции полей от отдельных источников. При этом нормирование выбросов должно быть связано с проведением расчетов при различных значениях скорости и направления ветра, а также характеристик турбулентности набегающего потока, после чего в каждой точке должны быть

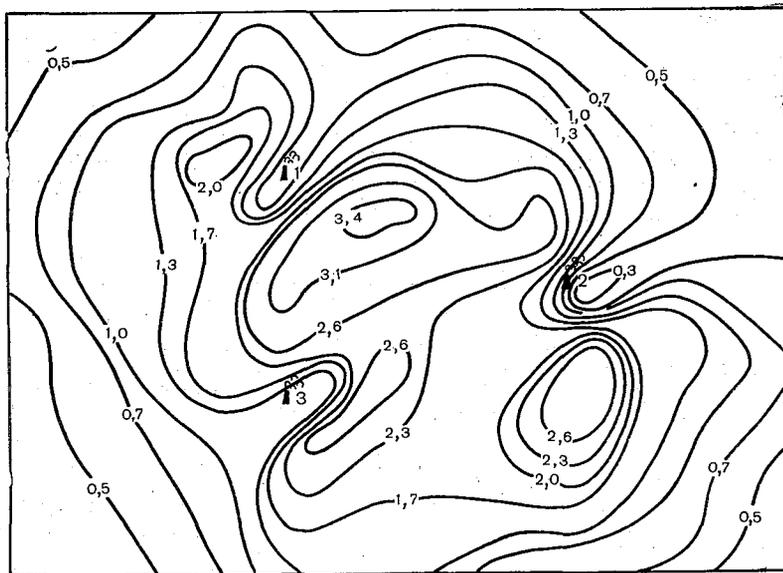


Рис. 4. Мажорантное поле приземных концентраций для случая трех одинаковых источников выброса.

определены максимальные значения концентрации [5]. Для сокращения объема вычислительных работ целесообразно построить поле максимальных концентраций (мажорантное поле) для совокупности источников, расположенных в пересеченной местности. Пример расчета такого поля для случая, когда в пересеченной местности расположено три одинаковых источника выброса, параметры которых совпадают с приведенными выше, показан на рис. 4 (схема расположения источников на местности дана на рис. 2). Изолинии соединяют точки, в которых при разных направлениях и опасных значениях скорости ветра максимумы концентрации одинаковы.

Как видно из рисунка, мажорантное поле концентрации в пересеченной местности имеет довольно сложный и нерегулярный характер, что определяется как геометрией расположения источни-

ков, так и особенностями рельефа. Если при этом определять границы санитарно-защитной зоны (СЗЗ) из условий равенства мажоранты некоторому пороговому значению, то СЗЗ окажется состоящей из ряда, вообще говоря, не связанных областей, вытянутых в направлении повышения рельефа.

В заключение отметим, что изложенный подход нашел применение при проведении экспертиз промышленных предприятий, расположенных в условиях сложного рельефа, когда определение поправок на рельеф методом, изложенным в [4], вызывает затруднения.

Для конкретных расчетов топографическая карта оцифровывается в сетке, размеры которой задаются заранее, с шагом, не превышающим удвоенную высоту самого низкого из рассматриваемых источников. При этом машинное время для сетки 30×30 составляет около одного часа и слабо зависит от числа источников, поскольку главным образом затрачивается на построение множества конформных отображений. В дальнейшем предполагается еще несколько сократить время счета путем использования оптимальных (чебышевских) параметров релаксации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Байков Б. К. и др. Некоторые результаты изучения распространения в атмосфере выбросов ТЭЦ «Варна» в условиях пересеченного рельефа/Б. К. Байков, Д. Блыскова, Р. С. Гильденскиольд, Б. Б. Горошко, В. Захариев, Ж. Модева, М. Тенева.— Труды ГГО, 1976, вып. 373, с. 100—107.
2. Берлянд М. Е. Современные проблемы атмосферной диффузии и загрязнение атмосферы.— Л.: Гидрометеиздат, 1975.—448 с.
3. Берлянд М. Е., Генихович Е. Л. Атмосферная диффузия и структура воздушного потока над неоднородной подстилающей поверхностью.— В кн.: Метеорологические аспекты загрязнения атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1971, с. 49—69.
4. Берлянд М. Е. и др. Особенности распространения примесей в пересеченной местности/М. Е. Берлянд, Е. Л. Генихович, И. Г. Грачева, Р. И. Оникул.— Труды ГГО, 1979, вып. 417, с. 19—35.
5. Берлянд М. Е. и др. К оценке опасных скоростей ветра для высоких источников/М. Е. Берлянд, Е. Л. Генихович, М. Н. Зашихин, Р. И. Оникул.— Труды ГГО, 1977, вып. 387, с. 13—22.
6. Берлянд М. Е. Генихович Е. Л., Куренбин О. И. Влияние рельефа на распространение примесей от источника.— Труды ГГО, 1968, вып. 234, с. 28—44.
7. Берлянд М. Е., Генихович Е. Л., Хуршудян Л. Г. Об использовании результатов моделирования воздушного потока в аэродинамических трубах для расчета загрязнения воздуха.— Труды ГГО, 1975, вып. 352, с. 3—16.
8. Генихович Е. Л. Турбулентное течение и диффузия в области с криволинейной границей.— Автореф. дисс. на соискание учен. степени канд. физ.-мат. наук. Л., 1971.—15 с.
9. Горлин С. М., Зражевский И. М. Изучение обтекания модели рельефа и городской застройки в аэродинамической трубе.— Труды ГГО, 1968, вып. 234, с. 45—59.
10. Грачева И. Г. К разработке методики расчета рассеивания примесей в условиях сложного рельефа.— Труды ГГО, 1979, вып. 417.
11. Лаврентьев М. А., Шабат Б. В. Методы теории функций комплексного переменного. М.: Наука, 1965.—708 с.

12. Указания по расчету рассеивания вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий. СН 369—74/Под ред. М. Е. Берлянда, А. М. Кошкина, Р. И. Оникула. М.: Стройиздат, 1975.—45 с.
13. Inlenfeld H. Modellierung von Gasausbreitungsvorgängen in der bodennahen Grenzschicht durch Versuche im Windkanal.— Z. Meteorol., 1977, Bd 27, N 6, S. 383—393.
14. Huber A. H. Plume behavior in the lee of a mountain ridge — a wind tunnel study.— Preprint EPA Conf. on Environmental Modeling and Simulation. Cincinnati, Ohio, 1976, p. 1—6.
15. Puttock I. S. Turbulent diffusion from sources near obstacles with separated wakes. Part II. Concentration measurements near a circular cylinder in uniform flow.— Atmos. Environ., 1979, vol. 13, N 1, p. 15—22.
16. Puttock I. S., Hunt I. C. R. Turbulent diffusion from sources near obstacles with separated wakes. Part I. An eddy diffusivity model.— Atmos. Environ., 1979, vol. 13, N 1, p. 1—13.
17. Roffman A., Kapsha T. P., Kueser P. E. A field study on the behavior of a SO₂ plume from a power plant near complex terrain and under stable atmospheric conditions.— In: Third Symp. on Atmospheric Turbulence Diffusion and Air Quality, 1976, Raleigh, N. C. Boston, Massachusetts.
18. Start G. E., Ricks N. R., Dickson C. R. Effluent delutions over mountainous terrain.— In: Third Symp. on Atmospheric Turbulence Diffusion and Air Quality, 1976, Raleigh, N. C. Boston, Massachusetts.
19. Stümke H. Berücksichtigung vereinfachter Geländetypen bei der Berechnung der turbulenten Ausbreitung von Schornstein.— Gasen. Staub, 1964, Bd 24, S. 175—182.

*М. Е. Берлянд, Я. С. Канчан,
Р. И. Оникул, С. С. Чичерин*

К ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ОЦЕНКЕ ГОДОВОГО И СУТОЧНОГО ХОДА ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРЫ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

1. Введение

При исследовании загрязнения атмосферы, оценке эффективности мероприятий по ее охране, нормировании промышленных выбросов, установлении размеров санитарно-защитных зон и решении многих других задач существенное значение имеет расчет осредненных концентраций [1, 2, 5, 10, 11, 12]. Теоретическое изучение межгодового, годового, суточного и пространственного изменения осредненных по времени и городской территории концентраций необходимо также для научно обоснованного проектирования предприятий, прогнозирования неблагоприятных условий рассеивания выбросов и их регулирования при наступлении этих условий [1]. Осредненные концентрации наиболее удобны для описания фактической и ожидаемой тенденции изменения загрязнения атмосферы при развитии промышленности, а также для изучения вариаций уровня загрязнения, связанных с годовым и суточным ходом метеорологических параметров, определяющих рассеивание примесей.

Расчетные оценки концентраций, осредненных за год, полугодия или сезоны для модельных источников по реальным распределениям определяющих метеопараметров в различных физико-географических условиях, необходимы при определении потенциала загрязнения атмосферы [1]. Расчету полей осредненных концентраций по параметрам источников и распределениям определяющих метеопараметров главным образом в крупных городах посвящено за последнее время большое число работ в первую очередь, в США для Нью-Йорка, Лос-Анджелеса, Сент-Луиса и др. [17—23].

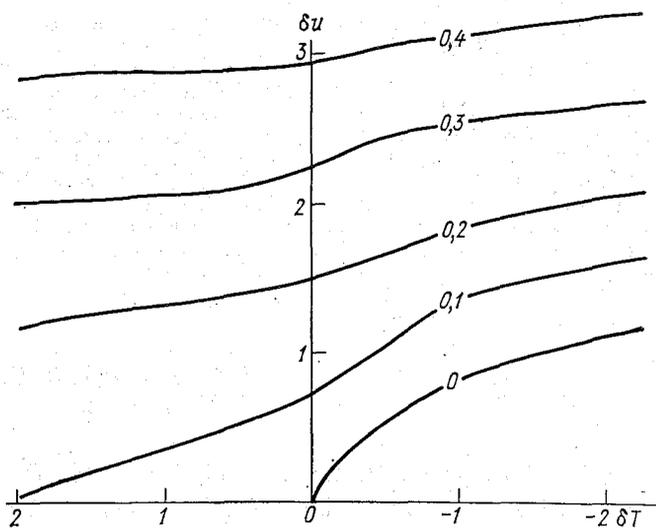


Рис. 1. Номограмма для определения коэффициента турбулентного обмена k_1 на высоте $z_1=1$ м по значениям $\delta u = u_2 - u_{0,5}$ и $\delta T = T_{0,5} - T_2$

В данной работе схема расчета осредненных концентраций [1, 9—11] развивается в целях изучения пространственно-временной изменчивости основных характеристик поля осредненных концентраций для типовых одиночных высоких и низких источников, а также для модельного города. Для расчета коэффициента турбулентности k_1 на высоте $z_1=1$ м по значениям разностей скорости ветра δu и температуры δT на высотах $z_2=2$ м и $z_{0,5}=0,5$ м при обработке массового материала градиентных наблюдений используется специальная номограмма (рис. 1), основывающаяся на схеме, изложенной в [1, 3].

Исходными для расчета являются данные наблюдений на теплосиловых станциях Борисполь (под Киевом), Воейково (под Ленинградом), Фрунзе (горная котловина на юге Средней Азии) и Коткино (Коми АССР) за 1974 г., а по Воейково также и за 1975 г. Осреднение концентраций выполняется за год, холодный

и теплый периоды как в целом, так и отдельно по данным для каждого срока наблюдений. При подготовке материалов учитывается неравномерность распределения сроков градиентных наблюдений в течение года и суток [14, 15]. В теплое время года установлено шесть сроков (1, 7, 10, 13, 16 и 19 ч), а в холодное — 2 срока (1 и 13 ч).

Для одиночных источников главное внимание уделяется следующим относящимся к рассматриваемому периоду или сроку величинам:

— максимальной средней концентрации \bar{q}_m и расстоянию \bar{r}_m от источника, где эта концентрация достигается;

— средней концентрации \bar{q} на фиксированных больших расстояниях от источника.

Для модельного города за основную характеристику принимается средняя за рассматриваемый период или срок концентрация

\bar{q} , дополнительно осредненная по территории всего города.

В связи с тем что среднесуточные предельно допустимые концентрации (ПДК_с) — нормативы концентраций, относящиеся к периоду одного года, не должны превышать не только средними многолетними концентрациями, но и средними концентрациями за каждый год, необходимо изучение межгодовой изменчивости осредненных концентраций. Оно начато на материалах ст. Воейково за 1974—1975 гг.

Градиентные наблюдения имеют определенные пропуски при осадках, сильных морозах, туманах, сильных ветрах, пыльных и песчаных бурях и др., а также технического характера. На рассматриваемых станциях пропуски были обусловлены в основном осадками [15].

2. Расчет осредненных концентраций

Согласно [10], поле осредненных за длительный период времени приземных концентраций от одиночного точечного источника определяется по формуле

$$\bar{q}(r, \varphi) = \int_{\Omega} \bar{q}(r, \varphi, k_1, u_2) P_2(k_1, u_2) dk_1 du_2. \quad (1)$$

Здесь r и φ — полярные координаты расчетной точки в системе координат с началом в точке проекции источника на подстилающую поверхность; u_2 — скорость ветра на высоте z_2 ; $P_2(k_1, u_2)$ — совместная плотность вероятности k_1 и u_2 за период осреднения.

Интегрирование в (1) выполняется по области Ω реального изменения k_1 и u_2 . При выводе (1) учитывается, что высота приземного слоя h определяется по значению k_1 . Шероховатость подстилающей поверхности z_0 , сравнительно слабо влияющая на загрязнение атмосферы, принимается постоянной. Ниже излагается удобная в рассматриваемом случае схема определения статистически

достоверного значения z_0 . Таким образом, по градиентным наблюдениям восстанавливаются вертикальные профили коэффициента турбулентного обмена k_z (схема с «изломом») и скорости ветра u (логарифмический закон) в пограничном слое атмосферы.

Величина $\tilde{q}(r, \varphi, k_1, u_2)$ — осредненная концентрация от точечного источника при фиксированных метеорологических параметрах k_1, u_2 , шероховатости подстилающей поверхности z_0 и эффективной высоте источника H_e . Ее можно рассматривать как функцию u_2 [1]:

$$\tilde{q}(r, \varphi, k_1, u_2) = \frac{P_1(\varphi) q'(r, k_1, u_2)}{r} = P_1(\varphi) \sqrt{2\pi} \varphi_0 q_{\text{то}}(r, k_1, u_2). \quad (2)$$

Здесь $q'(r, k_1, u_2)$ — разовая (осредненная за 20 мин) приземная концентрация от линейного источника бесконечной длины, ориентированного поперек ветра; $P_1(\varphi)$ — плотность вероятности противоположного φ направления ветра (мощность линейного источника M на единицу длины источника при этом, как обычно, принимается равной суммарной мощности точечного источника); $q_{\text{то}}$ — соответствующая разовая приземная концентрация от точечного источника на оси факела; φ_0 — среднее квадратическое отклонение направления ветра от его среднего за период отбора проб значения, являющееся, вообще говоря, функцией направления ветра. Поскольку φ_0 определяется теми же основными параметрами, что и k_1 [1], то величина \tilde{q} однозначно связана с разовой концентрацией $q_{\text{то}}$. Так, при характерном значении $\varphi_0 = 0,1$ и круговой розе ветров $\tilde{q} = 0,04q_{\text{то}}$. Таким образом, согласно (1), задача о расчете средних концентраций сводится к определению среднего по параметрам k_1 и u_2 значения функции \tilde{q} с весовой функцией $P_2(k_1, u_2)$.

Модель для расчета q' изложена в [12]. Она основывается на численном решении уравнения атмосферной диффузии при схеме «с изломом» для k_z на уровне h и логарифмическом законе изменения u с высотой z .

Запишем \tilde{q} в удобном для практического использования виде:

$$\tilde{q} = \tilde{q}_m s_1 \left(\frac{r}{\tilde{r}_m}, \frac{H_e}{h}, \frac{z_1}{h} \right), \quad (3)$$

$$\tilde{q}_m = \frac{P_1(\varphi) k_1 M}{u_2^2 H_e^2} \Psi_1 \left(\frac{H_e}{h}, \frac{z_0}{h} \right), \quad (4)$$

$$\tilde{r}_m = \frac{u_2 H_e}{k_1} \Psi_2 \left(\frac{H_e}{h}, \frac{z_0}{h} \right), \quad (5)$$

где \tilde{q}_m — максимальное значение функции \tilde{q} , достигающееся на расстоянии \tilde{r}_m от источника; s_1, Ψ_1, Ψ_2 — безразмерные функции, определяемые при численном решении уравнения турбулентной диффузии.

В более простой постановке ($u = u_1 z^n$, $k = k_1 z$), допускающей аналитическое решение, формулы (3)—(5), записываются в следующем виде:

$$\tilde{q}_m = \frac{4P_1(\varphi) k_1 (1+n)^3 M \left(\frac{z_2}{z_1} \right)^{2n}}{e^2 u_2^2 f_e^2 (1+n)}, \quad (6)$$

$$\tilde{r}_m = \frac{u_2 f_e^{1+n} \left(\frac{z_1}{z_2} \right)^n}{2k_1 (1+n)^2}, \quad (7)$$

$$\tilde{s}_1 = \left(\frac{\tilde{r}_m}{r} e^{1 - \frac{\tilde{r}_m}{r}} \right)^2. \quad (8)$$

В случаях многих источников осуществляется суперпозиция полей осредненных концентраций от отдельных источников.

При расчетах в настоящей статье роза ветров принимается круговой $\left(P_1(\varphi) = \frac{1}{2\pi} \right)$ с тем, чтобы в чистом виде изучить зависимость рассматриваемых характеристик от местных особенностей ветрового и турбулентного режима. Учет местных особенностей розы ветров является самостоятельной задачей.

Ввиду указанной временной неравномерности сроков градиентных наблюдений, во всех случаях производятся отдельные расчеты концентраций \bar{q}^r , \bar{q}^T и \bar{q}^X , осредненных соответственно за год, теплый и холодный периоды.

Для каждого срока составляется таблица совместной повторяемости различных градаций k_1 и u_2 . При составлении таблицы за теплый период учитывается неравномерность сроков наблюдений в течение суток. Очевидно, что в холодный период сроки наблюдений 1 и 13 ч характеризуют 12-часовые интервалы. Сроки 10, 13 и 16 ч характеризуют интервалы продолжительностью 3 ч, сроки 7 и 19 ч — интервалы 4,5 ч, срок 1 ч — интервал 6 ч. В связи с этим для холодного периода данные за оба срока используются с одинаковыми весами, для теплого периода данные за сроки 10, 13 и 16 ч — с весами 1, за 7 и 19 ч — с весами 1,5; за 1 ч — с весами 2.

Значения $P_2(k_1, u_2)$ за год определяются осреднением $P_2(k_1, u_2)$ за теплый и холодный периоды с весами, пропорциональными относительной длительности этих периодов. Таблицы совместной повторяемости k_1 и u_2 строятся также и для отдельных сроков наблюдений теплого и холодного периодов, так как они и рассчитанные на их основе концентрации для указанных модельных источников представляют интерес с точки зрения изучения годового и суточного хода условий рассеивания примесей.

Расчеты осредненных концентраций производятся численным интегрированием по специально разработанным (отдельно для случаев одиночного и группы источников) программам для ЭВМ.

Наряду с $P_2(k_1, u_2)$ рассматривались функции $P_2'(\frac{k_1}{u_2}, u_2)$.

В частности, по значению $\frac{k_1}{u_2}$, характеризующемуся наибольшей повторяемостью при умеренных и сильных ветрах, ориентировочно определяется средняя за рассматриваемый период шероховатость подстилающей поверхности z_0 , являющаяся одним из параметров расчетной схемы. В 1974 г. в Воейково определенная указанным методом z_0 в теплый период оказалась равной 1,6 см, в холодный — 0,05 см; в Борисполе соответственно 5 и 0,5 см, а в Коткино 6 и 0,3 см. Во Фрунзе значение z_0 , мало изменяясь в течение года, составляло в среднем около 4 см.

3. Одиночные источники

Расчеты проводятся для двух вариантов модельных источников единичной мощности, т. е. с нормировкой на M , или, что одно и то же, при $M = 1$ г/с:

— тепловая электростанция (высота H_0 и диаметр устья трубы D равны соответственно 150 и 8 м, скорость выхода дымовых газов $\omega_0 = 10$ м/с, а их перегрев $\Delta T = 100^\circ\text{C}$);

— котельная (H_0 и D равны соответственно 15 и 0,5 м, $\omega_0 = 5$ м/с, $\Delta T = 100^\circ\text{C}$).

Следует обратить внимание, что тепловые мощности рассматриваемых источников, пропорциональные $D^2\omega_0$, различаются в 512 раз.

Как уже указывалось, характеристики поля осредненных концентраций \bar{q} зависят от повторяемости различных сочетаний k_1 и u_2 за рассматриваемый период и от того, какие значения принимает функция \bar{q} при этих сочетаниях.

На рис. 2 представлена зависимость \bar{q}_m и \bar{r}_m от k_1 и u_1 . Для источника высотой 150 м наибольшие \bar{q}_m и соответственно наименьшие \bar{r}_m отмечаются при сильной турбулентности и умеренных скоростях ветра, а для низкого источника — при умеренной турбулентности и слабом ветре, т. е. в обоих случаях при существенно неустойчивой стратификации.

Расчеты показывают, что как для низкого, так и для высокого источников функция \bar{s}_1 при различных значениях k_1 и u_2 в области $\frac{r}{\bar{r}_m} < 10$ близка к аналогичной функции, используемой при расчетах зависимости разовых приземных концентраций от расстояния в [16].

Для анализа степени неблагоприятности различных метеорологических условий с точки зрения их вклада в средние концентрации рассмотрим зависимость величины \bar{q} для низкого и высокого источников от k_1 и u_2 на фиксированных больших расстояниях от источника (рис. 3 и 4). В этом плане настоящая работа является развитием [4], где изучена зависимость опасной скорости ветра

от расстояния до источника. В случае низкого источника отчетливо проявляется тенденция ослабления зависимости \tilde{q} от u_2 при удалении от источника. Основным фактором, определяющим при этом значения \tilde{q} , становится коэффициент турбулентного обмена k_1 , причем \tilde{q} увеличивается при его уменьшении. Это связано с компенсацией уменьшения \tilde{q}_m (4) ростом \tilde{r}_m (5) и соответственно коэффи-

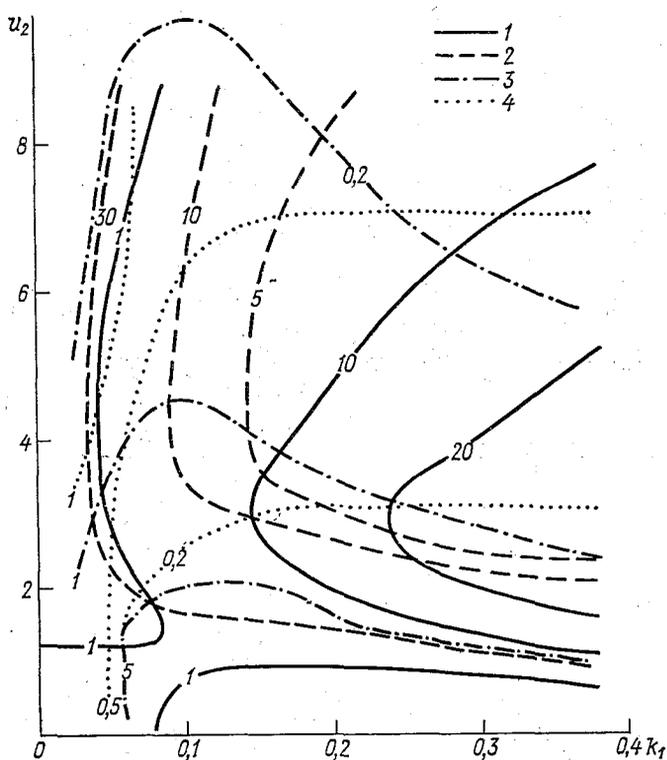


Рис. 2. Зависимость величин \tilde{q}_m ($\text{мг}/\text{м}^3$) и \tilde{r}_m (км) от k_1 и u_2 для высокого и низкого источников.

- 1) $10^6 \tilde{q}_m (H_0=150 \text{ м})$, 2) $\tilde{r}_m (H_0=150 \text{ м})$; 3) $10^3 \tilde{q}_m (H_0=15 \text{ м})$,
4) $\tilde{r}_m (H_0=15 \text{ м})$.

циента \tilde{s}_1 . Зависимость \tilde{q} от k_1 и u_2 на фиксированных расстояниях в случае высокого источника (см. рис. 4) более сложна. Отметим, что при малых скоростях ветра ($u_2 < 1 \text{ м}/\text{с}$) \tilde{q} слабо зависит от k_1 и, наоборот, при $k_1 < 0,07 \text{ м}^2/\text{с}$ значение \tilde{q} слабо зависит от u_2 .

В табл. 1 приводятся результаты расчета осредненных концентраций \tilde{q} от указанных точечных источников для Борисполя (1974 г.), Воейково (1974—1975 гг.), Коткино (1974 г.) и Фрунзе (1974 г.). Концентрации осредняются за год, теплые и холодные

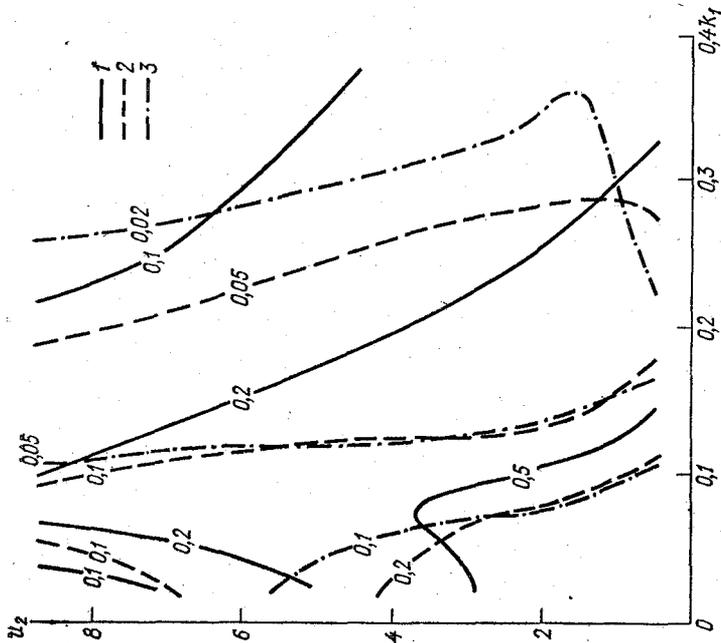


Рис. 3. Зависимость величины q ($\text{мг}/\text{м}^3$) от k_1 и u_2 на фиксированных расстояниях r от одиночного источника при $H_0 = 15$ м.

1) $r = 100$ м, 2) $r = 200$ м, 3) $r = 300$ м.

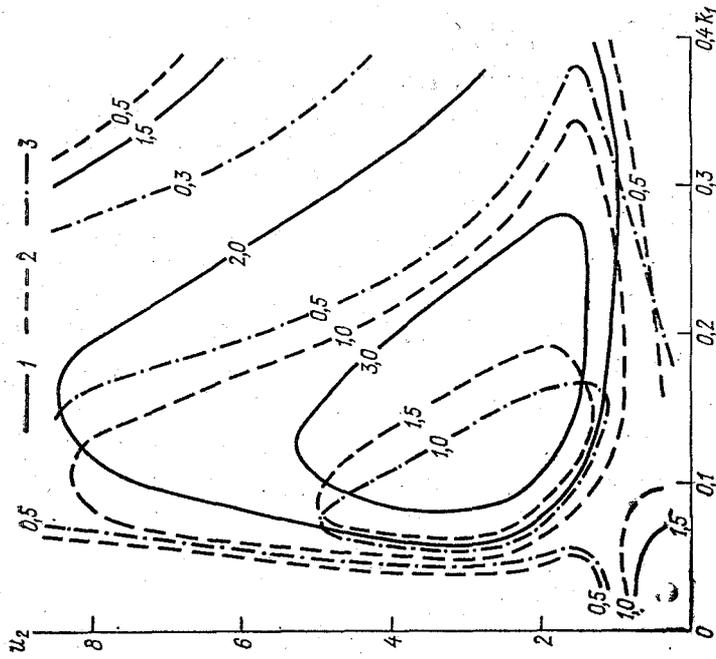


Рис. 4. Зависимость величины q ($\text{мг}/\text{м}^3$) от k_1 и u_2 на фиксированных расстояниях r от одиночного источника при $H_0 = 150$ м.

Усл. обознач. см. рис. 3.

периоды (\bar{q}^r , \bar{q}^t , \bar{q}^x) в целом и за отдельные сроки. Для сравнения приведем максимальные разовые концентрации c_m , рассчитанные по формуле из работы [16] при коэффициенте A , учитывающем неблагоприятность (с точки зрения максимальных разовых концентраций) условий рассеивания примесей и равно 160 для Борисполя, Воейково, Коткино и 200 для Фрунзе. Для Борисполя, Воейково и Коткино при $H_0 = 150$ м, $c_m = 0,198 \cdot 10^{-3}$ мг/м³, а при $H_0 = 15$ м $c_m = 0,196$ мг/м³. Для Фрунзе c_m равны соответственно $0,248 \cdot 10^{-3}$ и $0,245$ мг/м³.

Прежде всего отметим, что максимальные осредненные концентрации для рассматриваемых районов и источников примерно в 50—150 раз меньше c_m . Это при

$$c_m < \text{ПДК}_p \quad (9)$$

автоматически обеспечивает для одиночных источников соблюдение соотношения

$$\bar{q} < \text{ПДК}_c, \quad (10)$$

где ПДК_p и ПДК_c — соответственно максимальная разовая и среднесуточная ПДК (ПДК_c относится к длительным периодам порядка 1 года).

В 1974 г. максимальные осредненные концентрации \bar{q}_m^r за год от высокого источника оказались наибольшими в Борисполе. Анализ показывает, что это связано с наиболее близким совпадением максимумов функций $P_2(k_1, u_2)$ за год и $\bar{q}(k_1, u_2)$, в результате чего \bar{r}_m^r и \bar{r}_m различаются не очень сильно. При больших расходах этих максимумов осредненные концентрации получаются наименьшими. Интересно, что для низкого источника наибольшие \bar{q}_m^r отмечаются для Фрунзе, хотя для высокого источника эта величина для Борисполя более чем в 2 раза превышает величину, рассчитанную для Фрунзе. В большинстве случаев \bar{q}_m в теплый период больше, чем в холодный, причем для Коткино примерно в 2 раза. В то же время (например, во Фрунзе) для низкого и высокого источников условия холодного периода даже несколько менее благоприятны, чем теплового. То же отмечается и для высокого источника в Борисполе.

Максимальные разовые концентрации c_m для рассматриваемых источников различаются примерно в 1000 раз за счет увеличения высоты выброса в 10 раз и объема дымовых газов V_1 в 512 раз, а \bar{q}_m^r , \bar{q}_m^t , \bar{q}_m^x для низкого источника больше, чем для высокого источника примерно в 500—1500 раз, т. е. рост H_0 и V_1 существенно снижает и осредненные концентрации.

Величина \bar{q} имеет в ряде случаев отчетливо выраженный суточный ход. Для низкого источника в холодный период \bar{q}_m^x в 13 ч во Фрунзе в 2 раза больше, а в Борисполе в 1,5 раза меньше, чем в 1 ч. В теплый период наибольшее загрязнение атмосферы наблюдается утром, а близкие к максимальным концентрации часто

Максимальные осредненные концентрации \bar{q}_m (мг/м³) для низкого ($10^3\bar{q}_m$) и на которых они

| Станция, год | Период | | | | |
|--------------|----------|------|---------|-----|-----|
| | холодный | | | теп | |
| | 1 ч | 13 ч | среднее | 1 ч | 7 ч |

Низкий источник

| | | | | | |
|-----------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| Борисполь, 1974 | $\frac{3,12}{0,20}$ | $\frac{2,13}{0,20}$ | $\frac{2,65}{0,20}$ | $\frac{4,28}{0,16}$ | $\frac{4,70}{0,13}$ |
| Воейково, 1974 | $\frac{1,55}{0,34}$ | $\frac{1,76}{0,30}$ | $\frac{1,65}{0,29}$ | $\frac{1,66}{0,41}$ | $\frac{2,86}{0,24}$ |
| Воейково, 1975 | $\frac{1,55}{0,39}$ | $\frac{1,67}{0,29}$ | $\frac{1,60}{0,32}$ | $\frac{1,85}{0,37}$ | $\frac{3,49}{0,20}$ |
| Коткино, 1974 | $\frac{1,70}{0,50}$ | $\frac{1,49}{0,32}$ | $\frac{1,58}{0,39}$ | $\frac{2,42}{0,32}$ | $\frac{3,85}{0,20}$ |
| Фрунзе, 1974 | $\frac{2,73}{0,55}$ | $\frac{5,50}{0,16}$ | $\frac{3,60}{0,24}$ | $\frac{2,40}{0,55}$ | $\frac{3,24}{0,28}$ |

Высокий источник

| | | | | | |
|-----------------|----------------------|---------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| Борисполь, 1974 | $\frac{3,47}{3,60}$ | $\frac{6,63}{3,08}$ | $\frac{5,04}{3,22}$ | $\frac{2,15}{18,8}$ | $\frac{4,72}{3,38}$ |
| Воейково, 1974 | $\frac{1,38}{13,72}$ | $\frac{2,66}{6,15}$ | $\frac{1,98}{6,90}$ | $\frac{1,16}{18,82}$ | $\frac{2,06}{7,65}$ |
| Воейково, 1975 | $\frac{1,40}{14,70}$ | $\frac{2,79}{5,92}$ | $\frac{1,96}{6,90}$ | $\frac{1,23}{37,65}$ | $\frac{2,17}{6,22}$ |
| Коткино, 1974 | $\frac{2,08}{18,82}$ | $\frac{3,04}{4,50}$ | $\frac{2,43}{4,50}$ | $\frac{2,64}{19,42}$ | $\frac{3,82}{3,00}$ |
| Фрунзе, 1974 | $\frac{3,67}{37,65}$ | $\frac{1,50}{6,15}$ | $\frac{2,41}{37,65}$ | $\frac{2,56}{37,65}$ | $\frac{2,63}{37,65}$ |

Таблица 1

высокого ($10^6 \bar{q}_m$) источников (числитель); расстояния \bar{r}_m (км) (знаменатель), достигаются

| осреднения | | | | | год | | Среднее за год по всем срокам |
|------------|------|------|------|---------|-----|------|-------------------------------|
| льй | | | | | 1 ч | 13 ч | |
| 10 ч | 13 ч | 16 ч | 19 ч | среднее | | | |

ник ($H_0=15$ м)

| | | | | | | | |
|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| $\frac{2,91}{0,16}$ | $\frac{2,45}{0,19}$ | $\frac{2,90}{0,16}$ | $\frac{4,19}{0,13}$ | $\frac{3,76}{0,16}$ | $\frac{3,78}{0,19}$ | $\frac{2,34}{0,19}$ | $\frac{3,27}{0,16}$ |
| $\frac{2,76}{0,20}$ | $\frac{2,57}{0,20}$ | $\frac{2,22}{0,21}$ | $\frac{2,02}{0,29}$ | $\frac{2,20}{0,28}$ | $\frac{1,60}{0,37}$ | $\frac{2,15}{0,21}$ | $\frac{1,93}{0,29}$ |
| $\frac{3,08}{0,20}$ | $\frac{2,86}{0,20}$ | $\frac{2,86}{0,20}$ | $\frac{2,34}{0,28}$ | $\frac{2,56}{0,24}$ | $\frac{1,70}{0,38}$ | $\frac{2,22}{0,21}$ | $\frac{2,06}{0,28}$ |
| $\frac{3,40}{0,19}$ | $\frac{2,81}{0,19}$ | $\frac{2,47}{0,20}$ | $\frac{3,67}{0,20}$ | $\frac{3,00}{0,20}$ | $\frac{1,97}{0,39}$ | $\frac{1,94}{0,24}$ | $\frac{2,09}{0,28}$ |
| $\frac{5,72}{0,16}$ | $\frac{5,23}{0,15}$ | $\frac{4,90}{0,19}$ | $\frac{2,71}{0,29}$ | $\frac{3,39}{0,23}$ | $\frac{2,48}{0,55}$ | $\frac{5,29}{0,15}$ | $\frac{3,44}{0,23}$ |

ник ($H_0=150$ м)

| | | | | | | | |
|---------------------|---------------------|---------------------|----------------------|----------------------|----------------------|---------------------|----------------------|
| $\frac{7,13}{3,15}$ | $\frac{7,71}{3,22}$ | $\frac{7,02}{3,15}$ | $\frac{3,40}{4,28}$ | $\frac{4,67}{3,22}$ | $\frac{2,51}{4,58}$ | $\frac{7,26}{3,15}$ | $\frac{4,83}{3,22}$ |
| $\frac{4,10}{5,48}$ | $\frac{4,40}{5,40}$ | $\frac{4,29}{5,40}$ | $\frac{2,04}{6,08}$ | $\frac{2,53}{5,55}$ | $\frac{1,24}{15,60}$ | $\frac{3,52}{5,55}$ | $\frac{2,24}{6,00}$ |
| $\frac{4,06}{5,55}$ | $\frac{3,65}{6,15}$ | $\frac{3,99}{5,25}$ | $\frac{1,65}{6,15}$ | $\frac{2,32}{6,08}$ | $\frac{1,28}{18,82}$ | $\frac{3,22}{6,08}$ | $\frac{2,13}{6,22}$ |
| $\frac{6,01}{2,85}$ | $\frac{7,71}{2,55}$ | $\frac{8,09}{2,55}$ | $\frac{4,35}{3,15}$ | $\frac{4,74}{2,85}$ | $\frac{2,31}{18,82}$ | $\frac{4,87}{3,08}$ | $\frac{3,33}{3,22}$ |
| $\frac{2,21}{6,00}$ | $\frac{3,39}{5,10}$ | $\frac{2,25}{6,15}$ | $\frac{2,83}{37,65}$ | $\frac{2,17}{21,30}$ | $\frac{2,84}{37,65}$ | $\frac{2,90}{5,10}$ | $\frac{2,22}{37,65}$ |

отмечаются в вечерние, а иногда и в ночные сроки. Значения \bar{q}_m в суточном ходе изменяются в холодный период в 2,5 раза, а в теплый в 4 раза.

Для высоких источников в холодный период \bar{q}_m^x в 13 ч чаще всего существенно (в 1,5—2 раза) больше, чем в 1 ч. Во Фрунзе отмечается суточный ход противоположного характера. В теплый период наибольшие \bar{q}_m^r всегда приходится на период 10—16 ч.

Существенно иные закономерности характерны для концентрации \bar{q} на фиксированных больших ($r = (100 \div 300)H_0$) расстояниях от источника. Так, для низкого источника в течение года при $r = (100 \div 300)H_0$ наибольшие \bar{q} наблюдаются ночью, а минимальные — днем, причем амплитуда суточного хода всегда значительна (до 3 раз). Для высокого источника наблюдаются значительные различия характера суточного хода. В теплый период при $r = 300H_0$ значения \bar{q} в ночное время примерно в 2 раза превышают значение \bar{q} в дневное время в Борисполе, Коткино и Фрунзе. В Воейково суточный ход, достаточно сильно выраженный на расстояниях порядка \bar{r}_m (около 6 км), с удалением от источника затухает и почти отсутствует при $r = 300H_0$. В холодный период значительный суточный ход при $r = (100 \div 300)H_0$ с большей, чем в теплое время, амплитудой отмечается только во Фрунзе. Такой характер суточного хода средних концентраций на больших расстояниях от источника связан с сильной зависимостью \bar{q} от интенсивности турбулентного обмена (см. рис. 3 и 4) и с суточным ходом совместных повторяемостей k_1 и u_2 [15].

Суточный ход имеет и расстояние \bar{r}_m , на котором достигается \bar{q}_m . Приблизительно можно считать, что суточный ход \bar{r}_m и \bar{q}_m противоположен по фазе, т. е. наибольшие \bar{q}_m достигаются при минимальных \bar{r}_m и наоборот. Для высокого источника ночью \bar{r}_m гораздо больше, чем днем, причем если днем \bar{r}_m не превышает 8 км, то ночью оно достигает 20 км и более. Для низкого источника \bar{r}_m в основном изменяется в пределах 150—300 м и достигает в 1 ч примерно 500 м.

Наличие суточного хода величин \bar{q}_m и \bar{r}_m приводит к ослаблению зависимости осредненных концентраций \bar{q} от расстояния по сравнению с аналогичной зависимостью для \bar{q} , причем для высокого источника это ослабление выражено отчетливее, чем для низкого.

4. Группы источников в городе

Расчеты проводились для модели города с 27 источниками выброса сернистого газа, имеющими высоты 12—100 м. Источники рассредоточены на территории 23×14 км² и обусловлены в основном развитой нефтеперерабатывающей промышленностью. Ранее для этого города рассчитывались поля максимальных разовых и среднегодовых концентраций [10].

В тех случаях, когда загрязнение атмосферы обусловлено выбросами вредного вещества из многих разнообразных источников,

рассредоточенных по значительной площади, поле приземных концентраций характеризуется большой пространственной неоднородностью [10]. В отличие от случая одиночного источника, значение максимальной концентрации, зависящее от многих факторов локального характера, менее показательно для характеристики источников города в целом и местных условий рассеяния примесей, в том числе суточного и годового хода осредненных концентраций, крупномасштабного их изменения по территории страны в зависимости от климатических условий, межгодовой изменчивости и др. Аналогично [5] для города целесообразно использовать интегральные характеристики загрязнения атмосферы, в первую очередь осредненную по территории города концентрацию \hat{q} :

$$\hat{q}(k_1, u_2) = \frac{1}{S_r} \int_{D_r} \tilde{q}_\Sigma(x, y, k_1, u_2) dx dy, \quad (11)$$

$$\tilde{q}_\Sigma(x, y, k_1, u_2) = \sum_{i=1}^N \tilde{q}_i(r_i, \varphi_i, k_1, u_2). \quad (12)$$

Здесь D_r — область, занимаемая городом; S_r — площадь города; r_i — расстояние от расчетной точки до i -того источника; $\tilde{q}_i(r_i, \varphi_i, k_1, u_2)$ — осредненная концентрация при заданном сочетании k_1 и u_2 в расчетной точке (x, y) от i -того источника, которая рассчитывается по (2); x, y — координаты точек местности в единой для города прямоугольной системе координат; $\tilde{q}_\Sigma(x, y, k_1, u_2)$ — суммарная осредненная концентрация от совокупности всех N источников в точке (x, y) при тех же k_1 и u_2 .

Величина \hat{q} тем полнее характеризует загрязнение атмосферы в городе, чем равномернее при соответствующих метеоусловиях распределены концентрации по территории города. Для оценки изменчивости концентраций по территории города при фиксированных метеоусловиях (k_1, u_2) рассчитывается коэффициент вариации концентраций $\hat{v} = \hat{\sigma}/\hat{q}$, где

$$\hat{\sigma}(k_1, u_2) = \left\{ \frac{1}{S_r} \int_{D_r} [\tilde{q}_\Sigma(x, y, k_1, u_2) - \hat{q}(k_1, u_2)]^2 dx dy \right\}^{1/2}. \quad (13)$$

Результаты расчета $\hat{q}(k_1, u_2)$ и $\hat{v}(k_1, u_2)$ для модельного города при круговой розе ветров представлены на рис. 5. Почти во всем рассматриваемом диапазоне изменений k_1 и u_2 значения $\hat{v} < 1$. Концентрации распределены наиболее неравномерно по территории города при умеренных ветрах и сильной турбулентности ($\hat{v} = 1,0 \div 1,5$). При устойчивой стратификации ($k_1 < 0,1 \text{ м}^2/\text{с}$) распределение концентраций по территории города наиболее равномерно ($\hat{v} < 0,5$).

Введение обобщенной характеристики \hat{q} , зависящей для данной совокупности источников города только от метеоусловий, позволяет

выявить для данного города относительно благоприятные и неблагоприятные метеоусловия. Это может быть использовано при прогнозе $\hat{q}(k_1, u_2)$ на основе прогноза характеристик метеоусловий (k_1, u_2) . Наиболее неблагоприятными для модельного города (рис. 5) являются метеорологические ситуации с умеренными ветрами ($u_2 \approx 1 \div 3$ м/с) и достаточно выраженным турбулентным об-

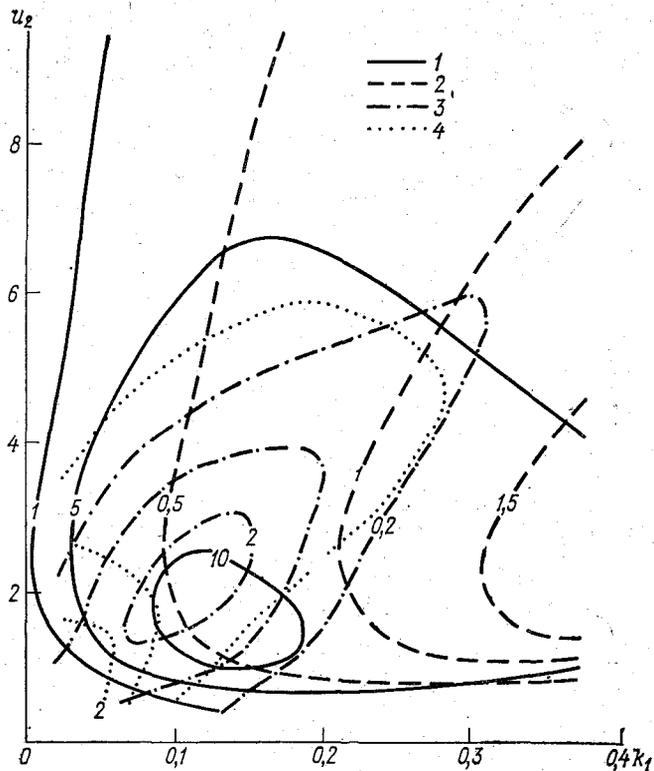


Рис. 5. Зависимость величин \hat{q} (1) и \hat{v} (2) от k_1 и u_2 для модельного города и совместные плотности вероятности k_1 и u_2 для Борисполя (3) и Коткино (4).

меном ($k_1 \approx 0,1 \div 0,15$ м²/с). При существенно больших k_1 и u_2 значение $\hat{q}(k_1, u_2)$ уменьшается в 1,5–2 раза и более. При слабом турбулентном обмене ($k_1 < 0,02$ м²/с), а также при u_2 меньше 0,5 м/с значение \hat{q} уменьшается до 10 раз. Из рис. 5 следует, что для расчета и прогноза \hat{q} точность оценки k_1 и u_2 должна быть значительно выше в области больших градиентов функции $\hat{q}(k_1, u_2)$, чем в области малых.

Рассмотрение осредненных за год, теплый и холодный периоды в целом и по отдельным срокам концентраций

$$\bar{q} = \int_{\Omega} \int q(k_1, u_2) P_2(k_1, u_2) dk_1 du_2 \quad (14)$$

позволяет анализировать годовой и суточный ход загрязнения атмосферы в различных климатических условиях при размещении в них города типа модельного.

Формула (14) аналогична формуле (1) для одиночного источника. Эта формула позволяет выявлять благоприятные и неблагоприятные с точки зрения загрязнения атмосферы распределения метеоусловий. Функции $P_2(k_1, u_2)$, характеризующиеся высокой повторяемостью в области изменения аргументов k_1 и u_2 , где мак-

симальны $\hat{q}(k_1, u_2)$, приводят к большим средним концентрациям. На рис. 5 для примера представлены годовые $P_2(k_1, u_2)$ для Борисполя и Коткино за 1974 г. Наложение зон максимумов функций $\hat{q}(k_1, u_2)$ и $P_2(k_1, u_2)$ для Борисполя и их значительная удаленность для Коткино привели к тому, что рассчитанная по фор-

муле (14) среднегодовая концентрация \bar{q}^r для условий Борисполя значительно выше, чем для Коткино (табл. 2). В этой таблице приведены результаты расчета концентраций, осредненных за год, холодный и теплый периоды в целом и по отдельным срокам. Наиболее неблагоприятными в холодный период оказались условия Борисполя, в теплый период — Борисполя и Фрунзе. В Борисполе сезонная изменчивость осредненных концентраций практически от-

Таблица 2

Осредненные с учетом повторяемости метеоусловий средние по городу концентрации

| Станция, год | Период осреднения | | | | | | | | | | | Среднее за год по всем срокам | |
|-----------------|-------------------|------|---------|--------|-----|------|------|------|------|---------|-----|-------------------------------|------|
| | холодный | | | теплый | | | | | | год | | | |
| | 1 ч | 13 ч | среднее | 1 ч | 7 ч | 10 ч | 13 ч | 16 ч | 19 ч | среднее | 1 ч | | 13 ч |
| Борисполь, 1974 | 6,8 | 7,6 | 7,2 | 5,3 | 7,7 | 8,5 | 8,3 | 8,4 | 6,8 | 7,2 | 6,0 | 8,0 | 7,2 |
| Воейково, 1974 | 4,5 | 6,5 | 5,5 | 3,3 | 7,1 | 8,4 | 8,1 | 7,6 | 5,5 | 6,2 | 3,9 | 7,3 | 5,8 |
| Воейково, 1975 | 4,0 | 6,0 | 5,0 | 3,8 | 7,4 | 8,7 | 8,4 | 8,3 | 5,5 | 6,4 | 3,9 | 7,2 | 5,8 |
| Коткино, 1974 | 3,2 | 4,7 | 4,0 | 2,5 | 5,1 | 7,4 | 7,2 | 6,5 | 5,7 | 5,3 | 2,9 | 5,8 | 4,5 |
| Фрунзе, 1974 | 0,4 | 7,1 | 3,7 | 1,3 | 2,2 | 7,5 | 8,6 | 7,9 | 2,3 | 7,1 | 1,0 | 8,2 | 4,1 |

существовала. Во Фрунзе в холодный период осредненная концентрация была наименьшей. В результате среднегодовая концентрация в Борисполе оказалась наибольшей, а во Фрунзе — наименьшей.

Для всех рассмотренных станций отчетливо выражен суточный ход величины \bar{q} . Максимальное изменение концентраций в течение суток характерно для Фрунзе, минимальное для Борисполя. На всех станциях, кроме Фрунзе, суточные изменения летом больше, чем зимой. Так, в Коткино летом концентрации \bar{q} меняются в течение суток примерно в 3 раза, тогда как зимой — в 1,5 раза. Минимальные концентрации на всех станциях относятся к ночи (1 ч). В теплый сезон максимальные концентрации для всех станций, кроме Фрунзе, отмечаются в 10 ч, а во Фрунзе — в 13 ч. При этом концентрации в период 10—16 ч незначительно различаются между собой. В холодный период концентрация в 13 ч значительно больше концентрации в 1 ч. Расчеты для Воейково за 1974 и 1975 гг. позволяют рассмотреть межгодовое изменение осредненных концентраций. Это изменение в рассматриваемом случае очень невелико.

5. Методы приближенной оценки осредненных концентраций при осадках, сильных ветрах и туманах

Для совокупности сроков, когда градиентные наблюдения не проводятся из-за интенсивных осадков, возможен приближенный способ оценки осредненной концентрации. Он прежде всего основан на том, что в этих условиях, как правило, стратификация пограничного слоя атмосферы близка к равновесной. При этом отношение $\lambda_0 = k_1/u_2$ выражается как

$$\lambda_0 = \frac{\kappa^2}{\ln \frac{z_2}{z_0}}, \quad (15)$$

где κ — постоянная Кармана.

В рассматриваемом случае функция $P_2(k_1, u_2)$ сводится к функции одного аргумента $P'(u_2) = P_2(\lambda_0 u_2, u_2)$, определенной по данным стандартных метеорологических наблюдений путем пересчета значений скорости ветра с уровня флюгера на высоту $z_2 = 2$ м. Для приближенного учета вымывания примеси осадками следует в (1) заменить $\bar{q}(r, \varphi, k_1, u_2)$ на $\bar{q}_0(r, \varphi, u_2, \lambda_0, \alpha)$, где α — константа вымывания примеси осадками. Согласно [1],

$$\bar{q}_0(r, \varphi, u_2, \lambda_0, \alpha) = \bar{q}(r, \varphi, \lambda_0 u_2, u_2) e^{-\frac{\alpha r}{u}}. \quad (16)$$

Здесь \bar{u} — средняя скорость ветра в слое диффузии основного количества примеси, приближенно равная скорости ветра на уровне устья источника выброса H_0 , пропорциональной u_2 :

$$\bar{u} = \alpha' u_2, \quad (17)$$

где

$$\alpha' = \ln \frac{H_0}{z_0} / \ln \frac{z_2}{z_0}. \quad (18)$$

Согласно Энгельману, α изменяется от $2 \cdot 10^{-4}$ до $8 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$ при возрастании интенсивности выпадения дождя от 0,1 до 10 мм/ч, т. е. примерно пропорционально $I^{0,8}$ [1].

Таким образом, расчет осредненных концентраций за совокупность сроков с осадками производится по формуле

$$\bar{q} \approx \int_{\Omega'} P'(u_2) \bar{q}(r, \varphi, \lambda_0 u_2, u_2) e^{-\frac{\alpha r}{\alpha' u_2}} du_2. \quad (19)$$

Здесь Ω' — область реального изменения скорости ветра u_2 . При расчете \bar{q} в (19) роза ветров должна определяться за рассматриваемую совокупность сроков.

Осадки уменьшают значение осредненной концентрации за счет вымывания примесей, приближая положение ее максимума к источнику. При интенсивных осадках загрязнение атмосферы практически отсутствует, если рассматриваемая примесь хорошо растворима в воде.

Концентрация, осредненная за совокупность сроков, когда градиентные наблюдения не проводятся из-за сильных ветров, при которых температурная стратификация пограничного слоя атмосферы также близка к равновесной, определяется по формуле

$$\bar{q} \approx \int_{\Omega''} P'(u_2) \bar{q}(r, \varphi, u_2, \lambda_0) du_2, \quad (20)$$

причем $P'(u_2)$ и роза ветров для расчета \bar{q} определяются за совокупность сроков с сильными ветрами, когда скорость ветра изменяется в области Ω'' .

В некоторых случаях градиентные наблюдения не проводятся из-за туманов [14]. Закономерности загрязнения атмосферы при туманах имеют весьма сложный характер из-за влияния поглощения примесей водяными каплями из слоя тумана и вышележащих слоев, усиления токсического действия некоторых вредных веществ при их растворении в каплях, расположенных над туманом приподнятых инверсий температуры и др. [1, 6—8]. Приближенно можно считать, что суммарная (в воздухе и каплях) осредненная концентрация растворимых вредных веществ, например сернистого газа, от источников, расположенных в слое тумана, в 2—3 раза больше осредненных концентраций при тех же $P'(u_2)$.

Для высоких мощных источников, расположенных, как правило, над слоем тумана, возможно увеличение концентраций до 1,5 раз.

6. Заключение

Расчеты характеристик полей осредненных концентраций по данным градиентных наблюдений дают важную информацию о региональных особенностях климатических условий рассеивания примесей. Определенные отличия имеют место по величинам осредненных концентраций, характеру их годовой и суточной изменчивости. Они проявляются различным образом для источников разного типа, а также вблизи источников и на больших удалениях от них.

Полученные результаты найдут применение при размещении новых городов и промышленных предприятий, прогнозе загрязнения атмосферы, регулировании выбросов во время неблагоприятных метеорологических условий, анализе тенденции загрязнения атмосферы и решении ряда других важных задач.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Берлянд М. Е. Современные проблемы атмосферной диффузии и загрязнения атмосферы.— Л.: Гидрометеиздат, 1975.— 448 с.
2. Берлянд М. Е. Основные принципы инвентаризации и определение предельно допустимых выбросов в атмосферу.— В кн.: Нормирование и контроль промышленных выбросов в атмосферу. Л.: Гидрометеиздат, с. 3—10.
3. Берлянд М. Е., Генихович Е. Л. Особенности турбулентной диффузии и загрязнение воздуха в условиях стратифицированной атмосферы. Международный симпозиум по стратифицированным течениям.— Новосибирск; Изд-во ВЦ СО АН СССР, 1972.
4. Берлянд М. Е. и др. К оценке опасных скоростей ветра для высотных источников/М. Е. Берлянд, Е. Л. Генихович, М. Н. Зашихин, Р. И. Оникул.— Труды ГГО, вып. 387, 1977, с. 13—22.
5. Берлянд М. Е. и др. О расчете интегральных характеристик загрязнения воздуха по территории города/М. Е. Берлянд, Е. Л. Генихович, Р. И. Оникул, С. С. Чичерин.— Труды ГГО, вып. 436, 1979, с. 17—29.
6. Берлянд М. Е., Канчан Я. С. К теории образования радиационных туманов и их влияние на распространение примесей.— Труды ГГО, вып. 293, 1973, с. 3—20.
7. Берлянд М. Е., Оникул Р. И., Рябова Г. В. К теории атмосферной диффузии в условиях тумана.— Труды ГГО, вып. 207, 1968, с. 3—13.
8. Берлянд М. Е. и др. Численное исследование атмосферной диффузии при нормальных и аномальных условиях стратификации/М. Е. Берлянд, Е. Л. Генихович, В. П. Ложкина, Р. И. Оникул.— Труды ГГО, вып. 158, 1964, с. 22—32.
9. Берлянд М. Е. и др. Опасные условия рассеивания примеси и расчет концентраций от разного типа источников. Тезисы докладов к Международному симпозиуму по метеорологическим аспектам загрязнения атмосферы. Ленинград, 11—19 марта 1977 г./М. Е. Берлянд, Е. Л. Генихович, М. Н. Зашихин, Р. И. Оникул, С. С. Чичерин.— Л.: Изд. ГГО, 1977, с. 27.
10. Берлянд М. Е. и др. О расчете среднегодовых концентраций примеси в атмосфере от промышленных источников/М. Е. Берлянд, Е. Л. Генихович, Я. С. Канчан, Р. И. Оникул, С. С. Чичерин.— Труды ГГО, вып. 417, 1979, с. 3—18.
11. Берлянд М. Е. и др. О моделировании загрязнения атмосферы в городах.— Труды ГГО, вып. 436, 1979, с. 3—16.

12. Генихович Е. Л., Чичерин С. С. Двухпараметрическая модель рассеивания примеси от линейного источника при нормальных метеорологических условиях.— Труды ГГО, вып. 417, 1979, с. 67—73.
13. Оникул Р. И. К методике нормирования выбросов в атмосферу.— В кн.: Нормирование и контроль промышленных выбросов в атмосферу. Л.: Гидрометеиздат, с. 11—18.
14. Руководство по теплбалансовым наблюдениям.— Л.: Гидрометеиздат, 1977.—152 с.
15. Травкина Л. В., Чичерин С. С. О суточном и годовом ходе совместных повторяемостей скорости ветра и коэффициента обмена в приземном слое воздуха.— См. наст. сборник.
16. Указания по расчету рассеивания вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий. СН 369—74/Под ред. М. Е. Берлянда, А. Н. Кошкина, Р. И. Оникула.— М.: Стройиздат, 1977.—44 с.
17. Calder K. L. Multiple-source plume models of urban air pollution. Their general structure.— Atmos. Environ., 1977, vol. 11, N 6, p. 403—414.
18. Egan B. A., Mahoney J. R. Numerical modelling of advection and diffusion of urban area source pollutants.— J. Appl. Meteorol., 1972, vol. 11, N 2, p. 371—396.
19. Martin A., Barber F. R. Sulphur dioxide concentrations measured at various distances from a modern power station.— Atmos. Environ., 1967, N 6, p. 655—678.
20. Martin A., Barber F. R. Further measurements around modern power stations.— Atmos. Environ., 1973, N 1, p. 17—38.
21. Milford S. N., McCoy G. C., Aronowitz L., Scanlon J. H. Comparison of air pollution models with aerometric data for the air quality region centered on New York City.— In: Proc. 2nd Intern. Clean Air Congr., Washington, D. C., 1970. N.-Y.; London, 1971, p. 1168—1176.
22. Shieh L. J., Davidson B., Friend J. P. A model of diffusion in urban atmosphere: SO₂ on greater New York, 1969. Presented at the Symp. on multiple-source urban diffusion models. Chappel Hall, North Carolina.
23. Shir C. C., Shieh L. J. A generalized urban air pollution model and its application to the study of SO₂ distribution in the St. Louis Metropolitan Area.— J. Appl. Meteorol., vol. 13, N 2.

Е. Л. Генихович

К ВОПРОСУ О ПРИМЕНИМОСТИ ГАУССОВСКОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ РАСЧЕТА ЗАГРЯЗНЕНИЯ ВОЗДУХА

Для практических расчетов загрязнения воздуха выбросами промышленных источников до настоящего времени широко используются так называемые гауссовские модели, основанные на предположении, что концентрация примеси в окрестности одиночного точечного источника описывается гауссовским распределением, которое с учетом условия отражения примеси от подстилающей поверхности имеет вид [10]

$$q = \frac{M}{2\pi\bar{u}\sigma_z} e^{-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}} \left[e^{-\frac{(z-H)^2}{2\sigma_z^2}} + e^{-\frac{(z+H)^2}{2\sigma_z^2}} \right]. \quad (1)$$

Здесь q — концентрация примеси от источника фиксированной высоты H и мощности M , расположенного в точке $(0, 0, H)$ над плоской подстилающей поверхностью; \bar{u} — скорость ветра на уровне

источника; σ_y и σ_z — диффузионные коэффициенты, определяющие скорость расширения дымового факела по горизонтали и вертикали.

В работах Гиффорда [9] и Тарнера [11] для определения σ_y и σ_z использованы материалы диффузионных экспериментов, сгруппированные по классам устойчивости, которые определяются в зависимости от скорости ветра, времени суток и условий инсоляции в соответствии с табл. 1. При этом Гиффорд и Тарнер пришли к выводу, что для заданного класса устойчивости диффузионные коэффициенты зависят только от расстояния x от источника до точки наблюдения, причем коэффициент σ_y практически линейно растет с ростом x , а отношение σ_y/x близко к среднему квадратическому отклонению горизонтальных колебаний направления ветра Φ_0 [6].

Т а б л и ц а 1

Определение классов устойчивости по данным метеонаблюдений, по Пэсквиллу [10]

| Скорость ветра на уровне флюгера, м/с | День | | | Ночь | |
|---------------------------------------|-----------|-----------|--------|---|--|
| | инсоляция | | | тонкая сплошная облачность или облачность ⁴ / ₈ | облачность ³ / ₈ |
| | сильная | умеренная | слабая | | |
| 1 | A | A—B | B | — | — |
| 2—3 | A—B | B | C | E | F |
| 3—5 | B | B—C | C | D | E |
| 5—6 | C | C—D | D | D | D |
| 6 | C | D | D | D | D |

Несомненным достоинством изложенной схемы является ее простота и наглядность. Вместе с тем она страдает целым рядом существенных дефектов как с точки зрения обоснования, так и с точки зрения практической применимости. Обстоятельная критика гауссовского подхода дана в монографии [1] и статье [4], где показано, что этот подход по сути является сугубо эмпирическим, что препятствует обобщению его результатов в целом ряде практически важных случаев (диффузия в холмистой местности, вблизи водоемов и пр.). Поскольку даже в случае плоской подстилающей поверхности в гауссовской модели не учитываются существенные эффекты (например, зависимость диффузионных коэффициентов от H), ее применение приводит к значительным ошибкам в определении минимальной высоты дымовой трубы, позволяющей обеспечить выполнение стандартов чистоты атмосферного воздуха.

В работе [9] показано, что гауссовская модель не позволяет удовлетворительно описать распределение примеси по вертикали даже на сравнительно близких расстояниях от источника. В связи с этим высказывалось предположение, что (1) можно рассматривать как аппроксимационную формулу, описывающую приземное

поле концентраций примеси от источника фиксированной высоты. В данной статье это предположение анализируется в рамках подхода, связанного с использованием для описания переноса примеси в атмосфере уравнения турбулентной диффузии. Обоснование применимости такого подхода содержится в монографии [1], в которой, в частности, показано, что для обычно встречающихся метеорологических условий распределения концентрации примеси от источника высоты H задается соотношением

$$q = \frac{q'(x, z)}{\varphi_0 x \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{y^2}{2\varphi_0^2 x^2}}, \quad (2)$$

где концентрация примеси от линейного источника q' находится из уравнения

$$u \frac{\partial q'}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial z} k_z \frac{\partial q'}{\partial z} \quad (3)$$

с граничными условиями при $x = 0$ $q' = \frac{M}{u} \delta(z - H)$, при $z = 0$ $k_z \frac{\partial q'}{\partial z} = 0$, при $z \rightarrow \infty$ $q' \rightarrow 0$. В соответствии с [1] для скорости ветра u и коэффициента турбулентного обмена k_z можно воспользоваться аппроксимациями

$$u = u_1 \frac{\ln \frac{z + z_0}{z_0}}{\ln \frac{z_1 + z_0}{z_0}}; \quad k_z = \begin{cases} k_1 (z + z_0) & \text{при } z \leq h \\ k_1 (h + z_0) & \text{при } z > h, \end{cases} \quad (4)$$

где h — высота приземного слоя воздуха, z_0 — параметр шероховатости подстилающей поверхности, u_1 и k_1 — характеристики скорости ветра и коэффициента обмена на высоте $z_1 = 1$ м. В практических расчетах величина h может использоваться как независимый параметр или же определяться из предложенного в работе [7] приближенного соотношения

$$h = \frac{k_1}{10f}, \quad (5)$$

где f — параметр Кориолиса.

На основе численного решения (3) в [2] была получена аппроксимационная формула для координаты x'_M и величины максимума q'_M наземной концентрации q' от линейного источника при значениях h , обеспечивающих наибольшие q'_M , и фиксированном z_0 . В [5] было показано, что решение задачи (3), (4) имеет вид

$$q' |_{z=0} = \frac{M \ln \frac{z_1 + z_0}{z_0}}{u_1 H} F_1 \left(\frac{x}{x'_M}, \xi, \frac{z_0}{h} \right), \quad (6)$$

где

$$x'_m = LF_2\left(\xi, \frac{z_0}{h}\right);$$

$$\xi = \frac{H}{h}; \quad L = H\omega; \quad \omega = \frac{u_1}{k_1 \ln \frac{z_1 + z_0}{z_0}}; \quad (7)$$

и затабулированы функции F_1 и F_2 . На этой основе в [3] была предложена аппроксимация

$$F_1 = f_1(\xi) \left(\frac{x'_m}{x} e^{1 - \frac{x'_m}{x}} \right)^n; \quad (8)$$

$$F_2 = f_2(\xi). \quad (9)$$

Выполненное в последнее время методом сеток численное решение уравнения (3) с использованием замены переменных $\bar{x} = x$ и $\bar{z} = \int_0^z \frac{dz}{k_z}$, обеспечивающей измельчение сетки вблизи подстилающей поверхности, позволило уточнить приведенные в [3] аппроксимации для (8), (9):

$$f_1(\xi) = \begin{cases} 0,040 + \frac{0,047}{1 + 11,4\xi} e^{1,8 \left(\frac{\xi}{2}\right)^{1,5}} & \text{при } \xi \leq 2 \\ 0,040 + \frac{0,0675}{\xi + 3,5} & \text{при } \xi > 2 \end{cases}$$
$$f_2(\xi) = 5 + 3\xi^{1,2}; \quad (10)$$

$$n = \begin{cases} \frac{1 + 0,37\xi^{1,4}}{1 + 0,74\xi^{1,4}} & \text{при } x \leq x'_m \\ \frac{1 + 0,48\xi^{1,5}}{1 + 0,96\xi^{1,5}} & \text{при } x > x'_m \end{cases}$$

Формулы (6)—(10) позволяют в диапазоне $0,2 \leq \frac{x}{x'_m} \leq 10$ обеспечит

аппроксимацию численного решения (3) с погрешностью, не превосходящей 10%. На их основе может быть проанализирована применимость гауссовой модели (1) в рамках подхода, основанного на использовании уравнения турбулентной диффузии. При этом необходимо подчеркнуть, что правомерность такого подхода, а также выбора моделей для коэффициентов (4) неоднократно проверялась [1] путем сопоставления результатов расчетов с данными экспериментов вблизи промышленных источников, характеризующихся очень широким диапазоном высот дымовых труб и параметров выброса.

Поскольку в (1) и (2) распределения концентрации в направлении y после замены σ_y на $\varphi_0 x$ формально эквивалентны, целе-

сообразно в (1) также ограничиться рассмотрением приземных концентраций от линейного источника, записав их в виде

$$q' |_{z=0} = \frac{M \sqrt{2}}{\bar{u} \sigma_z \sqrt{\pi}} e^{-\frac{H^2}{2\sigma_z^2}}. \quad (11)$$

Перейдем для определения σ_z к уравнению, получающемуся приравняем (11) и (6). Вводя в этом уравнении новую переменную

$$t = \frac{H}{\sigma_z \sqrt{2}}, \quad (12)$$

получим

$$te^{-t^2} = \frac{\sqrt{\pi} \bar{u} \ln \frac{z_1 + z_0}{z_0}}{2u_1} F_1 \left(\frac{x}{x'_M}, \xi, \frac{z_0}{h} \right). \quad (13)$$

Левая часть (13) — непрерывная функция t , монотонно возрастающая от значения 0 при $t=0$ до максимального значения $(2e)^{-\frac{1}{2}} \approx$

$\approx 0,43$, достигаемого в точке $t = 2^{-\frac{1}{2}}$, а при дальнейшем увеличении аргумента монотонно убывающая до нуля. Отсюда ясно, что

решение уравнения $te^{-t^2} = \rho$ при $\rho > (2e)^{-\frac{1}{2}}$ не существует, т. е. при таких значениях правой части в (13) подобрать нужный диф-

фузионный коэффициент σ_z нельзя. При $\rho = (2e)^{-\frac{1}{2}}$ (13) имеет

единственное решение $t = 2^{-\frac{1}{2}}$, т. е., как видно из (12), $\sigma_z = H$, что соответствует в гауссовой модели точке максимума наземной

концентрации от линейного источника x'_M . Наконец, при $\rho < (2e)^{-\frac{1}{2}}$

уравнение (13) имеет два решения (t_1 и t_2), большее из которых (для определенности t_1) соответствует $x < x'_M$, а меньшее условию $x > x'_M$.

Если в рамках использованной модели для определения \bar{u} воспользоваться первой из формул (4), то (13) переписется в виде

$$te^{-t^2} = \frac{\sqrt{\pi}}{2} \ln \left(1 + \frac{H}{z_0} \right) F_1 \left(\frac{x}{x'_M}, \xi, \frac{z_0}{h} \right). \quad (14)$$

Отсюда ясно, что в случаях, когда это уравнение разрешимо, его решение (с учетом (6)) имеет вид

$$t = t \left(\frac{x}{L}, \xi, \frac{H}{z_0}, \frac{z_0}{h} \right), \quad (15)$$

причем, согласно (8)–(9), зависимость от последнего аргумента не существенна. Тогда из (12) следует, что σ_z определяется аргументами H , H/z_0 , ξ и $\frac{x}{L}$, т. е. зависит практически от всех входных параметров.

Более конкретную информацию о виде σ_z можно получить с использованием соотношений (8)–(10). В этом случае (14) перепиывается в виде

$$te^{-t^2} = \frac{\sqrt{\pi}}{2} \ln \left(1 + \frac{H}{z_0} \right) f_1(\xi) \left(\frac{x'_m}{x} e^{1 - \frac{x'_m}{x}} \right)^n. \quad (16)$$

Легко видеть, что максимальное значение фигурирующей в правой части (15) функции аргумента x достигается при $x = x'_m$ и равно

$$\frac{\sqrt{\pi}}{2} f_1 \xi \ln \left(1 + \frac{H}{z_0} \right).$$

Приравнявая эту величину максимальному значению левой части (2e)^{-1/2} получим уравнение для определения граничной высоты источника $H_{гр}$

$$H_{гр} = z_0 \left(e^{\frac{c}{f_1(\xi)}} - 1 \right), \quad (17)$$

где $c = \left(\frac{2}{\pi e} \right)^{\frac{1}{2}} \approx 0,484$ (поскольку функция $f_1(\xi)$ сравнительно мало меняется с ξ и в среднем может быть принята 0,052, $H_{гр} \approx \approx 1,1 \cdot 10^4 z_0$). В зависимости от соотношения H и $H_{гр}$ можно выделить три типа кривых $\sigma_z(x)$:

- а) $H = H_{гр}$ — существует непрерывная кривая $\sigma_z(x)$;
- б) $H < H_{гр}$ — кривая $\sigma_z(x)$ терпит разрыв в точке $x = x'_m$ при переходе с ветви t_1 на ветвь t_2 решения уравнения (13);
- в) $H > H_{гр}$ — в некоторой окрестности точки $x = x'_m$ решение $\sigma_z(x)$ не существует.

Полученные в результате решения уравнения (16) с использованием (5) графики $\sigma_z(x)$ при шероховатости $z_0 = 0,01$ м для различных значений высоты источника H , параметра стратификации ω (значение $\omega = 6,25$ соответствует адиабатическим условиям) и скорости ветра u_1 приведены на рис. 1. Пунктиром на этом же рисунке показаны определенные по эмпирическому материалу средние кривые для классов устойчивости А, С и F, заимствованные из [10]. Как видно, определенные из (16) значения $\sigma_z(x)$ могут отличаться от средних величин на порядок и более. При усреднении был снивелирован целый ряд характерных особенностей функции $\sigma_z(x)$ и, что еще более важно, исчезла зависимость этих функций от большого числа внешних параметров. Если попытаться учесть указанную зависимость, то окажется, что переход к гауссов-

ской форме записи не позволил сократить количество аргументов, которыми определяется поле концентрации примеси, т. е. не дал какого-либо выигрыша при систематизации экспериментального материала или результатов расчетов. Нефизичность аппроксимации (1) наглядно иллюстрируется разрывным характером кривых, приведенных на рис. 1. Использование же рекомендованных (например, в [11]) сглаженных зависимостей не позволяет учесть физически значимые эффекты, приводит к существенным погрешно-

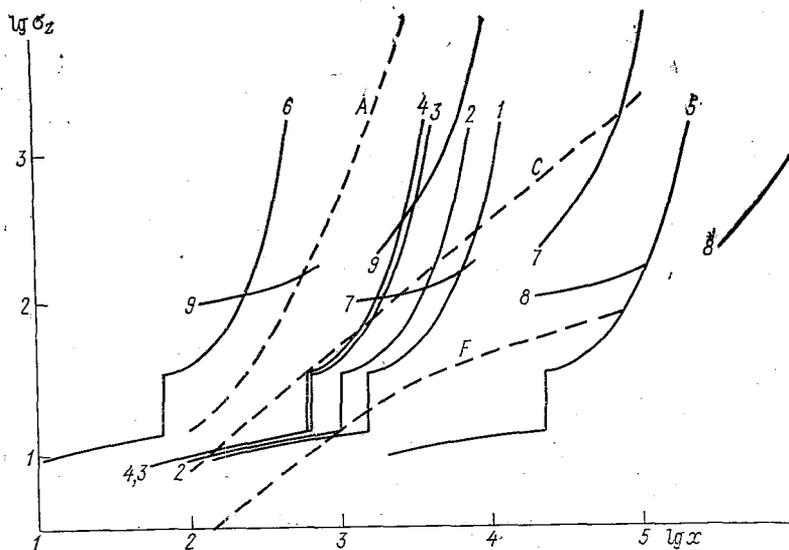


Рис. 1. Зависимость σ_z от расстояния до источника x при различных значениях параметров (штриховые кривые — значения σ_z по [11] для классов устойчивости A, C и F).

| | | | | | | | | | |
|-----------------------|------|------|------|------|----|-----|------|-----|-----|
| Кривая | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| H_m | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 200 | 200 | 200 |
| ω | 6,25 | 6,25 | 6,25 | 6,25 | 40 | 0,8 | 6,25 | 40 | 0,8 |
| u_1 , м/с | 0,5 | 1 | 5 | 10 | 1 | 1 | 5 | 1 | 1 |

стям в определении концентраций примеси, особенно, для высоких источников ($H > H_{гр}$).

Из сказанного следует, что для практических расчетов поля концентрации примеси от линейного и точечного источников при конкретных метеорологических условиях целесообразно пользоваться соотношениями (2) и (6) — (10), в которых условия рассеивания примеси задаются пятью параметрами $u_1, k_1, \varphi_0, z_0, h$ (последний из них в соответствии с (5) можно выразить через k_1), определяемыми, например, по данным градиентных наблюдений на теплобалансовых станциях. Вопрос о получении этих параметров на основе стандартной метеорологической информации нуждается в дополнительной проработке.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Берлянд М. Е. Современные проблемы атмосферной диффузии.— Л.: Гидрометеиздат, 1975.—448 с.
- ✓ 2. Берлянд М. Е., Генихович Е. Л., Оникул Р. И. О расчете загрязнения атмосферы выбросами из дымовых труб электростанций.— Труды ГГО, 1964, вып. 158, с. 3—21.
- ✓ 3. Берлянд М. Е., Генихович Е. Л., Оникул Р. И., Канчан Я. С., Чичерин С. С. О расчете среднегодовых концентраций примеси в атмосфере от промышленных источников.— Труды ГГО, 1979, вып. 417, с. 3—18.
4. Берлянд М. Е., Оникул Р. И. К проверке и сопоставлению методов расчета рассеивания примесей.— Труды ГГО, 1977, вып. 387, с. 23—36.
- ✓ 5. Генихович Е. Л., Чичерин С. С. Двухпараметрическая модель рассеивания примеси от линейного источника при нормальных метеорологических условиях.— Труды ГГО, 1979, вып. 417, с. 67—73.
6. Метеорология и атомная энергия (под ред. Л. Слейда).— Л.: Гидрометеиздат, 1971.—648 с.
7. Berlyand M. E., Genikhovich E. L. Some features of turbulent diffusion and air pollution in the stratified conditions.— In: Intern. Symp. on Stratified flows, Novosibirsk, 1972. N. Y., 1973, p. 125—144.
8. Gifford F. Use of routine meteorological observations for estimating atmospheric dispersion.— Nuclear Safety, 1961, N 2, p. 47—51.
9. Nieuwstadt F. T., van Ulden A. P. A numerical study on the vertical dispersion of passive contaminants from a continuous source in the atmospheric surface layer.— Atmos. Environ., 1978, vol. 12, N 11, p. 2119—2124.
10. Pasquill F. Atmospheric diffusion.— London: Van Nostrand, 1962.— 298 p.
11. Turner D. B. Workbook of atmospheric dispersion estimates.— NAPCA, 1969.— 84 p.

В. Б. Киселев

О ВЫЯВЛЕНИИ ИСТОЧНИКА, СОЗДАЮЩЕГО ПОВЫШЕННОЕ ЗАГРЯЗНЕНИЕ

Обеспечение необходимой чистоты воздушного бассейна требует постоянного контроля содержания вредных веществ в атмосфере и в случае превышения допустимых уровней загрязнения принятия оперативных мер по его снижению. Причинами появления высоких концентраций примеси вблизи поверхности земли могут быть либо увеличение выброса из одного из источников, либо возникновение неблагоприятной метеорологической обстановки. И в той и в другой ситуациях для снижения загрязнения необходимо выявить источник, уменьшая выброс которого можно наиболее эффективно довести содержание вредных веществ в атмосфере до допустимого. В первом случае это будет источник с повышенным значением выброса, во втором — источник, снижение выброса которого экономически наиболее целесообразно.

В настоящее время источник повышенного загрязнения определяют на основании данных о направлении ветра (см., например, [3]). Этот метод является эффективным лишь в случае, когда с наветренной стороны от точки, где наблюдается высокая концентрация примеси, имеется только один источник вредных веществ. В реальном промышленном центре, однако, почти при всех направ-

влениях ветра примеси поступают в точку наблюдения одновременно от нескольких источников, поэтому выяснить, выброс которого из них вызывает повышение концентрации только по направлению ветра, не представляется возможным.

В данной работе задача выявления источника повышенного загрязнения ставится как задача определения величин выбросов из источников по данным наземных наблюдений концентраций примесей. Полученные оценки позволяют установить, какой из источников превышает заданный для него предельно допустимый выброс и тем самым является причиной высокого загрязнения в точке наблюдения.

Предположим, что при заданных метеорологических условиях примесь поступает в точку наблюдения одновременно от двух источников. Наблюдаемую концентрацию в этом случае можно записать в виде

$$q = M_1 q_1 + M_2 q_2, \quad (1)$$

где M_1 и M_2 — мощности источников, q_1 и q_2 — концентрации, создаваемые в точке наблюдения источниками единичной мощности с остальными параметрами, совпадающими с параметрами реальных источников. Концентрации q_1 и q_2 зависят от значений метеорологических параметров и вследствие их пульсаций являются случайными величинами, соответственно q также является случайной величиной. Ее математическое ожидание μ и дисперсию σ^2 можно выразить через математические ожидания μ_1 и μ_2 и дисперсии σ_1^2 и σ_2^2 концентраций q_1 и q_2 :

$$\begin{aligned} \mu &= M_1 \mu_1 + M_2 \mu_2, \\ \sigma^2 &= M_1^2 \sigma_1^2 + M_2^2 \sigma_2^2 + 2\rho M_1 M_2 \sigma_1 \sigma_2. \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь $\rho = \frac{1}{\sigma_1 \sigma_2} (q_1 - \mu_1)(q_2 - \mu_2)$ — коэффициент корреляции q_1 и q_2 . Пусть измерена концентрация, превышающая допустимый уровень, и требуется определить, каковы при этом величины выбросов из источников. Если положить для простоты функцию распределения q гауссовой

$$f(q) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma} e^{-\frac{(q-\mu)^2}{2\sigma^2}}, \quad (3)$$

то функция правдоподобия [2] для величин M_1 и M_2 запишется в виде

$$\begin{aligned} L(M_1, M_2) = -\ln f = \frac{1}{2} \left\{ \ln(2\pi) + \ln(M_1 \sigma_1^2 + M_2 \sigma_2^2 + \right. \\ \left. + 2\rho M_1 M_2 \sigma_1 \sigma_2) + \frac{(M_1 \mu_1 + M_2 \mu_2 - q)^2}{M_1 \sigma_1^2 + M_2 \sigma_2^2 + 2\rho M_1 M_2 \sigma_1 \sigma_2} \right\}. \end{aligned} \quad (4)$$

Оценки максимального правдоподобия для M_1 и M_2 определяются из условий:

$$\frac{\partial L}{\partial M_1} = 0, \quad \frac{\partial L}{\partial M_2} = 0. \quad (5)$$

Для сокращения записи введем обозначения:

$$x = M_1 \frac{\sigma_1}{q}, \quad y = M_2 \frac{\sigma_2}{q},$$

$$\alpha = \frac{\mu_1}{\sigma_1}, \quad \beta = \frac{\mu_2}{\sigma_2}. \quad (6)$$

Тогда, отбрасывая несущественные в данном случае не зависящие от x и y слагаемые, получим для функции правдоподобия

$$L(x, y) = \frac{1}{2} \left\{ \ln(x^2 + y^2 + 2\rho xy) + \frac{(\alpha x + \beta y - 1)^2}{x^2 + y^2 + 2\rho xy} \right\}. \quad (7)$$

Система уравнений (5) после замены M_1 и M_2 переменными x и y и выполнения дифференцирования примет следующий вид:

$$x(1 + \alpha^2) + y(\alpha\beta + \rho) - \alpha = \frac{(x + \rho y)(\alpha x + \beta y - 1)^2}{x^2 + y^2 + 2\rho xy},$$

$$x(\alpha\beta + \rho) + y(1 + \beta^2) - \beta = \frac{(y + \rho x)(\alpha x + \beta y - 1)^2}{x^2 + y^2 + 2\rho xy}. \quad (8)$$

Как легко убедиться, предположение о равенстве нулю правых и левых частей уравнений (8) приводит к противоречию. Вследствие этого можно выполнить деление одного уравнения на другое, что после алгебраических преобразований приводит к соотношению

$$x = y \frac{\alpha - \beta\rho}{\beta - \alpha\rho}. \quad (9)$$

Переходя к исходным переменным, получим

$$\frac{M_1}{\sigma_2 \left(\mu_1 - \rho \mu_2 \frac{\sigma_1}{\sigma_2} \right)} = \frac{M_2}{\sigma_1 \left(\mu_2 - \rho \mu_1 \frac{\sigma_2}{\sigma_1} \right)}. \quad (10)$$

Из выражения (10) следует, что оценки выброса по наземным измерениям сравнительно сложным образом зависят от статистических характеристик создаваемых ими наземных концентраций. Как и следовало ожидать, выброс получается больше для источника с большим значением μ_i , т. е. для того источника, который при равных мощностях источников вносит больший вклад в загрязнение атмосферы в точке измерения. Менее очевидно, что выброс получается меньше для источника с большим значением σ_i . Это означает, что для источника, создающего сильно пульсирующее поле концентраций, более правдоподобно предполагать увеличение наземной концентрации за счет случайных отклонений от среднего значения, а не вследствие увеличения выброса. Поскольку pulsa-

ции концентраций связаны главным образом с пульсациями направления ветра, то их дисперсия уменьшается с увеличением ширины факела, т. е. с удалением от источника. Таким образом, оценка выброса будет больше для удаленного от точки наблюдения источника, при условии, конечно, что величины μ_i близки друг к другу.

Наличие положительной корреляции ($\rho > 0$) между концентрациями, создаваемыми источниками, усиливает ранее изложенные закономерности. Отрицательная же корреляция приведет к выравниванию оценок выбросов из источников. Например, при $\rho = -1$, $M_1 = M_2$.

Явные выражения для оценок выбросов можно получить, подставляя (9) в одно из уравнений (8) и решая квадратное уравнение. Окончательные формулы весьма громоздки и вследствие этого здесь не приводятся. Отметим только, что получаемые зависимости имеют вид:

$$M_1 = \frac{q}{\sigma_1} F_1 \left(\frac{\mu_1}{\sigma_1}, \frac{\mu_2}{\sigma_2} \right),$$

$$M_2 = \frac{q}{\sigma_2} F_2 \left(\frac{\mu_1}{\sigma_1}, \frac{\mu_2}{\sigma_2} \right), \quad (11)$$

где F_1, F_2 — алгебраические функции, т. е. оценка выброса пропорциональна величине наблюдаемой концентрации.

При выводе предлагаемых оценок выбросов использовалась информация только о наземной концентрации и метеорологических условиях (от которых зависят μ_i и σ_i). В то же время в практике часто известны также пределы изменения выбросов из источников. Поскольку при получении формул эта информация не использовалась, то вследствие наличия погрешностей измерения исходных данных и принятых допущений оценки одного из выбросов могут выходить за естественные границы. В этом случае следует положить выброс равным его граничному значению и определять оставшийся. Соответствующие формулы могут быть без труда получены изложенным методом.

Следует также обратить внимание на то, что предлагаемый метод дает лишь наиболее правдоподобные в заданной ситуации значения выбросов по единственному измерению наземной концентрации. Столь ограниченная информация, естественно, позволяет получить только ориентировочные оценки, дающие возможность спланировать дальнейшую работу. Уточнение оценок может быть достигнуто на основе привлечения информации о концентрациях в других точках, измерений в той же точке в последующие моменты времени, получения данных о технологических процессах на предприятиях и т. п.

В заключение остановимся на вопросе об исходных данных для использования предлагаемого метода. К ним относятся, помимо измеряемой концентрации q , величины μ_i, σ_i и коэффициент корреляции ρ . Для определения μ_i существуют хорошо проверенные на

экспериментальном материале расчетные методы [1] и ее получение не представляет существенных трудностей. Для σ_i разработаны отдельные теоретические модели, имеется возможность ее вычисления по существующим данным подфакельных наблюдений в районе одиночных источников и установления ее зависимости от метеорологических параметров. Наибольшие трудности вызывает получение величины ρ . Теоретических методов ее расчета не существует. Для расчета же ее по данным полевых наблюдений требуется либо постановка трассерного эксперимента, либо наблюдения в районе с двумя источниками, каждый из которых выбрасывает специфичную только для него примесь (если примесь одна и та же, то невозможно различить концентрации, создаваемые различными источниками в одной точке). Очевидна необходимость организации специальных исследований в этом направлении.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Берлянд М. Е. Современные проблемы атмосферной диффузии и загрязнения атмосферы.—Л.: Гидрометеонздат, 1975.—448 с.
2. Статистические методы в экспериментальной физике.—М.: Атомиздат, 1976.—335 с.
3. Graedel T. F. Distant source sensing by statistical treatment of air quality data.—Atmos. Environ., 1977, vol. 11, N 4, p. 313—319.

Л. В. Травкина, С. С. Чичерин

О СУТОЧНОМ И ГОДОВОМ ХОДЕ СОВМЕСТНЫХ ПОВТОРЯЕМОСТЕЙ СКОРОСТИ ВЕТРА И КОЭФФИЦИЕНТА ОБМЕНА В ПРИЗЕМНОМ СЛОЕ ВОЗДУХА

В последние годы интенсивно развиваются методы расчета осредненных за длительные периоды концентраций [4—6], требующие изучения распределений определяющих метеорологических параметров, в том числе направления и скорости ветра и коэффициента вертикальной турбулентной диффузии, при различных климатических условиях.

В настоящей статье основное внимание уделяется изучению характеристик совместных повторяемостей $P_2(k_1, u_2)$, коэффициента турбулентности k_1 на уровне 1 м и скорости ветра u_2 на уровне 2 м. Величины k_1 и u_2 определяются по данным градиентных наблюдений за скоростью ветра и температурой воздуха на теплобалансовых станциях [8]. Для станций Борисполь, Воейково, Коткино и Фрунзе изучается изменчивость распределений $P_2(k_1, u_2)$, построенных для отдельных сроков наблюдений теплого и холодного периодов 1974 г. Рассматриваются некоторые результаты изучения совместных повторяемостей скорости ветра u_2 и величины k_1/u_2 , характеризующей температурную стратификацию приземного слоя

атмосферы. Обсуждается также вопрос о связи распределения скорости ветра с направлением ветра.

В состав градиентных наблюдений входят измерения скорости ветра и температуры воздуха на уровнях 2 и 0,5 м. Расчет k_1 по значениям разностей температуры и скорости ветра на этих уровнях производится по схеме, предложенной в [2, 3]. Для быстрого определения k_1 при массовой обработке градиентных наблюдений используется приведенная в [6] номограмма.

В соответствии с [8] градиентные наблюдения проводятся в теплый период по шестисрочной программе, а в холодный — по двухсрочной. В табл. 1 приводится количество наблюдений и их пропусков (в процентах) за 1974 г. для рассматриваемых станций. Обработка проводится отдельно для теплого и холодного периодов. Большинство пропусков наблюдений связано с осадками.

Таблица 1

Количество наблюдений (числитель) и пропусков наблюдений (%) (знаменатель) в различные сроки за холодный и теплый периоды 1974 г.

| Станция | Продолжительность теплого периода, мес. | Холодный период | | Теплый период | | | | | | Число наблюдений за год |
|-----------|---|-----------------|------|---------------|------|------|------|------|------|-------------------------|
| | | 1 ч | 13 ч | 1 ч | 7 ч | 10 ч | 13 ч | 16 ч | 19 ч | |
| Борисполь | 7 | 124 | 114 | 190 | 183 | 189 | 188 | 187 | 191 | 1366 |
| | | 17,9 | 24,5 | 11,2 | 14,5 | 11,7 | 12,2 | 12,6 | 10,8 | |
| Воейково | 6 | 160 | 154 | 162 | 159 | 160 | 161 | 158 | 157 | 1271 |
| | | 11,6 | 14,9 | 12,0 | 13,6 | 13,1 | 12,5 | 14,1 | 14,7 | |
| Коткино | 5 | 108 | 113 | 100 | 108 | 115 | 117 | 121 | 106 | 888 |
| | | 49,2 | 46,7 | 34,7 | 29,7 | 24,8 | 23,6 | 20,9 | 30,7 | |
| Фрунзе | 9 | 73 | 80 | 256 | 250 | 256 | 259 | 252 | 250 | 1676 |
| | | 18,9 | 11,1 | 6,9 | 9,1 | 6,9 | 5,8 | 8,4 | 9,1 | |

На всех станциях, кроме Коткино, количество пропусков наблюдений в теплый сезон слабо изменяется от срока к сроку, что свидетельствует о примерно одинаковой повторяемости осадков во все сроки наблюдений в этот период.

Совместные распределения $P_2(k_1, u_2)$ построены для каждой станции в виде таблиц по градациям k_1 и u_2 для каждого срока отдельно за теплый и холодный сезоны. Градации составляли 0,05 м²/с для k_1 и 1 м/с для u_2 . Уменьшение градаций при построении таблиц повторяемостей для отдельных сроков нецелесообразно, поскольку общее количество наблюдений за каждый отдельный срок невелико, и это привело бы к уменьшению статистической обеспеченности полученных данных.

Построены также $P_2(k_1, u_2)$ в целом за теплый и холодный период и за год. При этом учитывается неравномерность сроков наблюдений в течение суток в теплый период и разная продолжительность теплого и холодного периодов. Совместная повторяемость за теплый период в целом получается осреднением повторяемостей с различными весами за отдельные сроки, причем веса принимаются равными: 1 для сроков 10, 13 и 16 ч, 1,5 для 7 и 19 ч и 2 для 1 ч. Годовые повторяемости получаются осреднением с весами, равными относительной продолжительности каждого периода в течение года.

В табл. 2 представлены полученные в результате обработки средние скорости ветра \bar{u}_2 , средние коэффициенты турбулентного обмена \bar{k}_1 и их средние квадратические отклонения σ_u и σ_k как для сроков каждого периода, так и в целом для теплого и холодного периодов и года. Из таблицы видно, что на всех рассматриваемых станциях \bar{u}_2 и \bar{k}_1 имеют значительный суточный ход, характеризующийся в теплый период большей амплитудой, чем в холодный. В теплый период \bar{k}_1 имеет большую суточную амплитуду, чем \bar{u}_2 . В холодный период эта амплитуда уменьшается, что особенно сильно выражено в Коткино. Следует отметить также некоторую асимметрию суточных ходов \bar{u}_2 и \bar{k}_1 (рост происходит медленнее, чем убывание), увеличивающуюся на северных станциях. Средние квадратические отклонения σ_u и σ_k слабо изменяются в течение суток и года за исключением Фрунзе, где в ночные сроки очень велика повторяемость значений $u_2 = 0 \div 1$ м/с и $k_1 < 0,05$ м²/с (92 % в холодное и 60 % в теплое время года). Это означает, если учесть суточный ход средних величин, что коэффициенты вариации u_2 и k_1 в дневное время меньше, чем в ночное.

Более подробно изучить изменение в течение суток стратификации приземного слоя воздуха можно, рассматривая совместные распределения $P'_2(k_1/u_2, u_2)$, построенные для отдельных сроков. Их анализ показывает, что при малых скоростях ветра в дневное время отношение k_1/u_2 распределяется с большей дисперсией, чем при больших скоростях. Сопоставление распределений $P_2(k_1, u_2)$ и $P'_2(k_1/u_2, u_2)$ показывает, что основным фактором, определяющим суточный ход k_1 , является (за исключением Фрунзе) скорость ветра. Это подтверждается тем, что среднее значение (k_1/u_2) почти не изменяется в дневные сроки и соответствует слабо неустойчивой стратификации, поскольку в среднем действие термического фактора ослабляется при увеличении скорости ветра.

В ночное время уменьшение скорости ветра на всех станциях сопровождается переходом к устойчивой стратификации. Причем в теплое время года наблюдаются более глубокие инверсии, чем в холодное, что, по-видимому, связано с изменением альbedo подстилающей поверхности.

Для ряда задач атмосферной диффузии [3] необходимо установить климатические нормы распределения определяющих метеорологических параметров, осредненные по многолетнему ряду наблю-

Средние скорость ветра \bar{u}_2 и коэффициент турбулентного обмена k_1 и их средние квадратические отклонения σ_k и σ_k

| Станция | Величина | Холодный период | | | | Теплый период | | | | | | | Год | | Среднее по всем годам |
|-----------|-------------|-----------------|------------|---------|-------|---------------|-------|-------|---------|-------|-------|-------|-------|--|-----------------------|
| | | 1 ч | | среднее | 1 ч | 13 ч | 16 ч | 19 ч | среднее | 1 ч | 13 ч | | | | |
| | | \bar{u}_2 | σ_k | | | | | | | | | | | | |
| Борисполь | \bar{u}_2 | 2,35 | 3,22 | 2,84 | 2,14 | 3,06 | 3,22 | 2,98 | 1,85 | 2,27 | 1,82 | 3,26 | 2,50 | | |
| | σ_k | 1,20 | 1,30 | 1,34 | 1,14 | 1,31 | 1,30 | 1,32 | 1,12 | 1,34 | 1,14 | 1,30 | 1,37 | | |
| | \bar{k}_1 | 0,102 | 0,147 | 0,124 | 0,130 | 0,156 | 0,157 | 0,153 | 0,108 | 0,124 | 0,093 | 0,153 | 0,124 | | |
| | σ_k | 0,060 | 0,068 | 0,068 | 0,055 | 0,069 | 0,060 | 0,066 | 0,058 | 0,064 | 0,058 | 0,064 | 0,066 | | |
| Воейково | \bar{u}_2 | 2,67 | 3,18 | 2,93 | 2,34 | 2,86 | 3,14 | 3,13 | 2,46 | 2,54 | 2,33 | 3,16 | 2,73 | | |
| | σ_k | 1,38 | 1,31 | 1,37 | 1,01 | 1,03 | 1,26 | 1,21 | 1,16 | 1,18 | 1,25 | 1,28 | 1,29 | | |
| | \bar{k}_1 | 0,058 | 0,084 | 0,071 | 0,077 | 0,106 | 0,114 | 0,110 | 0,072 | 0,080 | 0,051 | 0,099 | 0,076 | | |
| | σ_k | 0,039 | 0,047 | 0,045 | 0,037 | 0,040 | 0,046 | 0,049 | 0,050 | 0,050 | 0,037 | 0,049 | 0,048 | | |
| Коткино | \bar{u}_2 | 2,41 | 3,10 | 2,76 | 1,86 | 2,52 | 2,82 | 2,89 | 2,05 | 2,12 | 2,00 | 2,99 | 2,49 | | |
| | σ_k | 1,96 | 1,83 | 1,93 | 1,33 | 1,28 | 1,33 | 1,46 | 1,41 | 1,46 | 1,79 | 1,65 | 1,78 | | |
| | \bar{k}_1 | 0,069 | 0,090 | 0,079 | 0,102 | 0,137 | 0,154 | 0,156 | 0,110 | 0,110 | 0,067 | 0,116 | 0,093 | | |
| | σ_k | 0,064 | 0,064 | 0,065 | 0,069 | 0,073 | 0,075 | 0,078 | 0,068 | 0,079 | 0,066 | 0,076 | 0,073 | | |
| Фрунзе | \bar{u}_2 | 0,63 | 1,55 | 1,09 | 0,92 | 1,62 | 1,90 | 1,70 | 1,03 | 1,26 | 0,88 | 1,81 | 1,22 | | |
| | σ_k | 0,27 | 0,71 | 0,71 | 0,60 | 0,83 | 0,83 | 0,74 | 0,77 | 0,80 | 0,52 | 0,82 | 0,78 | | |
| | \bar{k}_1 | 0,022 | 0,086 | 0,057 | 0,045 | 0,100 | 0,113 | 0,093 | 0,046 | 0,063 | 0,031 | 0,106 | 0,062 | | |
| | σ_k | 0,005 | 0,038 | 0,040 | 0,032 | 0,042 | 0,043 | 0,041 | 0,042 | 0,047 | 0,016 | 0,044 | 0,045 | | |

дений [1, 7]. В частности, большой интерес представляет вопрос о зависимости распределения u от направления ветра φ . О годовом распределении $P'(u)$ можно предположить, что приближенно оно не зависит от направления ветра для станций, расположенных на открытой ровной местности, для которых не характерно наличие местных ветров. В этом случае плотность совместного распределения $P(\varphi, u)$ направления и скорости ветра представляется в виде произведения плотностей одномерных распределений

$$P(\varphi, u) = P_1(\varphi) P'(u). \quad (1)$$

Это соотношение проверялось на материалах Справочника по климату СССР [9]. Для соответствующей обработки была выбрана метеорологическая станция Николаевское (Ленинградская обл.), которая расположена на равнинной местности и характеризуется малой защищенностью флюгера (флюгер выше окружающих предметов при всех направлениях ветра, присутствуют отдельные элементы защищенности).

В табл. 3 приведены среднегодовые значения накопленной повторяемости скорости ветра $F_\varphi(u)$ для каждого румба:

$$F_\varphi(u) = \int_0^u P'_\varphi(u) du. \quad (2)$$

Эти значения нормированы на суммарную повторяемость ветра в данном румбе:

$$F_\varphi(\infty) = \int_0^\infty P'_\varphi(u) du = P_1(\varphi). \quad (3)$$

В этой же таблице приведены классы открытости по классификации В. Ю. Милевского из [9] и средняя скорость ветра \bar{u}_φ для каждого румба.

Таблица 3

Накопленная повторяемость скорости ветра по градациям для различных румбов (ст. Николаевская)

| u м/с | С | СВ | В | ЮВ | Ю | ЮЗ | З | СЗ | По всем румбам |
|-----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----------------|
| 1,5 | 0,244 | 0,271 | 0,282 | 0,227 | 0,202 | 0,143 | 0,137 | 0,180 | 0,196 |
| 5,5 | 0,844 | 0,862 | 0,859 | 0,848 | 0,816 | 0,770 | 0,835 | 0,874 | 0,831 |
| 9,5 | 0,986 | 0,986 | 0,969 | 0,993 | 0,985 | 0,984 | 0,993 | 0,994 | 0,987 |
| 13,5 | 0,997 | 0,999 | 1 | 1 | 0,999 | 0,999 | 0,999 | 0,999 | 0,999 |
| 17,5 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| $P_1(\varphi) \%$ | 10,9 | 8,5 | 6,6 | 11,3 | 14,5 | 19,1 | 16,2 | 12,9 | 100 |
| \bar{u}_φ м/с | 3,52 | 3,36 | 3,41 | 3,51 | 3,74 | 4,10 | 3,81 | 3,53 | 3,62 |
| Класс открытости | 66 | 66 | 76 | 76 | 66 | 66 | 66 | 76 | |

Как видно из таблицы, функции распределения для отдельных румбов мало различаются между собой при $u > 1,5$ м/с, в то время как повторяемость направления ветра $P_1(\varphi)$ изменяется от 6,6 % (В) до 19,1 % (ЮЗ).

Величины средних для каждого румба скоростей ветра \bar{u}_φ также слабо зависят от направления ветра. Коэффициент вариации для \bar{u}_φ по всем румбам (отношение среднего квадратического отклонения к среднему значению) составляет 0,06.

Справедливость соотношения (1) проверялась непосредственно восстановлением накопленной повторяемости скорости ветра для различных румбов. В табл. 4 приводятся повторяемости, взятые из Справочника [9] (числитель) и восстановленные по формуле (1) (знаменатель). Наибольшие расхождения отмечаются для градации 2—5 м/с и составляют для юго-западного румба 1,17 %. Это подтверждает предположение о приближенной независимости распределения скорости ветра от направления ветра на примере выбранной станции, что значительно упрощает анализ совместных распределений метеорологических параметров.

Таблица 4

Фактические (числитель) и рассчитанные (знаменатель) значения накопленной повторяемости (%) скорости ветра для различных румбов

| u м/с | С | СВ | В | ЮВ | Ю | ЮЗ | З | СЗ |
|---------|-------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1,5 | 2,65 | 2,30 | 1,86 | 2,56 | 2,94 | 2,73 | 2,24 | 2,32 |
| | 2,13 | 1,67 | 1,29 | 2,21 | 2,84 | 3,75 | 3,18 | 2,53 |
| 5,5 | 9,17 | 7,34 | 5,66 | 9,55 | 11,84 | 14,72 | 13,56 | 11,27 |
| | 9,03 | 7,08 | 5,48 | 9,36 | 12,05 | 15,89 | 13,51 | 10,72 |
| 9,5 | 10,72 | 8,40 | 6,39 | 11,8 | 14,28 | 18,81 | 16,14 | 12,82 |
| | 10,73 | 8,41 | 6,51 | 11,12 | 14,32 | 18,87 | 16,04 | 12,73 |
| 13,5 | 10,83 | 8,51 | 6,60 | 11,25 | 14,49 | 19,09 | 16,23 | 12,88 |
| | 10,86 | 8,51 | 6,60 | 11,25 | 14,49 | 19,09 | 16,23 | 12,88 |
| 17,5 | 10,87 | 8,52 | 6,60 | 11,26 | 14,50 | 19,12 | 16,25 | 12,89 |
| | 10,87 | 8,52 | 6,60 | 11,26 | 14,50 | 19,12 | 16,25 | 12,89 |

Результаты настоящей статьи используются в работе [7] при расчете средних концентраций и анализе их зависимости от климатических условий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Безуглая Э. Ю., Клинго В. В. Статистический метод оценки влияния метеорологических условий на содержание примесей в атмосфере.— Труды ГГО, 1974, вып. 314, с. 31—36.
2. Берлянд М. Е., Генихович Е. Л. Особенности турбулентной диффузии и загрязнения воздуха в условиях стратифицированной атмосферы.

- Международный симпозиум по стратифицированным течениям.— Новосибирск, Изд-во ВЦ СО АН СССР, 1972.—22 с.
3. Берлянд М. Е. Современные проблемы атмосферной диффузии и загрязнения атмосферы.— Л.: Гидрометеиздат, 1975.—448 с.
 4. Берлянд М. Е. и др. Опасные условия рассеивания примеси и расчет концентраций от разного типа источников. Тезисы докладов Международного симпозиума по метеорологическим аспектам загрязнения атмосферы. Ленинград, 11—19 марта 1977 г./М. Е. Берлянд, Е. Л. Генихович, М. Н. Зашихин, Р. И. Оникул, С. С. Чичерин.— Л.: Изд. ГГО, 1977, с. 27.
 5. Берлянд М. Е. и др. О расчете среднегодовых концентраций примеси в атмосфере от промышленных источников/М. Е. Берлянд, Е. Л. Генихович, Я. С. Канчан, Р. И. Оникул, С. С. Чичерин.— Труды ГГО, 1979, вып. 417, с. 3—18.
 6. Берлянд М. Е. и др. К теоретической оценке годового и суточного хода загрязнения воздуха при различных климатических условиях/М. Е. Берлянд, Я. С. Канчан, Р. И. Оникул, С. С. Чичерин.— См. наст. сборник.
 7. Грачева В. П. О территориальном распределении максимальных значений коэффициента турбулентного обмена в приземном слое атмосферы. Труды ГГО, 1979, вып. 417, с. 96—104.
 8. Руководство по теплобалансовым наблюдениям.— Л.: Гидрометеиздат, 1977.—150 с.
 9. Справочник по климату СССР, ч. III. Ветер, вып. 3.—Л.: Гидрометеиздат, 1966.— 272 с.

В. Д. Степаненко, Б. И. Вдовин

О СОВЕТСКО-АМЕРИКАНСКОМ ЭКСПЕРИМЕНТЕ ПО ИССЛЕДОВАНИЮ УСЛОВИЙ ОБРАЗОВАНИЯ И ТРАНСФОРМАЦИИ ЕСТЕСТВЕННОГО АЭРОЗОЛЯ — АФАЭКС-79

В соответствии с Меморандумом VII сессии смешанной советско-американской комиссии по сотрудничеству в области охраны окружающей среды (Москва, Ленинград — февраль 1979 г.), а также согласно протоколу заседания рабочей группы 02.01-10 «Моделирование загрязнения атмосферы, приборы и методология измерений» и Соглашению о порядке проведения эксперимента (подписанные в Вашингтоне в мае 1979 г.) в июле 1979 г. в СССР был проведен Абастуманский фоновый аэрозольный эксперимент. С советской стороны в нем участвовали 76, а с американской 5 специалистов. Советские специалисты представляли следующие учреждения: Государственный комитет СССР по гидрометеорологии и контролю природной среды, Главную геофизическую обсерваторию им. А. И. Воейкова, Институт прикладной геофизики, Грузинское республиканское управление по гидрометеорологии и контролю природной среды, Лабораторию мониторинга окружающей среды и климата, Институт физики атмосферы АН СССР, Институт физики АН Литовской ССР, Абастуманскую астрофизическую обсерваторию АН Грузинской ССР (ААО), Институт ботаники АН Грузинской ССР, Институт биохимии растений АН Грузинской ССР.

Американская сторона была представлена двумя специалистами

из Научно-исследовательского центра Агентства по охране окружающей среды в Северной Каролине, одним специалистом из Вашингтонского государственного университета и двумя специалистами из университета штата Вашингтон. Эксперимент проводился с 3 по 27 июля 1979 г.

Для подготовки и проведения эксперимента совместными решениями Госкомгидромета и АН СССР был утвержден Межведомственный оргкомитет. Председателем комитета являлся директор Абастуманской астрофизической обсерватории АН Грузинской ССР, президент АН Грузинской ССР академик Е. К. Харадзе.

Для осуществления научного и организационного руководства экспериментом была создана комиссия по его проведению.

Основной целью эксперимента было комплексное прослеживание процессов, приводящих к образованию естественного атмосферного аэрозоля и его изменениям под влиянием метеорологических и других факторов в условиях лесистой местности, когда антропогенным влиянием практически можно пренебречь.

Исследование природного аэрозоля представляет значительный интерес в связи с той большой ролью, которую он играет во многих процессах, происходящих в атмосфере. Естественный аэрозоль образует фон, на котором происходит загрязнение воздуха, вызванное антропогенными факторами. Происходящие при этом внутриатмосферные реакции, по-видимому, имеют характер, аналогичный процессам образования фотохимического смога. Таким образом, выявление механизмов образования и трансформации естественного аэрозоля может способствовать более ясному пониманию процессов образования смогов и в определенной мере возможности искусственного воздействия на него.

Природный аэрозоль оказывает непосредственное биологическое влияние на животный и растительный мир, действует как климатический фактор, участвуя в процессах радиационного теплообмена и влагообмена, является носителем атмосферного электричества и радиоактивности. Внутриатмосферный синтез аэрозоля играет существенную роль в процессах преобразования и удаления из атмосферы примесных газов.

Несмотря на то что естественные аэрозоли имеют различную химическую природу и происхождение, процессы их внутриатмосферного синтеза определяются (другой вопрос, каким образом) рядом постоянно действующих факторов. Это прежде всего процессы проникновения в атмосферу, переносы и рассеяние газов предшественников и оксидантов, а также продуктов их взаимодействия.

Химические преобразования, приводящие к возникновению аэрозолей, происходят под влиянием солнечного облучения (в особенности его ультрафиолетовой части). На ход реакций существенное влияние оказывают температура и влажность воздуха. Каталитическое действие могут оказать также уже имеющиеся в атмосфере аэрозоли. Дальнейшая трансформация аэрозолей вследствие процессов конденсации, коагуляции, фазовых превращений и, нако-

нец, их удаление из атмосферы в сильной мере определяется метеорологическими условиями. Уже этот (далеко не полный) перечень указывает на большую сложность поставленной задачи и определяет необходимость комплексного подхода к ее решению.

Одним из важнейших требований к постановке эксперимента является то, что он должен проходить в лесистой местности вдали от промышленных зон. Таким требованиям вполне отвечал выбранный район.

Результаты эксперимента должны позволить выяснить конкретные механизмы внутриатмосферного синтеза и развития субмикронной фракции в указанных условиях, а также определить физические и химические характеристики частиц этой фракции, включая ее оптические и радиационные параметры. Научная программа эксперимента предусматривала:

- измерение и исследование газовых аэрозолеобразующих примесей;
- получение метеорологической и аэрологической информации;
- исследование атмосферного аэрозоля в пробах и в естественном состоянии;
- лидарные измерения;
- вспомогательные измерения.

В процессе эксперимента использовалось весьма сложное, а в ряде случаев уникальное оборудование и приборы. Общее число приборов и вспомогательной аппаратуры достигало 80 (50 с советской и 30 с американской стороны).

В настоящей статье рассматривается главным образом участие Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова (ГГО) в проведении данного эксперимента.

Сотрудники ГГО совместно со специалистами Грузинской УГКС полностью обеспечили выполнение раздела, связанного с получением метеорологической и аэрологической информации, анализом погодных условий во время эксперимента и выявлением специфики этих условий с точки зрения их влияния на образование, трансформацию и перенос естественного аэрозоля, производили измерения среднесуточных концентраций SO_2 , ядер конденсации и лидарные исследования аэрозоля.

Как было отмечено выше, процессы образования и трансформации естественного аэрозоля во многом определяются метеорологическими условиями. Поэтому одним из важнейших разделов программы эксперимента явились метеорологические и аэрологические наблюдения. При составлении их программы был учтен опыт экспериментальных работ [1, 3], накопленный в отделе исследования атмосферной диффузии и загрязнения атмосферы.

Наряду с задачами исследования условий рассеяния и переноса примеси (которая обычно ставится при исследовании загрязнения воздуха промышленными выбросами) необходимо было выявить метеорологические факторы, способствующие протеканию фотохимических реакций, которые приводят к образованию аэрозоля. В целом задача сводилась в получении возможно более подробной

информации о метеорологическом режиме как непосредственно в пункте измерений, так и на большой территории, анализу погодных условий для оперативной интерпретации результатов и прогноза погоды при планировании режима наблюдений.

Прогнозы погоды по району Абастумани, а также траектории воздушных масс за предыдущие три дня на уровне 850 и 700 гПа ежедневно составлялись и передавались в адрес ААО Тбилиским бюро погоды.

Важным разделом программы было исследование режима горно-долинной циркуляции, определяющей условия локального переноса, а также стратификации температуры в нижнем 2—3-километровом слое, которая обуславливает рассеяние примеси по вертикали. С этой целью в долине в пос. Абастумани был организован временный пункт температурно-ветрового зондирования, в котором работали две группы: группа радиозондирования (руководитель Т. М. Сарджвеладзе) и шаропилотная группа (руководитель Г. К. Кекелидзе). Методическое руководство наблюдениями осуществлялось сотрудником ГГО Б. И. Вдовиным.

Радиозондирование проводилось ежедневно три раза в сутки (в 6, 13 и 20 ч) с помощью системы «Метеор» — РКЗ.

Шаропилотные наблюдения проводились с одного пункта. При этом шары-пилоты выпускались ежедневно в 8, 10, 12, 14, 16, 18 и 20 ч. В дополнение к этому в Обсерватории на горе Канобили на мачте ретранслятора на высоте 20 м (примерно на 2—3 м выше крон деревьев) был установлен датчик анеморумбографа М-63МР. Это позволило уточнить моменты начала и прекращения склонового потока вдоль юго-восточного склона горы Канобили, что было необходимо для выявления возможного влияния выноса загрязненного воздуха из поселка Абастумани. Данные ветровых наблюдений показали, что в долине Абастумани четко выражена горнодолинная циркуляция. При этом долинный поток возникает в 7—9 ч и быстро достигает мощности 300—500 м при средней скорости 2—4 м/с. Смена ветра на горный происходит, как правило, резко во всем слое в 14—16 ч. При этом скорость ветра вблизи земли кратковременно возрастает до 6—10 м/с. По данным шаропилотных наблюдений и по записи анеморумбографа в первой половине дня хорошо прослеживается наличие потока из долины Абастумани вдоль юго-восточного склона горы Канобили. Возникновение этого потока в условиях относительно устойчивой стратификации в утренние часы может способствовать переносу загрязненного воздуха из поселка в точку измерений.

В пункте отбора проб на горе Канобили с помощью автоматической установки, разработанной и изготовленной в ГГО, каждые 10 мин на перфоленду записывались значения температуры сухого и смоченного термометров и скорости ветра. На следующий день полученные данные обрабатывались в вычислительном центре ААО, что позволяло оперативно использовать полученную информацию. Эти наблюдения дублировались записью термографа и гигрографа, которые были установлены поблизости в будке для самописцев.

При измерениях среднесуточных концентраций сернистого газа (выполненных З. Г. Тульчинской) применялся модифицированный метод Веста и Гейка с использованием сорбционных трубок [2].

В основном среднесуточная концентрация SO_2 находилась в пределах 0,04—0,22 мкг/м³, что говорит о весьма низком фоновом уровне загрязнения воздуха сернистым газом в период проведения эксперимента.

В период с 13 по 27 июля проводились измерения концентрации частиц Айткена с помощью счетчика Шольца малой модели (М. А. Беляшова).

Всего было выполнено 167 серийных наблюдений, во время которых было сделано 1670 определений концентраций частиц. В среднем концентрация частиц Айткена в данное время в Обсерватории на метеорологической площадке составила $1,5 \cdot 10^3 \text{ см}^{-3}$.

Лазерное зондирование атмосферы осуществлялось В. А. Ковалевым, А. Д. Егоровым и Е. Е. Рыбаковым. Оно проводилось с целью контроля оптического состояния атмосферы в зоне проведения эксперимента. Комплекс аппаратуры лидарного зондирования состоял из следующих блоков:

— передатчика на кристалле рубина, фотоэлектрического приемника и оптической системы;

— блока управления лидаром, обеспечивающим управление его работой и осуществляющим контроль за нормальным функционированием систем лидара;

— запоминающего осциллографа и полуавтоматической камеры ФАРМ-2а для фоторегистрации эхо-сигналов.

Основные характеристики лидара: энергия излучения в импульсе 0,1—0,15 Дж; длительность зондирующего импульса 30 нс; длина волны 0,69 мкм; угол расходимости луча лазера 2'; угол поля зрения приемника 3'; диапазон расстояний при измерении параметров аэрозоля 0,3—1,0 км; минимально регистрируемая мощность эхо-сигналов 10^{-8} Вт.

Цель лидарного зондирования — выявление пространственных и временных неоднородностей на горизонтальных и наклонных трассах, а также количественная оценка коэффициента ослабления атмосферного воздуха. За время эксперимента было проведено 500 зондирований в горизонтальных и наклонных направлениях. Параллельно с лидарным зондированием атмосферы проводился отбор проб аэрозолей на фильтр для последующего сравнения с результатами измерений распределения числа частиц по размерам с помощью фотоэлектрического счетчика «Роусо», используемого американскими специалистами.

В настоящее время проводится обработка полученных данных. Предварительный анализ результатов за 4 и 9 июля 1979 г. указывает на пространственно-временную стабильность указанных выше оптических характеристик в пределах дальности действия лидара. Значения коэффициента ослабления по данным лидарного зондирования находились в пределах $0,2 \text{ км}^{-1}$ и менее.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Берлянд М. Е. Современные проблемы атмосферной диффузии и загрязнение атмосферы.— Л.: Гидрометеиздат, 1975.—448 с.
2. Вольберг Н. Ш., Тульчинская З. Г. Определение двуокси серы в атмосфере паразозанилин-формальдегидным методом с отбором проб сорбционными трубками.— Труды ГГО, вып. 352, 1975, с. 163—168.
3. Петренчук О. П. Экспериментальные исследования атмосферного аэрозоля.— Л.: Гидрометеиздат, 1979.—263 с.

Л. Г. Хуршудян, И. В. Некрасов

СОВЕТСКО-АМЕРИКАНСКИЙ ЭКСПЕРИМЕНТ В АЭРОДИНАМИЧЕСКОЙ ТРУБЕ ПО МОДЕЛИРОВАНИЮ ВОЗДУШНОГО ПОТОКА И РАССЕЯНИЯ ПРИМЕСЕЙ В ХОЛМИСТОЙ МЕСТНОСТИ

В связи со значительными трудностями математического моделирования воздушного потока и рассеяния примесей над неоднородной подстилающей поверхностью и необходимостью больших финансовых затрат и затрат рабочего времени (а также и в связи с трудностями обобщения результатов) при проведении натурных экспериментов существенное развитие получило использование аэродинамических труб для этих исследований. Эксперименты в аэродинамических трубах имеют такие преимущества, как легкость фиксации и изменения значений управляющих параметров, воспроизводимость результатов, которые отсутствуют в экспериментах в реальной атмосфере.

При использовании аэродинамических труб для изучения рассеяния примеси в холмистой местности существует два основных подхода. Первый из них заключается в исследовании конкретных топографических районов (обычно мест расположения существующих или проектируемых промышленных предприятий или других источников загрязнения атмосферы). Второй заключается в рассмотрении идеализированных случаев с целью выявления основных закономерностей и определяющих параметров. То же самое относится и к исследованию воздушных течений в местности со сложным рельефом. Хотя первый подход можно использовать для решения некоторых конкретных вопросов, возникающих в практике разработки и реализации мероприятий по защите атмосферы от загрязнения (необходимо отметить, что в этом случае очень важен вопрос об обоснованности применения выводов, полученных в результате экспериментов в аэродинамической трубе, к натурным условиям, ответ на который зачастую может быть далеко не простым), второй подход, требуя в принципе больших усилий и затрат времени, в то же время позволяет более глубоко исследовать изучаемые явления и в конечном итоге более эффективен с точки зрения обобщения результатов и определения закономерностей рас-

смаатриваемых явлений. Данный подход в течение ряда лет развивался в СССР в совместных работах ГГО и Института механики МГУ [1, 4, 5], а также в исследованиях, проводимых в лаборатории гидродинамического моделирования Агентства по охране окружающей среды США в Ресёрч Трайэнгл Парк [6—8].

В соответствии с Меморандумом VII сессии смешанной советско-американской комиссии по сотрудничеству в области охраны окружающей среды (Москва, 29 января—2 февраля 1979 г.) в мае—сентябре 1979 г. в лаборатории гидродинамического моделирования Центра исследований окружающей среды Агентства по охране окружающей среды (ЦИОС АООС) США в Ресёрч Трайэнгл Парк (штат Северная Каролина) был проведен совместный советско-американский эксперимент в аэродинамической трубе по изучению воздушного потока и рассеяния примесей в холмистой местности. В эксперименте принимали участие с советской стороны Л. Г. Хуршудян (ГГО) и И. В. Некрасов (Институт механики МГУ), с американской стороны В. Г. Снайдер — руководитель лаборатории гидродинамического моделирования, а также другие специалисты этой лаборатории.

Исследования воздушного потока и рассеяния примесей в холмистой местности, выполненные до последнего времени, в основном относились либо к пологим холмам, когда отрыв пограничного слоя на подветренном склоне холмов не происходит [4, 7], либо к холмам большой крутизны, когда можно ожидать отрыв пограничного слоя за холмом [4, 6, 8]. Как с научной, так и с практической точки зрения значительный интерес представляет изучение холмов умеренной крутизны (промышленные объекты, являющиеся источниками загрязнения атмосферы, относительно редко располагаются вблизи элементов рельефа с очень крутыми склонами), которые ранее в специальных метеорологических аэродинамических трубах практически не изучались. В связи с этим в описываемом эксперименте было проведено изучение воздушных потоков и рассеяния примеси именно около холмов умеренной крутизны.

Параллельно с экспериментальными работами в аэродинамической трубе проводились численные расчеты на ЭВМ наземных концентраций примеси от источника, расположенного вблизи холма (а также над ровной подстилающей поверхностью). Параметры, определяющие набегающий поток, поверхность холма и расположение источника, в экспериментах и численных расчетах соответствовали друг другу. Расчеты концентраций примеси производились на основе теоретических моделей, разработанных в СССР [2, 3].

Метеорологическая аэродинамическая труба лаборатории гидродинамического моделирования ЦИОС АООС США построена в 1974 г. специально для проведения работ по моделированию атмосферного пограничного слоя и рассеяния в нем примесей. Она представляет собой трубу незамкнутого типа с закрытой рабочей частью прямоугольного сечения 3,7 м шириной и 2,1 м высотой. Длина рабочей части составляет 18,3 м. Скорость набегающего по-

тока может варьироваться от 0,5 до 10 м/с. Потолок рабочей части трубы может изменять свою форму, чтобы компенсировать горизонтальный градиент давления в потоке, создаваемый помещенной в аэродинамическую трубу моделью. Пограничный слой (нейтрально стратифицированный) создается в трубе с помощью вертикально установленного на входе в рабочую часть барьера и элементов шероховатости, распределенных по полу рабочей части трубы. В качестве таких элементов обычно (и в описываемом эксперименте в том числе) используется строительный гравий с диаметром зерен 10 мм и меньше. Высота развитого пограничного слоя, создаваемого этими элементами шероховатости и барьером высотой 15,3 см, составляет приблизительно 1 м. Развитие пограничного слоя происходит на первых 7—8 м от начала рабочей части, далее он стабилизируется и изменяется вниз по потоку незначительно.

Характеристики воздушного потока и рассеяния примеси исследовались в данном эксперименте около нескольких одиночных двумерных холмов (форма поверхности не изменяется в поперечном относительно набегающего потока направлении) подобной конфигурации, но с различной крутизной склонов. Эти холмы имеют конечную ширину $2a$ (по горизонтальной координате x , соответствующей направлению набегающего потока) и переходят в плоскость при $|x| > a$. Поверхность холма не имеет угловых точек и симметрична относительно его середины ($x = 0$). Было выбрано три холма со средней крутизной склонов $n = 3, 5, 8$ ($n = a/h_0$, a — полуширина холма, h_0 — его наибольшая высота).

В программу эксперимента входили:

1) измерения вертикальных профилей горизонтальной составляющей средней скорости потока, угла между направлением среднего потока и горизонталью, интенсивностей турбулентности и напряжений Рейнольдса в различных местоположениях относительно холма;

2) измерения наземных концентраций, а также вертикальных и поперечных профилей концентрации примеси от приподнятого точечного источника без начального подъема (высоты источника составляли 0,25, 0,5, 1,0, 1,5 высоты холма; помещался он над наветренным и подветренным подножиями холма, а также над его вершиной);

3) измерения характеристик воздушного потока и концентраций примеси от источников различной высоты над ровной подстилающей поверхностью.

Измерения характеристик воздушного потока производились с помощью термоанемометров с проволочными датчиками. Так как с помощью проволочных датчиков нельзя определить направление потока, в зоне, где существовал обратный средний поток, для измерения его скорости использовались также трубки Пито с двумя наконечниками, направленными в противоположные стороны. В качестве примеси использовался высоко чистый этилен (C_2H_4). Концентрации определялись пламенно ионизационными газоана-

лизаторами углеводородов. Источник без начального подъема примеси моделировался с помощью вертикально установленной трубочки, изогнутой под углом 90° в сторону движения набегающего потока. Так как в случае наличия холма направление воздушного потока может отличаться от горизонтального, то для предотвращения струйного характера истечения газа из трубочки в направлении, расходящемся с направлением воздушного потока, на изогнутый конец трубочки был надет шарик, изготовленный из пористого материала. В результате этилен вытекал в сносящий воздушный поток с очень небольшой начальной скоростью (около 4 % скорости воздушного потока).

Сигналы приборов во время измерений непосредственно поступали в мини-ЭВМ, которая их оцифровывала и обрабатывала. Данные хранились во внешней памяти этой ЭВМ. В ее математическом обеспечении имеется ряд программ, которые позволяют распечатывать полученные данные, проводить на их основе определенный анализ изучаемого в аэродинамической трубе явления, а также строить графики.

Детально оборудование лаборатории гидродинамического моделирования (аэродинамическая труба—приборы—мини-ЭВМ) ЦИОС АОС США в Ресёрч Трайэнгл Парк описано в [9].

В результате проделанных работ накоплен большой экспериментальный материал. Можно отметить, что такие подробные данные о свойствах воздушного течения и рассеяния примеси от приподнятого точечного источника около двумерных холмов получены впервые. Одной из существенных особенностей описываемого исследования является одновременное с экспериментом в аэродинамической трубе выполнение численных расчетов по теоретическим моделям и сравнение экспериментальных и расчетных результатов. Анализ полученных данных показывает существенное влияние холмов (даже наиболее пологого из исследованных с $n=8$) на рассеяние примеси от низких источников. Особенно это влияние значительно в случае более крутых холмов ($n=3$), на подветренном склоне которых происходит отрыв пограничного слоя и образуется циркуляционная зона (турбулентность в ней сильно увеличена). Максимальная наземная концентрация от источников, расположенных над подветренным подножием холма, во много раз больше в этом случае, чем при рассеянии примеси над ровной подстилающей поверхностью.

Результаты выполненных измерений и анализ экспериментальных данных и теоретических расчетов предполагается в будущем опубликовать. Они могут быть использованы при планировании дальнейших исследований по данной проблеме как в аэродинамических трубах, так и в натуральных условиях, а также для совершенствования теоретических моделей пограничного слоя и диффузии примесей в холмистой местности. Представляют они интерес и с точки зрения оценки влияния рельефа на загрязнение воздуха при осуществлении практических мероприятий по охране воздушного бассейна.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Берлянд М. Е. Современные проблемы атмосферной диффузии и загрязнение атмосферы.—Л.: Гидрометеиздат, 1975.—448 с.
2. Берлянд М. Е., Генихович Е. Л., Куренбии О. И. Влияние рельефа на распространение примеси от источников.—Труды ГГО, 1968, вып. 234, с. 28—44.
3. Берлянд М. Е., Генихович Е. Л., Хуршудян Л. Г. Об использовании результатов моделирования воздушного потока в аэродинамических трубах для расчета загрязнения воздуха.—Труды ГГО, 1975, вып. 352, с. 3—16.
4. Горлин С. М., Зражевский И. М. Изучение обтекания моделей рельефа и городской застройки в аэродинамической трубе.—Труды ГГО, 1968, вып. 234, с. 45—59.
5. Горлин С. М., Зражевский И. М. Изучение обтекания моделей характерных форм рельефа в аэродинамической трубе.—Труды ГГО, 1969, вып. 238, с. 70—76.
6. Arya S. P. S., Shipman M. S. A model study of boundary layer flow and diffusion over a ridge.—In: Proc. AMS Fourth Symp. on Turbulence, Diffusion and Air Pollution, Jan. 15—18, AMS, Boston: 1979, p. 584—591.
7. Courtney L. Y. A wind tunnel study of flow and diffusion over a two-dimensional low hill. M. S. Thesis, Dept. Meteorol., N. C. State Univ., Raleigh, 1979.—134 p.
8. Huber A. H., Snyder W. H., Thompson R. S., Lawson R. E. Jr. Stack placement in the lee of a mountain ridge: A wind tunnel study.—Environ. Prot. Agency Rept. N EPA-600/4-76-047, Res. Tri. Pk., N. C., 1976.—45 p.
9. Snyder W. H. The EPA meteorological wind tunnel: Its design, construction and operating characteristics.—Environ. Prot. Agency Rept. N EPA-600/4-79-051, Res. Tri. Pk., N. C., 1979.—70 p.

Н. С. Буренин, Б. Б. Горошко, Г. А. Панфилова

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПРИМЕСЕЙ В РАЙОНЕ ТЕПЛОВОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ С ВЫСОТОЙ ТРУБ 320 М И СОПОСТАВЛЕНИЕ ИХ С РАСЧЕТАМИ

Современные электростанции оказывают существенное отрицательное воздействие на окружающую среду. Одним из основных источников этого воздействия для тепловых электростанций (ГРЭС, ТЭЦ) являются выбросы вредных веществ в атмосферу. В связи с этим возрастает внимание к вопросам контроля за загрязнением воздуха в районе крупных тепловых электростанций.

Главной геофизической обсерваторией им. А. И. Воейкова совместно с Московским энергетическим институтом (МЭИ) и Научно-исследовательским институтом гигиены им. Ф. Ф. Эрисмана в течение ряда лет выполнялись работы по изучению загрязнения воздушного бассейна в районе тепловой электростанции с высотой выброса 320 м. Эти исследования проводились ежегодно (начиная с 1976 г.) в летний период для выявления опасных метеорологических условий, способствующих возникновению высокого уровня загрязнения воздуха. Результаты наблюдений за 1976 и 1977 гг. изложены в [1]. В результате выполненных работ получен обширный

экспериментальный материал о распространении примесей из очень высоких труб теплоэлектростанций, который послужит основой для проверки методов расчета максимальных концентраций. Наряду с этим данные, полученные в 1976—1978 гг., позволили уточнить рекомендации по размещению сети пунктов наблюдений автоматизированной системы контроля за загрязнением атмосферы в районе тепловой электростанции и значения среднесуточных концентраций. Так же как и в предыдущие годы, в 1978 г. велись наблюдения за содержанием сернистого газа (SO_2) и двуокиси азота (NO_2) под факелом электростанций и с наветренной стороны, измерения метеорологических и аэрологических характеристик и параметров выброса. Мощность тепловой электростанции в 1977 и 1978 гг. была одинаковой.

Погода в июле—августе 1978 г. определялась малоградиентным барическим полем. Во второй половине экспедиции усилилась циклоническая деятельность, связанная с поступлением воздушных масс с Черного моря, обуславливающих резкую смену направлений ветра, и обильными ливневыми осадками. Отмечалось уменьшение повторяемости северного и северо-западного ветров и увеличение повторяемости западного. Наряду со слабыми скоростями ветра (1—2 м/с) наблюдались скорости 3—5 м/с, а иногда и 7—8 м/с. Следует отметить, что метеорологические условия в период эксперимента не благоприятствовали выполнению отборов проб воздуха в связи с тем, что довольно часто факел смещался в сторону водоема, что резко ограничивало возможность проведения наблюдений на дальних дистанциях от ГРЭС.

Методика отбора проб и метеорологических наблюдений подробно изложена в работах [2, 3].

Наблюдения за загрязнением воздуха сернистым газом и двуокисью азота проводились как под факелом ГРЭС на расстояниях 0,5—20 км, так и вне зоны факела (фоновые). Фоновые концентрации были получены на расстояниях 0,5—1 км от ГРЭС с наветренной стороны факела. В течение 20 мин производился отбор параллельных проб на сернистый газ и двуокись азота одновременно в фоновой точке и под факелом на двух-трех дистанциях в трех-четыре пункта на каждой.

Определение сернистого газа с использованием сорбционных трубок и двуокиси азота колориметрическим методом проводилось по методикам, приведенным в работах [4, 6].

За период эксперимента в июле—августе 1978 г. было отобрано и проанализировано более двух тысяч проб (по 1100 проб на сернистый газ и двуокись азота), из них около 300 проб отобраны с наветренной стороны источника с целью определения фонового загрязнения натекающей воздушной массы. Средние концентрации сернистого газа и двуокиси азота не превышали значений ПДК. Средний уровень загрязнения воздуха исследуемыми примесями до 4 км остается без изменения (табл. 1). По мере дальнейшего увеличения расстояния от источника концентрации резко повышаются и достигают максимальных значений на расстоянии 6 км. Обращает

на себя внимание особенностью изменения концентраций после достижения максимума. Средние концентрации сначала быстро уменьшаются и на расстоянии 7—8 км значение средней концентрации сернистого газа составляет 50 %, а двуокиси азота 70 % максимального значения. Дальнейшее уменьшение концентраций происходит очень медленно, и на расстоянии от 12 до 20 км концентрации SO_2 , по существу, остаются постоянными. Рассматривая эти данные, можно сделать некоторые предварительные выводы.

Таблица 1

Распределение нормированных средних концентраций SO_2 и NO_2 на наибольшее среднее значение с удалением от ГРЭС

| Ингредиент | Фон | Расстояние, км | | | | | | | | | | |
|---------------|-----|----------------|-------|-----|-------|-----|---|-----|------|-------|-----|-------|
| | | 0,5 | 1—1,5 | 2 | 2,5—3 | 4—5 | 6 | 7—8 | 9—10 | 12—14 | 15 | 17—20 |
| SO_2 | 0,2 | 0,3 | 0,3 | 0,3 | 0,3 | 0,4 | 1 | 0,5 | 0,5 | 0,4 | 0,4 | 0,4 |
| NO_2 | 0,4 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,7 | 1 | 0,7 | 0,6 | 0,5 | 0,5 | 0,4 |

При выбросе вредных веществ из высоких труб концентрации после достижения максимальных уровней медленно убывают и на расстоянии 20 км от источника составляют примерно 50 % максимальных значений, т. е. прослеживается повышенный уровень загрязнения на больших расстояниях от источника.

Концентрации двуокиси азота по мере удаления от источника убывают медленнее, чем сернистого газа, в результате продолжающегося процесса превращения окиси азота в двуокись. Однако на расстоянии 20 км они достигают фоновых значений. Это, вероятно, можно объяснить тем, что процесс образования NO_2 компенсируется переходом NO_2 в NO .

Проведенные расчеты [8] по имеющимся параметрам выбросов вредных веществ в атмосферу показали, что максимальные концентрации должны наблюдаться на расстоянии 6,5 км от ГРЭС при скоростях ветра 6—7 м/с. Экспериментальные данные показывают, что опасная скорость ветра, при которой наблюдались максимальные значения, была равна 5—6 м/с. На рис.1 приводится изменение экспериментальных и расчетных максимальных значений сернистого газа и двуокиси азота, нормированных на выброс, с удалением от источника до 15 км. Согласование экспериментальных и теоретических данных является удовлетворительным.

При сравнении концентраций сернистого газа и двуокиси азота, полученных в 1978 г., с данными предыдущего года можно отметить, что средний уровень загрязнения атмосферы рассматриваемыми примесями стал немного ниже, хотя максимум остался почти тем же.

Фоновый уровень загрязнения в 1978 г. был почти в 3 раза меньше, чем в 1977 г., из-за различий в метеорологических усло-

виях. В основном, вероятно, это связано с тем, что в период экспедиции и особенно во второй ее половине выпадали обильные осадки, что способствовало самоочищению атмосферы и быстрому вымыванию примесей. Определенную роль сыграло и направление переноса воздушных масс с более чистых районов.

Для измерения содержания сернистого газа в воздухе, кроме ручных химических методов, использовались и автоматические. Газоанализаторы (ГКП-1) были установлены на расстоянии 5,5, 6 и 8 км от ГРЭС при расстоянии между пунктами 2—2,5 км. Кроме того, один газоанализатор был установлен на метеорологической площадке, находящейся на расстоянии 1 км от труб ГРЭС. Однако это не позволило получить дополнительной информации в связи с тем, что только в отдельные дни было отмечено несколько слу-

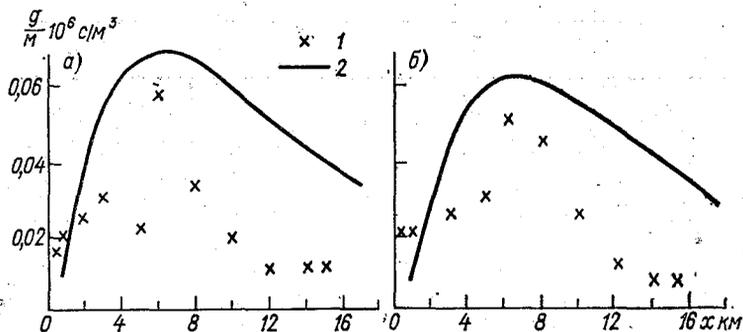


Рис. 1. Распределение экспериментальных (1) и теоретических (2) концентраций сернистого газа (а) и двуокиси азота (б), нормированных на выброс, с удалением от источника выброса.

чаев повышения концентрации SO_2 , связанных с выбросами ГРЭС, когда происходил перенос вредных примесей из труб ГРЭС на пункты, где были установлены приборы. В остальных случаях газоанализаторы фиксировали минимальные значения концентраций сернистого газа, которые соответствовали фоновым значениям в связи с тем, что места расположения приборов находились вне зоны факела. Это говорит о том, что при проведении разовых обследований загрязнения атмосферы в районах крупных источников наиболее целесообразно использовать передвижную сеть пунктов измерений, которая размещается непосредственно под факелом источника. Для постоянного контроля уровня загрязнения необходимо организовывать довольно густую сеть пунктов измерения.

Одновременно с отборами проб в жидкостные поглотители параллельно на отдельных дистанциях выполнялись измерения содержания сернистого газа в воздухе с помощью переносных газоанализаторов «Атмосфера» с целью отработки методических принципов широкого использования этих газоанализаторов в дальнейшем при проведении подфакельных наблюдений. Вместе с тем анализ полученных данных измерений в отдельные дни позволил оценить

уровни максимального загрязнения атмосферы и выявить некоторые особенности их изменения в поперечном к оси факела направлении. На рис. 2 даны результаты измерений концентраций сернистого газа на расстояниях 6, 10 и 14 км от источника выброса.

Как видно из рис. 2, в течение сравнительно небольших временных интервалов отмечаются значительные колебания концентраций за счет горизонтальных флуктуаций направления ветра, а максимальные их величины отмечались 18 июля в 11 ч 40 мин—12 ч 10 мин на дистанции 6 км. До этого срока и в течение 20—30 мин после него происходило быстрое уменьшение уровня загрязнения. Концентрации убывают с удалением от источника, и на рас-

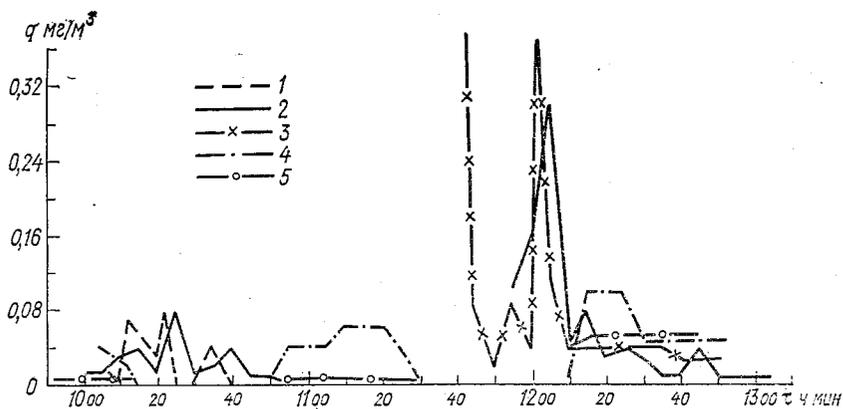


Рис. 2. Концентрации сернистого газа, измеренные газоанализаторами на расстояниях 6 км (1—справа, 2—центр, 3—слева), 10 км (4—центр) и 14 км (5—слева).

стояниях 10—14 км они в 3—4 раза ниже, чем на расстоянии 6 км. Полученные результаты подтверждают правильность используемой методики [7], расстановки пунктов наблюдений под факелом, предусматривающей отбор проб не в одной, а в 3—4 точках, расположенных на линии, перпендикулярной оси факела. Так, из рис. 2 следует, что наибольшие концентрации наблюдались не в центральной точке под визуально определенной осью факела, а на удалении влево от нее на 0,5—1 км. В период экспериментальных работ были продолжены начатые в 1977 г. наблюдения за трансформацией окислов азота в районе крупной тепловой электростанции [2]. Они предусматривали синхронный отбор проб на окись и двуокись азота на уровне 1,5 м от поверхности земли под факелом ГРЭС на различном от нее удалении.

Из данных работы [5] и результатов непосредственных измерений раздельного содержания окиси и двуокиси азота в выбросах электростанции следует, что в дымовых газах содержится до 90—95 % окиси азота. Это связано с тем, что при сгорании топлива, которое происходит при высоких температурах, азот из воздуха

вступает в соединение с кислородом. Таким образом, в дымовых газах, поступающих в атмосферу в непосредственной близости от труб, отношение концентраций двуокиси азота (NO_2) к окиси (NO) составляет 0,1. Принимая отношение NO_2/NO в качестве характеристики скорости перехода окиси азота в двуокись, который происходит за счет окислительных реакций, рассмотрим характер его изменения на различном удалении от ГРЭС.

Как известно, скорость перехода в основном определяется уровнями исходных концентраций, метеорологическими факторами и временем пребывания окиси азота в атмосфере. Из представленного на рис. 3 а хода изменения отношения NO_2/NO в районе ГРЭС по данным измерений в июле 1978 г. видно, что в ближайшей к ис-

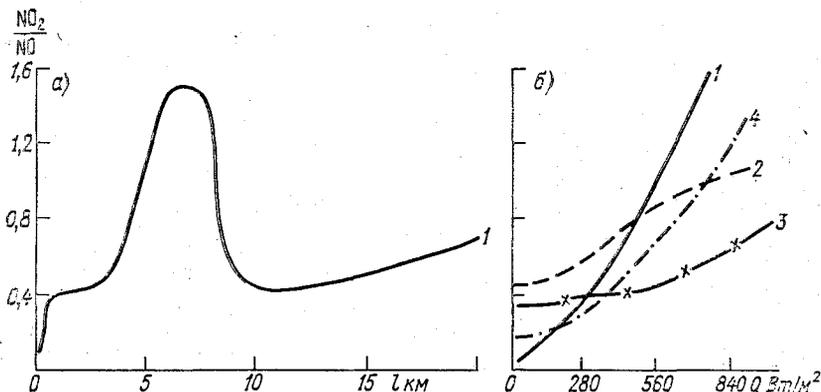


Рис. 3. Изменение отношения NO_2/NO с расстоянием (а) и в зависимости от суммарной радиации (б) на дистанциях 2,5 км (1), 6 км (2), 8 км (3) и 15 км (4).

точнику выбросов зоне 0,5—1 км скорость перехода быстро возрастает несмотря на сравнительно низкие значения окиси азота у земной поверхности. С последующим удалением от ГРЭС (до расстояния 2—3 км) происходит более медленное увеличение значений этого отношения. Наиболее характерной особенностью изменения отношения NO_2/NO с удалением от источника является его ярко выраженный максимум на расстоянии около 5—6 км, где оно достигает 1,5, т. е. по абсолютной величине концентрации двуокиси азота значительно превышают концентрации окиси азота.

На расстоянии 8—10 км содержание окиси и двуокиси азота примерно такое же, как и на 2—3 км. С последующим удалением до 15—20 км отношение слабо растет.

Как видно из рисунка, изменение отношения NO_2/NO имеет сложный характер и, к сожалению, в настоящее время объяснить его поведение не представляется возможным. Однако можно указать на ряд причин, которые могли бы способствовать такому изменению. Вблизи источника идет быстрое увеличение содержания двуокиси азота в связи с тем, что в факеле в это время наблюдаются очень высокие концентрации окиси азота. Это, на наш

взгляд, является основной причиной в связи с тем, что скорость превращения пропорциональна квадрату концентраций NO.

После выхода дымовых газов из трубы незначительного добавления окислителей в результате турбулентного перемешивания достаточно для быстрого преобразования окислов азота. Дальнейшее изменение скорости превращения, по-видимому, обуславливается теми же причинами, т. е. изменением концентраций окислителей и окиси азота в зоне влияния факела. Кроме указанных причин, на изменение скорости превращения, вероятно, оказывает влияние и перенос окислов азота в слои атмосферы, соприкасающиеся с подстилающей поверхностью.

Определенный интерес представляет оценка зависимости изменения отношения NO_2/NO от интенсивности солнечной радиации. В период экспериментальных работ производились актинометрические наблюдения, которые позволили рассчитать основные радиационные характеристики (прямая и рассеянная радиация, суммарная радиация). На рис. 3 б представлено изменение NO_2/NO в зависимости от величины суммарной радиации (Q Вт/м²) для фиксированных расстояний (2,5, 6, 8 и 15 км).

Как видно из рис. 3 б, на дистанциях 6—8 км, где наблюдаются максимальные концентрации, отношение NO_2/NO изменяется плавно в диапазоне от 0,3 до 0,9 с нарастанием интенсивности солнечной радиации, а вне зоны максимума (2,5, 15 км) отношение NO_2/NO быстро возрастает и достигает максимальных значений (1,5—1,8) при наибольшей интенсивности солнечной радиации (700—850 Вт/м²). Эти различия, по-видимому, связаны с тем, что вне зоны максимальных концентраций определяющим фактором перехода $\text{NO} \rightarrow \text{NO}_2$ является солнечная радиация при общем незначительном уровне концентраций. В зоне 6—8 км влияние солнечной радиации на процесс окисления несколько компенсируется одним из распространенных процессов фотохимических превращений — диссоциацией двуокиси азота на окись азота и атомарный кислород, причем этот процесс наиболее активно протекает при наличии высоких уровней концентраций двуокиси азота.

Таким образом, процессы превращения окислов азота в атмосфере в районе крупных тепловых электростанций протекают весьма интенсивно и характер их на различном удалении от источника выбросов неодинаков. Из приведенных результатов видно, что при дальнейшем исследовании этого вопроса необходимо программу измерения у земли дополнить измерениями по высоте во всей толще факела и обязательно определять концентрации окислителей и прежде всего озона.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андреев В. С., Буренин Н. С., Горошко Б. Б., Панфилова Г. А. Результаты сравнения экспериментальных и расчетных концентраций в районе тепловой электростанции с высотой выброса 320 м.— Труды ГГО, 1979, вып. 417, с. 74—78.

2. Андреев В. С., Горошко Б. Б., Павленко А. А. Исследование процессов трансформации окислов азота под факелом ГРЭС.—Труды ГГО, 1979, вып. 436, с. 43—48.
3. Берлянд М. Е. Современные проблемы атмосферной диффузии и загрязнения атмосферы.—Л.: Гидрометеиздат, 1975.—448 с.
4. Вольберг Н. Ш., Тульчинская З. Г. Определение сернистого газа в полевых условиях с использованием сорбционных трубок.—Труды ГГО, 1977, вып. 387, с. 134—137.
5. Зельдович Я. Б. и др. Окисление азота при горении.—М.-Л., 1947.
6. Павленко А. А., Вольберг Н. Ш. Использование твердых сорбентов при определении окислов азота.—Труды ГГО, 1979, вып. 417.
7. Руководство по контролю загрязнения атмосферы.—Л.: Гидрометеиздат, 1979.—448 с.
8. Указания по расчету рассеивания в атмосфере вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий. СН 369-74.—М.: Стройиздат, 1975.—41 с.

Б. Б. Горошко, С. Н. Немец, А. М. Царев

НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В ВОЗДУХЕ В РАЙОНЕ ОТДЕЛЬНЫХ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Присутствие тяжелых металлов в атмосферном воздухе, несмотря на ничтожно малое их количество, играет важную роль в биологических процессах. Многие из них способны оказывать токсическое воздействие на среду. В связи с этим в последнее время уделяется большое внимание исследованиям содержания в атмосфере микроэлементов, которые попадают в нее в результате деятельности человека.

Особенно большое количество различных веществ выбрасывается в атмосферу при сжигании топлива — это прежде всего сернистый газ, окислы азота и зола. Кроме того, при сжигании топлива выбрасываются аэрозоли в виде различных соединений: PbO , CrO_2 , MnO_2 , NiO , V_2O_5 , TiO , Fe_2O_3 , MgO , CuO и др.

Для получения экспериментальных данных об уровнях загрязнения атмосферы некоторыми микроэлементами Главной геофизической обсерваторией им. А. И. Воейкова (ГГО) были организованы экспериментальные работы по отбору проб аэрозолей на высоте 1,5 м над поверхностью земли при различных метеорологических условиях под дымовыми факелами труб двух промышленных площадок, а также на территории города и на метеостанции. Выбросы вредных веществ, поступающие в атмосферу, имели различный состав в связи с тем, что на одной из промплощадок было размещено несколько предприятий, из которых основным источником примесей являлся крупный завод, а на другой находилась только тепловая электростанция. Необходимо отметить, что на территории города расположено много других мелких источников, выбросы от которых создают некоторый фон загрязнения атмосферы. Кроме того, измерения под факелами источников часто проводились вблизи автомагистралей. В связи с этим выделить конкретный вклад в загрязнение атмосферы рассматриваемыми источ-

никами довольно трудно, однако, как будет показано ниже, полученные результаты дают возможность сделать некоторые выводы о распределении микроэлементов, как по территории города, так и под факелами источников.

Отбор проб осуществлялся под факелами двух основных промплощадок одновременно на 3—4 различных расстояниях от источника выброса в радиусе до 10—12 км. Для отбора проб в качестве поглотительного материала использовалась фильтровальная ткань ФПП-15, через которую прокачивался воздух в течение 20 мин со скоростью 200—250 л/мин [2]. Спектральный анализ проб осуществлялся по разработанной совместно с ГГО и ЛГУ [1] методике, позволяющей производить определение до 14 различных ингредиентов в пробах с навеской пыли в пределах нескольких миллиграммов. Учитывая трудоемкость метода и большой объем анализируемого материала, анализ был выполнен только на 7 наиболее распространенных металлов (Pb, Sn, Cr, Mn, V, Ti).

Таблица 1

Распределение нормированных концентраций микроэлементов на двух промплощадках

| Расстояние, км | Число проб | Pb | Sn | Cr | Mn | Ni | V | Ti |
|---------------------|------------|------|------|------|------|------|------|------|
| Первая промплощадка | | | | | | | | |
| 0—0,5 | 9 | 0,30 | сл. | 0,13 | 0,23 | 0,13 | 0,08 | 0,05 |
| 1 | 8 | 0,29 | 0,17 | 0,23 | 0,37 | 0,29 | 0,10 | 0,06 |
| 1,5—2 | 10 | 0,13 | сл. | 0,08 | 0,20 | 0,21 | сл. | 0,05 |
| 3 | 8 | 0,19 | 0,24 | 0,10 | 0,26 | 0,31 | сл. | 0,12 |
| 4—4,5 | 4 | 0,17 | сл. | 0,13 | 0,31 | 0,17 | сл. | 0,11 |
| 5—6 | 10 | 0,19 | сл. | 0,22 | 0,37 | 0,46 | сл. | 0,11 |
| 7—8 | 11 | 0,23 | сл. | 0,29 | 0,40 | 0,23 | сл. | 0,12 |
| 10—12 | 8 | 0,24 | сл. | 0,16 | 0,63 | 0,32 | 0,33 | 0,70 |
| Вторая промплощадка | | | | | | | | |
| 0,5 | 5 | 0,19 | сл. | 0,08 | 0,23 | 0,09 | сл. | 0,10 |
| 1,0 | 4 | 0,07 | сл. | 0,06 | 0,04 | 0,36 | 0,08 | 0,07 |
| 3,0 | 7 | 0,23 | сл. | 0,10 | 0,16 | 0,29 | 0,10 | 0,09 |
| 4,0 | 3 | 0,10 | 0,07 | 0,08 | 0,24 | 0,10 | сл. | 0,09 |
| 5—7 | 5 | 0,33 | 0,05 | 0,11 | 0,57 | 0,14 | сл. | 0,13 |
| 10 | 12 | 0,17 | 0,07 | 0,08 | 0,15 | 0,22 | 0,33 | 0,07 |

В табл. 1 представлены нормированные значения концентраций ряда элементов на различных дистанциях под факелами первой и второй промышленных площадок. В качестве характеристики загрязнения воздуха микропримесями рассматривается отношение средней концентрации (q_{cp}) к максимальной (q_{max}) за весь период наблюдений. Необходимо отметить, что в рассматриваемом случае иногда было трудно установить источники выброса различных ингредиентов, потому что в обследуемом районе расположено значительное количество других источников выброса вредных веществ

в атмосферу. Кроме того, на концентрацию оказывали влияние и выбросы автотранспорта, так как пункты отбора проб часто располагались вблизи автомагистралей. В связи с этим представленные результаты анализа проб (табл. 1), характеризующие загрязнение воздушного бассейна, не всегда можно объяснить влиянием факелов обследуемых источников. Однако необходимо отметить, что полученный экспериментальный материал представляет значительный интерес, так как дает возможность судить не только о весовой концентрации пыли, ее химическом составе, но и позволяет более детально характеризовать загрязнение атмосферы по территории города и под факелами наиболее мощных источников.

Как следует из экспериментальных материалов, приведенных в табл. 1, распределение концентраций хорошо согласуется с физическими закономерностями распространения примесей от источников. При этом, несмотря на наличие значительного фона, четко выделяются два максимума концентраций микроэлементов. Первый максимум располагается в санитарной зоне предприятий на расстоянии до 0,5 км, а по отдельным ингредиентам на расстоянии до 1 км и определяется неорганизованными выбросами различных аэрозолей, поступающих в атмосферу из низких источников, и аэрозолей крупнодисперсной фракции, поступающих в атмосферу из высоких источников, но очень быстро опускающихся в приземный слой атмосферы.

Второй максимум повышения концентрации, как правило, отмечается на расстояниях возможного максимума вследствие выпадения мелкодисперсной фракции при выбросе из высокого источника. Некоторое повышение концентраций на дальних дистанциях происходит за счет суммирования выбросов из других источников, расположенных вне промплощадки. Значительные повышения концентраций на дальних расстояниях, вероятно, можно объяснить тем, что аэрозоли мелкой фракции содержат больше микроэлементов, чем крупной. Этот вывод заслуживает внимания, но требует проведения дальнейших исследований.

Рассмотрим один из характерных элементов, постоянно присутствующих в атмосфере промышленных городов, который попадает в воздух при различных процессах и особенно при сжигании этилированного бензина в двигателях внутреннего сгорания — свинец. Из табл. 1 видно, что наиболее высокие концентрации свинца наблюдались вблизи источника на расстоянии 500 м от него в районе первой промплощадки. С удалением от промплощадки концентрации уменьшаются и на расстоянии 2 км становятся в 2 раза ниже, чем вблизи. Начиная с 3 км наблюдается некоторый рост концентраций. Такое изменение микропримесей оказалось характерным для всех тяжелых металлов. Это можно объяснить тем, что начиная с 3 км пункты отбора проб пыли часто находились под влиянием выбросов вредных веществ в атмосферу из мелких источников, автотранспорта и выпадения мелкодисперсной фракции пыли, поступающей в атмосферу из труб высоких источников. Наи-

более высокое содержание свинца и хрома также было зарегистрировано вблизи первой промплощадки, а высокие концентрации никеля и титана наблюдались на 3—6 км от нее. Увеличение концентраций на этих дистанциях связано как с влиянием выпадения частиц пыли из факела, так и с выбросами других производств.

В табл. 1 приведены также нормированные концентрации тяжелых металлов в пробах пыли, отобранных под факелом предприятий второй промплощадки. Как видно из таблицы, изменение концентраций по мере удаления от источника примерно такое же, как и под факелами первой промплощадки, но содержание Cr, Mn и Ni в пробах пыли на всех дистанциях несколько меньше.

С целью оценки уровня загрязнения воздушного бассейна города в целом был организован отбор проб пыли на пяти маршрутных пунктах и одном стационарном. Стационарный пункт располагался на метеорологической площадке, специально организованной на период эксперимента вне городской черты.

Как видно из табл. 2, в пробах, отобранных на пунктах, расположенных на территории города, содержание свинца несколько меньше, чем под факелами исследуемых предприятий, и примерно в 1,5 раза больше, чем на метеостанции.

Таблица 2

Средние нормированные значения концентраций микроэлементов в городе и пригородной зоне

| Пункт | Pb | Sn | Cr | Mn | Ni | V | Ti |
|--------------|------|------|------|------|------|-------|------|
| Город | 0,36 | 0,06 | 0,10 | 0,16 | 0,29 | 0,05 | 1,27 |
| Метеостанция | 0,20 | 0,01 | 0,22 | 0,21 | 0,38 | следы | 0,75 |

Необходимо отметить, что метеостанция была расположена вблизи города и находилась под влиянием выбросов вредных веществ от крупных и мелких источников, расположенных на территории города. Вероятно, поэтому средние концентрации некоторых элементов Cr, Mn и Ni в районе метеостанции оказались несколько выше, чем на городских пунктах.

Полученные результаты представляют собой первую попытку исследования распределения микропримесей в районе промышленных предприятий и города в целом и необходимо дальнейшее их развитие. Для обоснования изменений концентрации необходимо параллельно производить измерения дисперсного состава пыли.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Александров Н. Н. и др. Спектральный метод определения состава атмосферной пыли/Н. Н. Александров, А. И. Гунченко, Г. С. Гуння, Ю. Т. Туркин.— Труды ГГО, 1974, вып. 314, с. 104—113.
2. Временные методические указания по определению содержания примесей в атмосфере.— Л.: Гидрометеиздат, 1971.

ВЕРТИКАЛЬНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ОКСИ УГЛЕРОДА ПО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМ ДАННЫМ

Выявление особенностей изменения концентраций окиси углерода с высотой представляет определенный интерес при разработке ряда методических вопросов организации и проведения наблюдений за загрязнением воздуха автотранспортом, при решении архитектурно-планировочных задач по рациональной застройке городов и конструкторско-технологических задач в связи с проектированием новых и реконструкцией существующих автомобильных источников выбросов и т. п.

Изучение вопроса о высоте забора проб воздуха при проведении наземных наблюдений по контролю за загрязнением атмосферы автотранспортом является важной методической задачей. В. И. Ануфриев и А. С. Зайцев [1] на основе выполненных в Ленинграде в 1972 г. измерений сернистого газа в слое 0,25—11,0 м от поверхности земли с помощью газоанализаторов ГКП-1, воздухозаборники которых были установлены на семи уровнях, показали, что в распределении концентраций в исследуемом слое существенных различий не отмечается. Учитывая это и исходя из общих закономерностей распределения вредных примесей от высоких и низких источников, М. Е. Берлянд [2] сделал вывод, что на достаточном удалении от них выбор высоты измерений концентраций в пределах 3—5 м не играет существенной роли. В случае автотранспорта оказывается необходимым учесть вертикальное распределение примесей на расстояниях, сравнительно близких от его источников выбросов.

Большинство автомобилей имеет источники выбросов выхлопных газов, расположенные на высоте менее 1 м (чаще всего 20—50 см) от поверхности земли. В работе [3] в качестве средней высоты выбросов автомобилей указывается уровень 45 см. Наряду с этим, начальный выброс выхлопных газов осуществляется не вверх, а по горизонтали, так как патрубки выхлопных труб преимущественно ориентированы параллельно поверхности земли. Это затрудняет выбор оптимальной высоты отбора проб при наблюдениях за загрязнением воздуха автотранспортом, тем более, что и в литературе отсутствует единое мнение по этому вопросу. Так, в работе [4] дается анализ результатов измерений на автомагистралях при высоте забора 75 см, а в работах [5, 6] — соответственно при высоте забора 2 и 3 м. Поэтому в целях решения указанного вопроса были организованы наблюдения на нескольких автомагистралях с различной интенсивностью движения.

Отбор проб воздуха производился одновременно на шести уровнях: 0,25; 0,5; 0,75; 1,0; 1,5 и 2,0 м. Места отбора проб располагались на тротуаре у края проезжей части магистрали. Время отбора пробы составляло 5 мин в течение этого же периода производился подсчет числа проходящих автомобилей для определе-

ния интенсивности движения транспорта. На каждой магистрали наблюдения выполнялись ежедневно в период с 7 до 20 ч. На автомагистрали 3 в период, который совпал с пиком интенсивности движения (16—17 ч), отбирались пробы на 11 уровнях в слое от поверхности земли до 4,5 м.

Вертикальные изменения отношения средней концентрации окиси углерода (\bar{q}) на данной высоте к максимальной (q_{\max}) представлены в табл. 1. Из этой таблицы видно, что существенных изменений концентраций не отмечается. Несколько большие значения отношения концентраций наблюдаются на уровнях 0,5 и 1,5—2 м.

Таблица 1

Изменение с высотой значений q/q_{\max} для окиси углерода в слое 0,25—3,0 м от поверхности земли

| Магистраль | Высота отбора проб, м | | | | | | | |
|-------------|-----------------------|------|------|------|------|------|------|------|
| | 0,25 | 0,50 | 0,75 | 1,0 | 1,5 | 2,0 | 2,5 | 3,0 |
| 1 | 0,16 | 0,19 | 0,16 | 0,15 | 0,29 | 0,24 | — | — |
| 2 | 0,30 | 0,35 | 0,25 | 0,32 | 0,27 | 0,28 | — | — |
| 3 | 0,44 | 0,52 | 0,49 | 0,45 | 0,48 | 0,43 | — | — |
| 3 (16—17 ч) | 0,37 | 0,47 | 0,34 | 0,30 | 0,64 | 0,48 | 0,33 | 0,14 |

С учетом того, что высота 1,5—2 м совпадает со средним уровнем дыхания человека, можно полагать, что оптимальной высотой для забора проб является уровень 1,5 м от поверхности земли.

При решении специальных задач, связанных с изучением влияния выбросов автотранспорта на здоровье детей, целесообразно при организации измерений в районах расположения детских учреждений (ясли, детские сады, школы и т. п.) и детских площадок для игр дополнительно проводить измерения на уровнях 0,5—0,75 м от поверхности земли в целях определения максимальных концентраций.

Наряду с выявлением особенностей распределения с высотой основных компонентов выхлопных газов в приземном слое воздуха, существенное значение имеет также знание характера изменения их с высотой в пограничном слое атмосферы. Распределение над городом примесей, поступающих от источников разного типа, зависит от многих происходящих в атмосфере физических процессов, основными из которых являются вертикальное движение воздуха, турбулентное перемешивание и др.

При проведении комплексных экспериментальных исследований загрязнения воздуха в городах в 1970—1975 гг. авторы на вертолетах Ми-1 и Ка-26 выполняли работы по изучению особенностей распределения с высотой примесей, выбрасываемых автотранспортом, и в первую очередь по изучению изменения с высотой содер-

жания окиси углерода над участками автомагистралей протяженностью 1,0—1,5 км.

Измерения распределения вредных примесей над городом выполнялись в соответствии с [7]. При решении этой задачи полеты осуществлялись последовательно на высотах 25, 50, 75, 100, 125, 150, 200, 300 и 500 м над участками магистрали протяженностью около 1,0—1,5 км. На каждой высоте осуществлялось по два полета (в прямом и обратном направлениях). Время отбора проб соответствовало времени прохождения вертолетом участка магистрали в одном направлении и составляло 2—3 мин.

Остановимся на результатах выполненной авторами обработки данных измерений над городами Ленинград (декабрь 1974 и 1975 гг.) и Новочеркасск (июнь—июль 1975 г.), приведенных в табл. 2.

Таблица 2

Отношение концентрации окиси углерода на разных высотах к концентрации на уровне 2 м над поверхностью земли для каждого из периодов наблюдений

| Город | Высота, м | | | | | | | | |
|--|-----------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | 50 | 75 | 100 | 125 | 150 | 175 | 200 | 300 | 500 |
| Новочеркасск Ленинград, 1974 г. 1975 г. | 0,22 | 0,47 | 0,25 | 0,22 | 0,22 | 0,20 | 0,08 | 0,08 | — |
| | 0,31 | 0,31 | 0,39 | 0,28 | 0,28 | 0,29 | — | — | — |
| | 0,32 | 0,32 | 0,29 | 0,22 | 0,20 | 0,20 | 0,19 | 0,18 | 0,18 |

При направлении ветра вдоль магистрали средние за период наблюдения величины окиси углерода, как правило, убывают с высотой. Однако характер убывания различен на разных высотах. Наиболее резкое уменьшение концентраций происходит в слое от земли до высоты 50 м. Выше этого слоя отмечается значительное ослабление степени убывания концентраций, причем в ряде случаев отмечается даже некоторый их рост. Такой характер изменения концентрации, по-видимому, связан с влиянием дымовой «шапки», образующейся над городом в результате суммарного действия выбросов от источников разной высоты и типа. Особенности распределения концентраций в этих и выше расположенных слоях вызваны изменениями в расположении нижней границы дымовой шапки и ее интенсивности. При наблюдениях в Новочеркасске максимум окиси углерода наблюдался на высоте 75 м, где концентрации возросли более чем в 2 раза по сравнению с содержанием на высоте 50 м. В Ленинграде в первом случае на высоте 100 м концентрации незначительно увеличиваются, а во втором случае в слое 50—100 м отмечаются постоянные значения концентраций. Эти различия указывают на то, что нижняя граница дымовой шапки над Новочеркасском расположена ниже, чем над Ленинградом.

Рассмотренные изменения с высотой окиси углерода позволяют также оценить и мощность дымовой шапки. Так, для Новочеркасска концентрации окиси углерода, превышающие ее значения на высоте 50 м, сохраняются до 150 м, а в Ленинграде высокие значения концентраций прослеживаются до 175 м в первом случае, а во втором — концентрации окиси углерода, превышающие ее значения на высоте 50 м, сохраняются до 150 м. В Ленинграде высокие значения концентраций прослеживаются до 175 м в первом случае, а во втором — на высоте 500 м они только на 40 % ниже, чем на высоте 50 м. Таким образом, можно предполагать, что над Ленинградом дымовая шапка имеет (наряду с более высокой нижней границей) существенно большую мощность.

В дополнение к рассмотренным выше особенностям вертикального распределения окиси углерода было выполнено сопоставление концентраций, рассчитанных для слоев 50—75 и 125—150 м над автомагистралями. Максимальные концентрации окиси углерода были обнаружены при наибольшей интенсивности движения автотранспорта.

В целях изучения изменений содержания окиси углерода в зависимости от характеристик температурной стратификации рассмотрим результаты измерений содержания окиси углерода на участке шоссе Днепропетровск—Кривой Рог, выбранном на удалении от городов (октябрь—декабрь 1971—1972 гг.). Для определения аэрологических характеристик использовались данные радиозондирования на аэрологической станции в Кривом Роге.

Таблица 3

Изменение содержания окиси углерода в зависимости от типа температурной стратификации атмосферы

| Характеристика | Тип стратификации | | | | | |
|----------------|--------------------------------|------------|---------------------------------------|----------|--|---------|
| | приземная инверсия с H км | | приподнятая инверсия с $H_{нг}$ км | | падение температуры с высотой с γ °C/100 м | |
| | <0,2 | $\geq 0,2$ | <0,2 | 0,2—0,80 | <0,6 | 0,6—1,0 |
| \bar{q}/q'_m | 0,69 | 0,53 | 0,44 | 0,39 | 0,31 | 0,33 |
| q_m/q'_m | 1,00 | 0,89 | 0,53 | 0,67 | 0,75 | 0,69 |
| ΔT | 3,8 | 3,7 | 3,6 | 4,1 | — | — |
| γ | 3,10 | —0,80 | —0,70 | —1,40 | 0,23 | 0,80 |
| H | 0,12 | 0,29 | — | — | — | — |
| $H_{нг}$ | — | — | 0,18 | 0,40 | — | — |

В табл. 3 представлены средние (\bar{q}), максимальные (q_m) значения концентрации окиси углерода, нормированные на наиболь-

шую концентрацию (q'_m), средние значения характеристик температурной стратификации атмосферы: ΔT — перепад температуры в инверсии ($^{\circ}\text{C}$), γ — градиент изменения температуры ($^{\circ}\text{C}/100 \text{ м}$), H и $H_{\text{нт}}$ — высоты соответственно приземной инверсии и нижней границы приподнятой инверсии (км). Анализ данных табл. 3 показывает, что наибольшие средние и максимальные значения концентраций окиси углерода наблюдаются в условиях приземной инверсии.

С увеличением мощности приземных инверсий (от 120 до 290 м) при одинаковой примерно их интенсивности ($\Delta T = 3,7 \div 3,8^{\circ}\text{C}$), т. е. с уменьшением примерно в 2 раза, происходит уменьшение наземных концентраций, что обусловлено увеличением рассеивающей способности атмосферы. Изменение характеристик приподнятой инверсии не оказывает заметного влияния на уровень загрязнения воздуха.

В условиях, близких к равновесным, концентрации окиси углерода примерно в 2 раза меньше, чем в условиях приземной инверсии высотой до 200 м, и на 15—20 % меньше, чем в условиях приподнятой инверсии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ануфриев В. И., Зайцев А. С. Вертикальное распределение сернистого газа в приземном слое атмосферы в городе.— Труды ГГО, 1975, вып. 352, с. 59—64.
2. Берлянд М. Е. Современные проблемы атмосферной диффузии и загрязнения атмосферы.— Л.: Гидрометеониздат, 1975.—448 с.
3. Горошко Б. Б., Зайцев А. С., Назаренко В. Я. Вопросы методики и результаты исследования загрязнения атмосферы с помощью вертолета.— Труды ГГО, 1968, вып. 234, с. 85—94.
4. Фельдман Ю. Г. Гигиенические оценки автотранспорта как источника загрязнения атмосферного воздуха.— М.: Медицина, 1975.—159 с.
5. Georgii H. W. Ermittlung der CO. Immissionskonzentrationen unter Berücksichtigung meteorologischer Einflussgrößen.— Staub-Reinhalte, Luft., 1972, Bd 32, N 2, S. 70—74.
6. Johnson W. B. e. a. Field study for initial evaluation of an urban diffusion model for carbon monoxide.— Stanford Res. Inst. Menlo Park, California, 94025, 1971, p. 144.
7. Lahmann E. CO —konzentrationen in Berliner Stadtgebieten (Strassen, Tunnels. Wohngebiete und Gewasser).— Staub-Reinhalte Luft., 1972, Bd 32, N 2, S. 74—77.

Б. И. Вдовин

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЕРТИКАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ ГОРОДСКОГО ОСТРОВА ТЕПЛА В ЛЕНИНГРАДЕ

При изучении городского острова тепла большой интерес представляют исследования его вертикальной структуры. При организации эксперимента эта задача требует проведения одновременных зондирований как минимум в двух точках, одна из которых

должна быть расположена на наветренной стороне, а другая непосредственно в городе или вблизи подветренной границы городской застройки. Организация таких наблюдений является весьма сложной задачей.

Наиболее подходящим методом для подобного рода исследований является метод вертолетного зондирования, который позволяет оперативно и в относительно короткие сроки проводить зондирование в различных районах города и его окрестностей в зависимости от направления ветра. Такие исследования проводились в период с 1970 по 1977 г. в Ленинграде. При этом использовались вертолеты Ми-1, Ми-4 и Ка-26. Для зондирования использовались метеорографы А-10. Методика зондирования в общих чертах приведена в работах [1, 2, 3]. Полеты проводились преимущественно в середине дня, когда изменения температуры, связанные с суточным ходом, минимальны. Вместе с тем в целях обнаружения временных изменений температуры, связанных с адвекцией или суточными изменениями, в конце каждого полета проводились контрольные зондирования с наветренной стороны города. Один из примеров такого полета рассмотрен в работе [2].

В настоящей работе приведены некоторые результаты анализа имеющегося материала. Объем данных, полученных во время исследования городского острова тепла в Ленинграде в период с 1970 по 1977 г. составляет:

| <i>Период наблюдений</i> | <i>Число зондирований</i> |
|--------------------------|---------------------------|
| II—III, XII 1970 г. | 143 |
| IX—XII 1973 г. | 78 |
| XII 1974 г. | 13 |
| II—III 1976 г. | 61 |
| XI—XII 1977 г. | 37 |
| Итого | 332 |

Как видно, полеты производились преимущественно в зимнее время, когда суточный ход температуры сравнительно невелик. Из полученных данных для последующего статистического анализа были отобраны результаты таких пар зондирований, для которых период между зондированиями не превышал одного часа. Из анализа были исключены случаи с адвекцией. Всего было выбрано 92 пары зондирований, выполненных с наветренной стороны города и вблизи подветренной границы городской застройки или над городским районом. Разницы температур город—загород сравнивались на уровнях 2, 50, 100, 150, 200, 250, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900 и 1000 м. К сожалению, подавляющее большинство зондирований было выполнено до высоты 300 м. Это объясняется как преобладанием низкой облачности в Ленинграде в зимнее время, так и сложными навигационными условиями в районе аэропорта.

Поскольку анализ результатов сводится к сравнению температур на одинаковых высотах, возникает необходимость учитывать погрешность измерения температуры. Так как во время каждого

полета температурное зондирование выполняется с помощью одного прибора, точность измерения температуры определяется погрешностью снятия ее значений с фотопалетки. Для метеорографа А-10 она равна $0,3^{\circ}\text{C}$ [3]. Тогда погрешность измерения разности температур можно найти из соотношения

$$\delta_{\Delta T} = \sqrt{\sum \delta_T^2}. \quad (1)$$

В нашем случае $\delta_{\Delta T} = \pm 0,42^{\circ}\text{C}$.

Вместе с тем, несмотря на тщательный отбор материалов наблюдений, на результаты измерений могут влиять изменения температуры в набегающем потоке за период между зондированиями. Поскольку нами были отобраны случаи, для которых изменение температуры в течение часа не должно превышать $0,3^{\circ}\text{C}$, то, учитывая соотношение (1), общая погрешность измерения разностей температур с учетом временного хода не должна превышать $0,6^{\circ}\text{C}$. Поэтому в качестве критерия мы взяли значение $\pm 0,6^{\circ}\text{C}$ (табл. 1).

Таблица 1

Повторяемость (%) разностей температур город—загород на различных высотах

| $\Delta T^{\circ}\text{C}$ | Высота, м | | | | | | | | | |
|----------------------------|-----------|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----------|----|
| | 2 | 50 | 100 | 150 | 200 | 250 | 300 | 400 | 500—1000 | |
| $>0,6$ | 60 | 42 | 21 | 21 | 20 | 13 | 15 | 15 | 0 | 8 |
| $0,6 - (-0,6)$ | 38 | 57 | 75 | 74 | 67 | 71 | 58 | 58 | 77 | 92 |
| $<(-0,6)$ | 2 | 1 | 4 | 5 | 13 | 16 | 27 | 27 | 23 | 0 |

Из табл. 1 видно, что повторяемость положительных разностей температур город—загород уменьшается с высотой особенно в нижнем 100-метровом слое. Так, если у земли положительные разности температур встречались в 60 % случаев, то на уровне 100 м остров тепла был обнаружен лишь в 20 % случаев. Выше, до уровня 300 м, повторяемость положительных разностей температур менялась мало, а отсутствие их на уровне 400 м, по-видимому, указывает на то, что вероятность появления острова тепла мощностью 400 м и более весьма мала. Положительные разности температуры, наблюдавшиеся выше 400 м, очевидно, связаны с нагретом городской дымовой «шапки», как было показано в [2]. Такие случаи отмечались в ясную погоду при наличии инверсии температуры выше 400 м.

Повторяемость отрицательных разниц температур наоборот растет с высотой до уровня 300—400 м. На этих уровнях случаи понижения температуры над городом по сравнению с окрестностями встречались в 25 % всех наблюдений. Это явление впервые обнаруженное Дакфорсом и Сандбергом [6] обуславливается, по-видимому, перераспределением температуры по высоте в результате более интенсивного перемешивания над городом.

Для выбранных уровней нами были также рассчитаны средние разности температур и дисперсии.

Влияние города является постоянно действующим фактором, на который накладывается влияние метеорологических условий (направление и скорость ветра, характер стратификации, наличие или отсутствие облачности и т. д.). Все эти факторы, к которым неизбежно добавляется влияние погрешностей измерений, приводят к существенной изменчивости разностей температур, распределение которых носит случайный характер. Поэтому можно предположить, что оно близко к нормальному. Это позволяет исследовать значимость средних значений разностей температур на различных уровнях с помощью критерия Стьюдента

$$t_i = \frac{(\Delta\bar{T}_i - \mu) \sqrt{N_i - 1}}{S_i} \quad (2)$$

Здесь t_i — параметр Стьюдента, $\Delta\bar{T}_i$ — среднее значение разностей температур, N_i — количество измерений, S_i — среднее квадратическое отклонение на i -том уровне. При отсутствии влияния города μ должно быть равным 0. Поэтому соотношение (2) можно переписать в виде

$$t_i = \frac{\Delta\bar{T}_i \sqrt{N_i - 1}}{S_i} \quad (3)$$

Значения величин, входящих в формулу (3), для различных высот приведены в табл. 2.

Т а б л и ц а 2

Средние значения разностей температур, дисперсий,
количество измерений и уровень их значимости
для выбранных высот

| Высота, м | $\Delta\bar{T}$ °С | S^2 | N_i | t_i | Уровень значимости |
|-----------|--------------------|-------|-------|-------|--------------------|
| 2 | 1,20 | 2,54 | 82 | 6,834 | 0,001 |
| 50 | 0,74 | 1,22 | 86 | 6,238 | 0,001 |
| 100 | 0,34 | 0,59 | 91 | 4,212 | 0,001 |
| 150 | 0,21 | 0,41 | 92 | 3,130 | 0,010 |
| 200 | 0,04 | 0,50 | 91 | 0,534 | 0,050 |
| 250 | -0,10 | 0,66 | 79 | 1,090 | 0,050 |
| 300 | -0,38 | 1,11 | 26 | 1,809 | 0,050 |
| 400 | -0,42 | 0,92 | 13 | 1,579 | 0,050 |
| 500—1000 | 0,09 | 0,22 | 24 | 0,940 | 0,050 |

Данные, приведенные в табл. 2, позволяют сделать вывод о том, что для Ленинграда в холодное время года днем характерно наличие острова тепла, который в среднем наблюдается до высоты 100—150 м. Повышенные значения дисперсии вблизи земли обусловлены влиянием подстилающей поверхности, характер которой резко меняется вблизи границ городской застройки. Следует также

заметить, что по этой причине значение $\Delta\bar{T}$, полученное для высоты 2 м будет существенно ниже значения, которое может наблюдаться в центральных районах города. Поэтому значение повторяемости положительных разностей температур у земли несколько занижено. Выше это влияние сказывается гораздо слабее.

В слое 100—250 м значения дисперсии меняются мало. Зато в слое 300—400 м они возрастают почти в 2 раза. Это обусловлено как колебаниями мощности острова тепла, так и увеличением повторяемости отрицательных разностей температур на этих уровнях. Количество измерений на этих высотах оказалось недостаточным для получения надежных выводов. После объединения данных, полученных на высотах 300 и 400 м, различие в температурах внутри и за городом оказалось значимым на уровне 5%. Выше средние разности температур невелики, и значимость их отличия от нуля, несмотря на незначительную величину дисперсии, существенно хуже.

Наличие острова тепла и появление над ним слоя относительно холодного воздуха приводит к изменению градиента температуры над городом. Вместе с тем эти изменения должны в значительной степени зависеть от характера стратификации в набегающем потоке.

По данным вертолетного зондирования в Ленинграде было получено уравнение регрессии, связывающее градиенты температуры, измеренные на подветренной границе городской застройки, со стратификацией температуры в набегающем потоке в нижнем 250-метровом слое,

$$\gamma_n = 0,7\gamma_{\text{н}} + 0,58, \quad (4)$$

где γ_n — градиент температуры на подветренной стороне города, $\gamma_{\text{н}}$ — градиент температуры в набегающем потоке. Коэффициент корреляции при этом оказался равным 0,85. Такая относительно высокая корреляция позволяет делать оценку градиента температуры над городом по данным зондирования в окрестностях. В частности, из соотношения (4) следует, что при падении температуры с высотой в нижнем 250-метровом слое в набегающем потоке, равном примерно $0,6^\circ\text{C}/100$ м, над городом можно ожидать сверх-адиабатических градиентов.

В заключение необходимо отметить, что изучение трансформации температуры над городом имеет важное значение как для понимания условий формирования городского климата, так и для учета особенностей рассеяния примеси над ним.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Васильченко И. В., Вдовин Б. И. Применение аэрологических наблюдений при изучении загрязнения воздуха промышленными выбросами.— Труды ГГО, 1974, вып. 314, с. 97—103
2. Вдовин Б. И. Об особенностях стратификации нижнего километрового слоя воздуха над Ленинградом по данным вертолетных наблюдений.— Труды ГГО, 1972, вып. 293, с. 201—208.

3. Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. Вып. 4. Ч. IV.—Л.: Гидрометеониздат, 1958.—154 с.
4. Пановский Г. А., Брайер Г. В. Статистические методы в метеорологии.—Л.: Гидрометеониздат, 1972.—203 с.
5. Руководство по контролю загрязнения атмосферы.—Л.: Гидрометеониздат, 1979.—447 с.
6. Duckworth F. S., Sandberg J. S. The effect of cities upon horizontal and vertical temperature gradient.—Am. Meteorol. Soc. Bull., 1954, p. 35.

Г. П. Расторгуева

ОСОБЕННОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА НА ПРОМЫШЛЕННЫХ ПЛОЩАДКАХ

Исследованию городского климата в настоящее время посвящается большое количество теоретических и экспериментальных работ. В них показано, что внутри городской территории формируются четко обозначенные области тепла («острова тепла»). Значительный вклад в их образование вносит искусственный приток тепла, составляющий по приближенным оценкам до $\frac{1}{3}$ от годового притока солнечной радиации [1, 2]. Одним из основных источников искусственного тепла являются выбросы от промышленных предприятий, занимающих нередко значительные территории. Внутри этих территорий создается повышенное тепловое, аэрозольное и газовое загрязнение воздуха. До настоящего времени исследованию особенностей распределения параметров загрязнения и метеорологического режима на промплощадках не уделялось достаточного внимания. Между тем знание их помогает решению многих актуальных задач, связанных с охраной чистоты атмосферы.

Настоящая статья посвящена анализу материала наблюдений за температурой воздуха, проводившихся в летних условиях на площадках некоторых промышленных предприятий. Такие исследования проводятся в ГГО отделом исследований атмосферной диффузии и загрязнения атмосферы с 1972 г. на базе ежегодных экспедиций по обследованию качества воздуха в районе промышленных предприятий. Некоторые результаты наблюдений уже опубликованы [3]. Промышленные площадки современных заводов занимают довольно большие территории (до 5 км² и более), почти сплошь асфальтированы и имеют простую планировку. Основными источниками искусственного тепла на промплощадках являются газоходы, подающие газ в систему газоочистки, аэрационные фонари, система отопления и др.

Измерение температуры воздуха на промплощадках производилось с помощью суточных термографов, которые располагались между корпусами на высоте около 2 м от подстилающей поверхности. Территории между корпусами в Братске и Шелехове пред-

ставляли собой полузамкнутые асфальтированные дворы, а в Новочеркасске и Ачинске они были более открытыми. Для установки термографов использовались имеющиеся перекрытия, мачты или лестницы, причем приборы устанавливались вдали от препятствий и источников тепла. Датчик обеспечивался легкой защитой в виде бумажной ленты от солнечной радиации, атмосферных осадков и аэрозольного загрязнения. Температура воздуха для градуировки лент измерялась психрометром. Для сравнительного анализа на метеорологических площадках также имелись термографы.

Количество часов и пунктов измерения температуры воздуха на промплощадках представлены в табл. 1.

Таблица 1

Объем материала наблюдений за температурой воздуха на промышленных площадках

| Город | Число пунктов | Период экспозиции | |
|--------------|---------------|------------------------|-------------|
| | | дата | число часов |
| Братск | 3 | 16 VII—19 VIII 1974 г. | 170 |
| Новочеркасск | 4 | 17 VI—17 VII 1975 г. | 125 |
| Шелехов | 4 | 20 VII—6 VIII 1977 г. | 183 |
| Ачинск | 6 | 29 VI—12 VII 1978 г. | 247 |

В Шелехове и Новочеркасске опорная метеоплощадка располагалась в 1—2 км от завода в той же долине; в Братске она находилась в 5 км от завода в пониженной части рельефа, а в Ачинске — на зеленом газоне на окраине промплощадки, вдали от источников тепла.

Основным показателем перепада температуры воздуха между пунктом наблюдения на промплощадке и на опорной была синхронная разность температур ΔT . Поскольку оба пункта наблюдения располагались не далее чем в 5 км друг от друга, то при исследовании параметра ΔT влияние адвекции можно было не принимать во внимание.

Для каждого пункта наблюдений были получены средние часовые значения ΔT ; число их за период экспозиции показано в табл. 1. По имеющимся выборкам для каждой промплощадки были построены кривые распределения, представленные на рис. 1. Как видно, они являются одновершинными и имеют положительную асимметрию, что свидетельствует о преобладании положительного перепада температуры воздуха на промплощадках по сравнению с фоновой температурой. В Братске, Новочеркасске и Шелехове повторяемость положительного перепада ΔT составляла 70—80%, в Ачинске — 50—60%. Повторяемость отрицательных значений ΔT на промплощадках была небольшой: 10—20% в Ачинске и менее 10% — в остальных городах. Различия в формах кривых распределения между промплощадками разных городов связаны в основном с разными условиями погоды, а между корпусами одной промплощадки — с различиями локальных условий (проду-

ваемостью, затененностью и инсоляцией дворов), а также с влиянием разных источников искусственного тепла. Максимальные значения параметра ΔT составили 10—12°C для Братска и 7°C для Новочеркасска, где отмечалась малооблачная жаркая погода. В условиях частых дождей и повышенной повторяемости пасмурного неба в Шелехове и Ачинске средние значения оказались

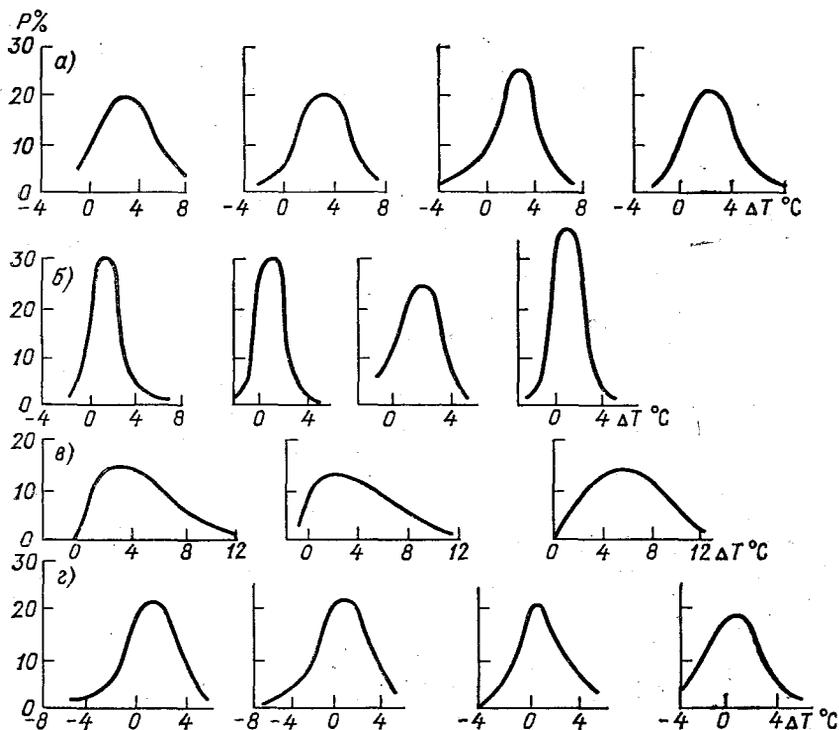


Рис. 1. Кривые распределения ежечасных значений ΔT .

а — Новочеркасск; б — Шелехов, в — Братск, г — Ачинск.

ниже, чем в Братске и Ачинске, а максимальные не превысили 5—6°C и отмечались при прояснениях неба ночью.

Разные для каждого города условия инсоляции, повторяемости пасмурного неба, а также особенности режима скорости ветра и температуры воздуха (табл. 2) отразились и на кривых суточного хода ΔT (рис. 2). Последние были построены по ежечасным значениям ΔT для каждой промплощадки. Как видно из рис. 2, наиболее сглаженная кривая суточного хода ΔT отмечена для Шелехова, наибольший суточный ход ΔT — для Братска. Все представленные кривые имеют вид периодической волны с максимальными значениями в ночные сроки — в период от 21 до 3 ч. В дневные часы значения ΔT близки к нулю, а в утренние сроки были даже

Метеорологические характеристики за период экспедиции
по наблюдениям на метеоплощадках

| Город | Ф° | Количество облачности, баллы | | Температура воздуха, °С | | | Относительная влажность, % | |
|--------------|----|------------------------------|--------|-------------------------|-------|------|----------------------------|------|
| | | общая | нижняя | ср. | макс. | мин. | макс. | мин. |
| Новочеркасск | 48 | 4,4 | 1,8 | 22,5 | 33,7 | 16,9 | 91 | 9 |
| Шелехов | 52 | 8,7 | 6,6 | 16,9 | 25,8 | 4,8 | 100 | 32 |
| Братск | 56 | 5,0 | 2,3 | 18,7 | 32,4 | 6,8 | 98 | 20 |
| Ачинск | 56 | 4,6 | 2,9 | 17,5 | 28,1 | 8,4 | 93 | 22 |

| Город | Ф | Абсолютная влажность, гПа | | Ср. скорость ветра на высоте 1 м, м/с | Число дней с дождем (% от общего числа дней) | Q Вт/м ² |
|--------------|----|---------------------------|------|---------------------------------------|--|---------------------|
| | | макс. | мин. | | | |
| Новочеркасск | 48 | 24,0 | 7,8 | 3,1 | 10 | 333,3 |
| Шелехов | 52 | 18,7 | 8,6 | 1,4 | 75 | 183,0 |
| Братск | 56 | 21,0 | 8,0 | 1,4* | 15 | 284,9 |
| Ачинск | 56 | 20,3 | 7,1 | 1,7* | 50 | 264,9 |

* Ночные наблюдения отсутствуют.

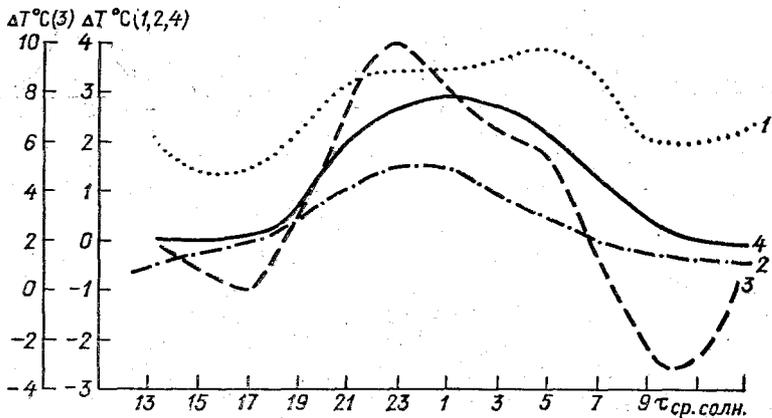


Рис. 2. Средний суточный ход ΔT .

1 — Новочеркасск, 2 — Шелехов, 3 — Братск, 4 — Ачинск.

отрицательными. Таким образом, область тепла на промплощадках в течение суток пульсирует и достигает максимального раз-

вития в ночные часы при ясной погоде с малой скоростью ветра. Типичным примером такого формирования и разрушения области тепла на промплощадке является суточный ход ΔT в Братске (рис. 2). Анализ ежечасных значений ΔT показал, что если в дневное время они испытывают неперiodические колебания около нуля, то в вечерние часы после захода солнца и в течение ночи они стабильны и постепенно увеличиваются до максимальных значений.

Проводившиеся на метеоплощадках городов актинометрические наблюдения позволили рассчитать по методу трапеций средние за период экспедиции суточные суммы суммарной радиации (последний столбец табл. 2). Расчеты показали, что искусственный приток тепла, выделяемого вследствие деятельности заводов, может составить 10 % от представленных в табл. 2 величин Q .

Таким образом, проведенные исследования показали, что на промышленных площадках на высоте 2 м от подстилающей поверхности формируется довольно устойчивая область тепла, интенсивность которой в большой степени определяется условиями погоды.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Берлянд М. Е., Кондратьев К. Я. Города и климат планеты.—Л.: Гидрометеиздат, 1972.—39 с.
2. Погосян Х. П., Бачурина А. А. Метеорологический режим города и градостроительство.—Л.: Гидрометеиздат, 1977.—66 с.
3. Расторгуева Г. П. Некоторые результаты экспериментальных исследований термического режима Запорожья.—Труды ГГО, вып. 332, с. 24—29.

*Э. Ю. Безуглая, Е. К. Завадская,
М. Н. Зашихин, И. А. Зильберштейн*

СТАТИСТИЧЕСКИЙ МЕТОД РАСЧЕТА СРЕДНЕГО ПОЛЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ПРИМЕСИ В ГОРОДСКОМ ВОЗДУХЕ

При проведении различных градостроительных мероприятий для правильного размещения постов наблюдений необходимы сведения о поле средних концентраций примесей в городе. Расчет его может быть выполнен приведенным ниже способом, основанным на расчете поля максимальных концентраций примесей по [4] и статистическом подходе к определению среднего уровня загрязнения воздуха [1].

Разовая концентрация примеси в любой точке города при наличии N источников складывается из концентраций примесей, поступающих в эту точку от выбросов отдельных источников:

$$q = q_1 + q_2 + \dots + q_N, \quad (1)$$

где q_1, q_2, \dots, q_N — концентрации веществ, которые могли бы быть измерены в данной точке при наличии выбросов только от одного (1-го, 2-го, ..., N -го) источника при данных метеоусловиях.

Статистические исследования показывают, что плотность вероятности появления концентрации примеси при постоянных выбросах для любой точки достаточно хорошо описывается логарифмически нормальным законом [1]. При таком распределении для нахождения средних концентраций может быть использована следующая формула:

$$\bar{q} = q_n \exp \left[\frac{0,12}{(b_r - 1)^2 z_1^2} - \frac{0,69}{(b_r - 1)} \right], \quad (2)$$

где параметры b_r и z_1 определяются через аргументы интеграла вероятности $\Phi(z)$.

Для нахождения средних значений по формуле (2) требуется знание величин P_1 и P_2 , которые представляют собой вероятности реализации метеорологических условий, когда наблюдается концентрация q выше заданных уровней q_n и $2q_n$.

Величина $\Phi(z)$ связана с P_1 и P_2 следующими соотношениями:

$$b_1 = 1 - 2P_1 = \Phi(z_1), \quad (3)$$

$$b_2 = 1 - 2P_2 = \Phi(z_2), \quad (4)$$

где

$$z_1 = \frac{\ln \frac{q_n}{m}}{s \sqrt{2}}, \quad (5)$$

$$z_2 = \frac{\ln 2 \frac{q_n}{m}}{s \sqrt{2}}, \quad (6)$$

а $\Phi(z)$ — интеграл вероятностей.

Из (5) и (6) следует, что

$$m = q_n e^{-\frac{\ln 2}{b_r - 1}}, \quad (7)$$

где

$$b_r = \frac{z_2}{z_1}. \quad (8)$$

В соответствии с предположениями, рассмотренными в [1], вероятность P_1 равна сумме повторяемости половины ситуаций с опасной скоростью ветра, повторяемости приподнятых инверсий над источником выброса и повторяемости штилевых зон в слое от земли до некоторой высоты. При этом q_n полагается равным половине максимальной концентрации ($c_m/2$), рассчитанной для данного источника в соответствии с [4]. Вероятность P_2 складывается из повторяемостей приподнятых инверсий и повторяемости штилевых зон. Сумма повторяемостей приподнятых инверсий и штилевых зон составляет вероятность превышения c_m .

Таким образом, с помощью формулы (2) при известных c_m , P_1 и P_2 можно рассчитать среднее значение концентрации примесей под факелом одиночного источника на расстоянии x_m от него.

Для городских условий средняя концентрация примеси в одной точке с учетом розы ветров может быть вычислена по формуле

$$\bar{q} = \sum_{i=1}^m P_i \sum_{j=1}^n c_{m_{i,j}} \cdot \Pi_j, \quad (9)$$

где m — число направлений ветра, P_i — нормированная повторяемость i -го направления ветра, n — число источников загрязнения атмосферы, $c_{m_{i,j}}$ — максимальная концентрация, создаваемая j -м источником при i -м направлении и скорости, при которой концентрация от всех источников при данном направлении максимальна:

$$\Pi_j = \frac{1}{2} \exp \left[\frac{0,12}{(b_r - 1)^2 z_1^2} - \frac{0,69}{(b_r - 1)} \right]. \quad (10)$$

Расчет $c_{i,j}$ производится по методике, изложенной в [4].

Для условий города, где преобладают в основном низкие источники выбросов, можно принять, что опасная скорость ветра u_m для всех источников изменяется в небольшом диапазоне (0—3 м/с), а $c_{m_{i,j}}$ принимает наибольшее значение при этих скоростях ветра. Тогда повторяемость метеорологических условий, используемых для расчета средней концентрации примеси в воздухе, может быть принята одинаковой для всех источников города.

Средняя концентрация примеси в одной точке города определяется по следующей формуле:

$$\bar{q} = \Pi \sum_{i=1}^m P_i \sum_{j=1}^n c_{m_{i,j}}, \quad (11)$$

где Π — определяет степень влияния климатических условий на загрязнение воздуха в данной точке города.

Следует отметить, что при использовании данного метода погрешность в расчете среднего связана с повторяемостью скорости u_m , которую следует брать в диапазоне 2—3-х значений скорости. Если величина соответствует скоростям, повторяемость которых в городе менее 10 %, то в этом случае использование метода затруднительно.

Для проверки метода были использованы данные о параметрах выброса всех источников для города среднего размера. При этом повторяемость скорости ветра 0—3 м/с составила 82 %, повторяемость приподнятых инверсий с нижней границей ниже 200 м — 4 %, а повторяемость штилевых зон в слое от земли до высоты трубы — 13 %. Величина $c_{m_{i,j}}$ определялась при $A = 200$.

Расчет средних концентраций сернистого газа проводился по программе, составленной на ЭВМ М-222. Результаты расчета представлены на рис. 1.

Для удобства анализа значения средних концентраций были нормированы на наибольшее вычисленное среднее значение. Как видно из рис. 1, зона наибольшего среднего уровня загрязнения

воздуха SO_2 смещена к юго-востоку, что обусловлено преобладанием северо-западных ветров, повторяемость которых для данного города составляет 37%. От этой зоны наблюдается снижение средних концентраций SO_2 к окраинам города, которое составляет 50—70% наибольшего среднего, что соответствует общим выводам о поле концентрации примесей в городах, полученным на основании экспериментальных данных [2].

Было проведено сравнение наблюдаемых и рассчитанных значений средних концентраций SO_2 для постов, указанных на рис. 1.

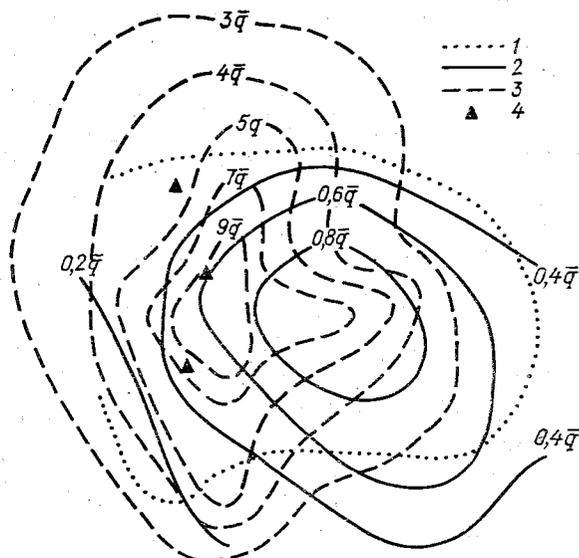


Рис. 1. Поле нормированных средних и максимальных концентраций сернистого газа.

1 — границы города, 2 — изолинии нормированных средних концентраций сернистого газа, 3 — изолинии нормированных максимальных концентраций сернистого газа, 4 — посты наблюдений.

Погрешность в расчетах по сравнению с фактическими данными наблюдений не превысила 20—40%. Из рис. 1 следует также, что посты наблюдений необходимо установить в юго-восточной части города, куда наиболее часто переносятся выбросы от основных источников загрязнения воздуха и где в настоящее время наблюдения не проводятся.

Одновременно рассчитывалось поле максимальных концентраций SO_2 (рис. 1). Сравнение полей максимальных (нормированных на наибольшее среднее) и средних концентраций показало, что области наибольших значений не совпадают. Наибольшие максимальные значения отмечаются в центре города, где расположено большое число источников вредных выбросов.

Отношения рассчитанных максимальных концентраций к средним на большей территории города составляли 4—15, а в отдель-

ных точках достигали 20. При этом в юго-восточной части города, где наблюдаются невысокие максимальные значения u и наибольший средний уровень загрязнения воздуха, q_m превышает q_{cp} в 4—5 раз. В зоне наибольших максимальных значений (западная и северо-западная части города) высокие средние концентрации отмечаются редко за счет низкой повторяемости направлений ветра от основных источников. В связи с этим здесь q_m в 15—20 раз выше q_{cp} . По тем же параметрам выбросов и с той же розой ветров рассчитаны поля средних и максимальных концентраций примесей для города, в котором повторяемости скоростей ветра 0—3 м/с равны 67 %, приподнятых инверсий — 9 %, а штилевых зон — менее 1 % (для города, расположенного в центре ЕТС). В этом случае во всех точках города c_m ниже, так как при расчете c_m принималось $A = 120$.

Распределение средних концентраций примеси аналогично показанному на рис. 1, но за счет более благоприятных климатических условий сами значения ниже примерно в 2 раза. В наиболее загрязненной части города q_m в 8—9 раз больше q_{cp} , а к окраине это отношение возрастает до 30 и более.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Безуглая Э. Ю., Клинго В. В. Статистический метод оценки влияния метеорологических условий на содержание примесей в атмосфере.— Труды ГГО, 1974, вып. 314, с. 81—95.
2. Безуглая Э. Ю., Завадская Е. К. Распределение концентрации примесей в городском воздухе.— Труды ГГО, 1975, вып. 325, с. 87—96.
3. Зашихин М. Н., Канчан Я. С., Оникул Р. И. Об унификации расчетов загрязнения атмосферы от многих источников с помощью ЭВМ.— Труды 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.—47 с.

Л. Р. Сонькин, Т. П. Ивлева

ВОПРОСЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ВОЗДУХА В ГОРОДЕ ОТДЕЛЬНЫМИ ПРИМЕСЯМИ

Анализ метеорологических условий загрязнения воздуха в городе и разработка схем прогноза применительно к отдельным примесям представляет интерес в связи с различием особенностей распространения в атмосфере каждой из примесей. Это связано главным образом с условиями поступления различных ингредиентов в атмосферу. Так, сернистый газ в ряде случаев поступает в воздух с горячими газами через высокие трубы ТЭЦ и ГРЭС, а окись углерода выделяется с выхлопами автомобилей на малой высоте. Такое положение определяет разное влияние условий погоды на загрязнение воздуха различными примесями. Установ-

лено, что максимальные концентрации от высоких горячих источников выбросов отмечаются обычно при скоростях ветра 5—7 м/с, а от низких маломощных источников — при 0—1 м/с.

Эти положения в значительной степени учитывались в ранее выполненных исследованиях [1, 2]. Разработанный в указанных работах способ прогнозирования предполагает независимое одновременное составление двух видов прогнозов загрязнения атмосферы: от одиночных источников и от источников по городу в целом. Составляющие загрязнения воздуха от этих источников, по сути дела, дополняют друг друга. При этом составляющая, характеризующая очаги концентраций, создающиеся выбросами крупных объектов, относится к тем примесям, которые ими выбрасываются.

Схемы прогноза загрязнения воздуха по городу в целом относились к совокупности примесей. Целесообразность таких разработок определялась рядом обстоятельств. Во-первых, здесь анализируются и прогнозируются значения параметра P , характеризующего одновременные изменения концентраций над всем городом. Это только одна из составляющих загрязнения воздуха в городе, которая, по-видимому, в основном формируется за счет многочисленных однотипных источников низких выбросов, а также городской фоновой концентрации. Анализ показывает, что случай высокого загрязнения воздуха по городу в целом ($P > 0,35$) почти всегда определяются вкладом нескольких примесей. По материалам нескольких городов, где параметр P был рассчитан по наблюдениям за концентрациями четырех примесей (Курск, Алма-Ата, Чита) отобрано 118 случаев с $P > 0,35$. Оказалось, что 97 раз (82 %) высокое фоновое загрязнение воздуха создавалось не менее чем тремя ингредиентами из четырех. Можно полагать, что случаи роста или уменьшения загрязнения воздуха одновременно несколькими ингредиентами в наибольшей степени связаны с метеорологическими ситуациями. Возможность и целесообразность разработки схем прогноза городского фонового загрязнения воздуха совокупностью примесей определяется и тем, что особенности влияния метеорологических условий на концентрации отдельных примесей в значительной степени учитываются при прогнозе в районе одиночных источников.

В то же время бесспорный интерес представляет анализ и прогноз городского фонового загрязнения воздуха отдельными примесями, выяснение вопроса о степени различия влияния метеорологических условий на уровень концентраций разных ингредиентов по городу в целом. Решению данной задачи и посвящена настоящая статья. В качестве обобщенной характеристики загрязнения воздуха по городу в целом здесь, как и в ранее выполненных работах, принят параметр $P = m/n$, где n — общее количество наблюдений за концентрациями в течение дня, m — количество существенно повышенных концентраций за этот же период. Следует заметить, что параметр P не только характеризует степень одновременного роста или уменьшения концентраций над городом, но и весьма тесно

коррелирует со средней по городу концентрацией примесей в воздухе (табл. 1).

Таблица 1

Коэффициенты корреляции между средними концентрациями примесей в городе и параметром P , рассчитанным по отдельным примесям

| Город | Примесь | | |
|-----------|-----------------|-----------------|------|
| | SO ₂ | NO ₂ | CO |
| Ленинград | 0,86 | 0,75 | 0,89 |
| Чита | 0,94 | 0,66 | 0,63 |

Анализировались материалы наблюдений за загрязнением воздуха в городах Ленинград, Чита и Донецк за четырехлетний период. Чтобы увеличить количество используемых измерений для расчета одного значения параметра P , указанная характеристика рассчитывалась по данным за удлиненный период: 15, 18 и 21 ч

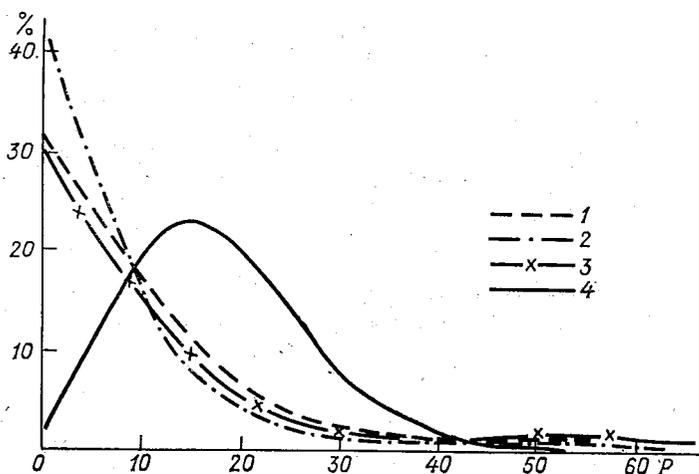


Рис. 1. Распределение повторяемостей (%) параметров P по сернистому газу (1), двуокиси азота (2), окиси углерода (3) и по совокупности примесей (4).

предыдущего дня и 7, 10 и 13 ч последующего дня. Такое объединение сроков возможно в связи с тесной корреляцией ($r \approx 0,8$) между значениями параметров P за указанные два периода [3]. Одновременно решалась задача прогноза загрязнения воздуха на более длительный, чем ранее, промежуток времени.

В первую очередь рассматривалась статистическая структура значений параметра P по отдельным примесям для ее сравнения

со структурой параметра P , рассчитанного для совокупности примесей. На рис. 1 представлены кривые распределения, полученные по материалам Читы. Аналогичная картина выявлена по данным Донецка и Ленинграда. Из рисунка видно, что статистическое распределение параметра P в случае отдельных примесей и их совокупности существенно различается. Если распределение параметра P , относящегося к нескольким примесям, близко к нормальному, то для отдельных примесей максимальная повторяемость отме-

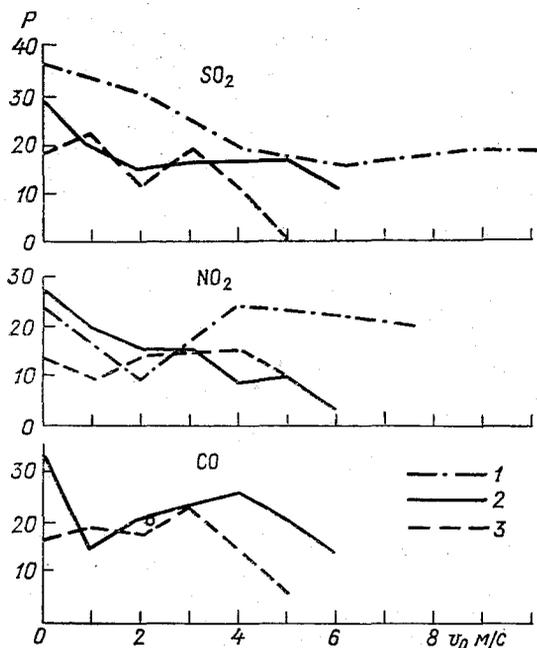


Рис. 2. Распределение параметра P по отдельным примесям в зависимости от скорости ветра у поверхности земли для Донецка (1), Ленинграда (2) и Читы (3).

чается при низких, а также при высоких значениях параметра P . Таким образом, в последнем случае более четко выражен процесс одновременного роста или падения загрязнения воздуха над всем городом.

Для суждения о влиянии метеорологических условий на загрязнение воздуха в городе отдельными примесями рассмотрены связи между параметром P и некоторыми метеорологическими элементами. На рис. 2 приводится характер зависимости параметра P , рассчитанного по измерениям концентраций сернистого газа, двуокиси азота и окиси углерода, от скорости ветра на уровне флюгера. Видно, что существенных различий в характере связей для разных примесей не обнаруживается. Прослеживаются установ-

ленные в ранее выполненных работах (например, [2] и др.) два максимума загрязнения воздуха в зависимости от скорости ветра (при $v = 0 \div 1$ м/с и $v_0 = 3 \div 5$ м/с). При этом следует отметить, что для окиси углерода и двуокиси азота, основная масса которых поступает в атмосферу через низкие источники, второй максимум выражен так же четко, как для сернистого газа. Указанный эффект, очевидно, связан с тем обстоятельством, что максимальная концентрация, создаваемая приземными источниками, отмечается при штиле только непосредственно в зоне выбросов, в то время как стационарные посты находятся на некотором расстоянии от линии движения автомобилей. С удалением от приземного источника опасная скорость ветра возрастает.

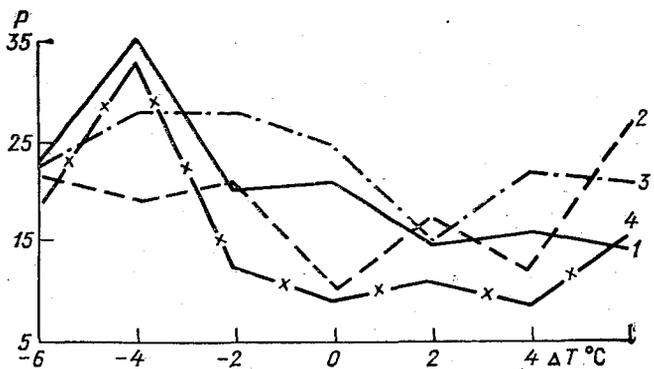


Рис. 3. Распределение параметра P по сернистому газу (1), двуокиси азота (2), окиси углерода (3) и пыли (4) в зависимости от градиента температуры ΔT в 500-метровом слое для Ленинграда.

На рис. 3 представлена зависимость параметра P , рассчитанного по данным концентраций отдельных примесей, от вертикальной разности температур в нижнем 500-метровом слое. Графики составлены по материалам Ленинграда. Здесь также не обнаруживаются принципиальные различия в ходе кривых, которые в определенной степени повторяют друг друга.

На основании представленных материалов можно сделать вывод, что некоторые различия в характере связей между метеорологическими условиями и содержанием в воздухе разных примесей существуют, но они не являются принципиальными и определяются главным образом различной теснотой и некоторым смещением максимумов и минимумов.

В целом полученные материалы указывают на то, что разработка прогностических схем применительно к отдельным примесям является целесообразной. Это может позволить уточнять и конкретизировать прогноз городского фонового загрязнения атмосферы.

Схемы были разработаны по материалам Ленинграда, Донецка и Читы по методу последовательной графической регрессии [2, 4].

В качестве предикторов были взяты скорости ветра на уровнях земли (v_0) и 500—1000 м (v_{500}), градиент геопотенциала на изобарических поверхностях АТ₉₂₅ или АТ₈₅₀ ($\Delta H/\Delta n$), вертикальная разность температур в пограничном слое атмосферы, температура воздуха у земли (T_0), направление ветра (d). В отдельных случаях использовался параметр P' (значение P за предыдущий период). Следует, однако, отметить, что при данном рассмотрении (удлиненные промежутки времени, отстоящие друг от друга более чем на сутки, и отдельные примеси) инерционный фактор проявляется относительно слабо. При построении прогностических графиков приходится считаться и с указанным ранее значительным разбросом значений параметра P , рассчитанным для отдельных примесей. В этой связи основной характеристикой поля загрязнения воздуха на прогностических графиках является повторяемость повышенных значений параметра P .

Схема прогноза загрязнения воздуха сернистым газом, двуокисью азота, фенолом, а также совокупностью этих трех примесей составлена по материалам Донецка. Предикторы и структура их использования видны из следующих формул:

$$P_{\text{SO}_2} = F \left\{ f \left[\Pi \left(P', \frac{\Delta H}{\Delta n} \right), \Pi (\Delta T, v_0) \right], \Pi (T_0, d) \right\},$$

$$P_{\text{NO}_2} = F \left[\Pi \left(T_0, \frac{\Delta H}{\Delta n} \right), \Pi (\Delta T, v_0) \right],$$

$$P_{\text{Ф}} = F \left[\Pi (T_0, d), \Pi (\Delta T, v_0) \right],$$

$$P_{\text{сов}} = F \left\{ f \left[\Pi (T_0, v_0), \Pi \left(P', \frac{\Delta H}{\Delta n} \right) \right], \Pi (T_0, d) \right\}.$$

Здесь Π — повторяемость (%) значений $P \geq 0,30$, остальные обозначения приводятся ранее.

На рис. 4 на корреляционных графиках приводятся поля изолиний повторяемостей $P \geq 0,30$ для сернистого газа и двуокиси азота в зависимости от предикторов v_0 и ΔT . В целом структура обоих графиков близка. Относительно высокое загрязнение воздуха отмечается, когда слабые ветры сопровождаются инверсией и когда при умеренном ветре (5—7 м/с) отмечается неустойчивая термическая стратификация. В случае двуокиси азота дополнительно область высокого загрязнения прослеживается, когда инверсионные условия сопровождаются скоростью ветра 5—7 м/с. На конечном (финальном) графике выделяются три области, соответствующие высокому, повышенному и пониженному загрязнению воздуха. Для примера на рис. 5 приводится график для прогноза содержания сернистого газа.

В табл. 2 приводятся данные об оправдываемости прогнозов высокого загрязнения воздуха и предсказуемости этих случаев. Из

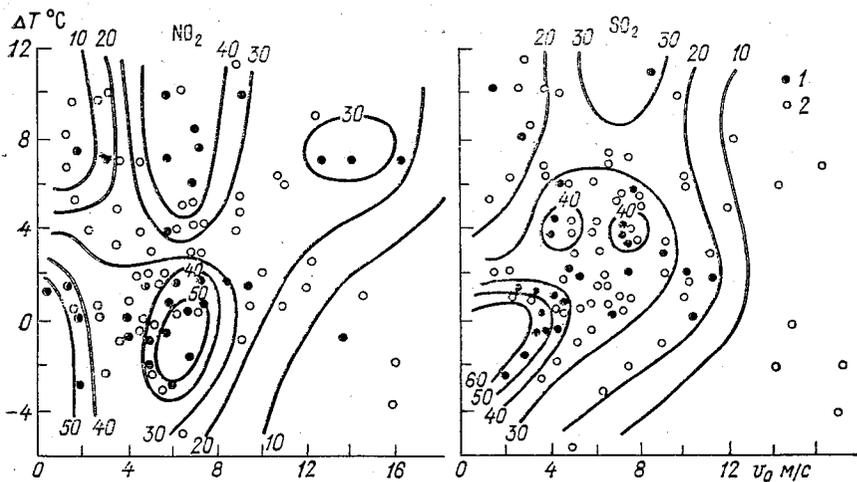


Рис. 4. Корреляционные графики зависимостей параметра P по сернистому газу и двуокиси азота от градиента температуры в пограничном слое и скорости ветра у поверхности земли для Донецка.

1) $P \geq 0,30$, 2) $P < 0,30$.

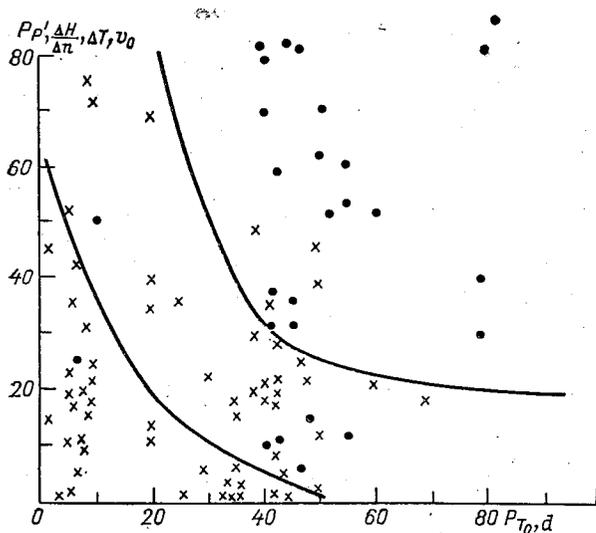


Рис. 5. График для прогноза загрязнения воздуха сернистым газом в Донецке.

таблицы видно, что в целом оправдываемость прогнозов высокого загрязнения воздуха и его предсказуемость удовлетворительны. При этом следует напомнить, что предсказывается характеристика загрязнения воздуха за длительный период, предикторы относятся к начальному моменту этого периода (к 15 ч), к тому же они прогнозируются существующими способами. Схемы для фенола и двуокиси азота разработаны без учета P' .

Таблица 2

Оправдываемость прогнозов высокого загрязнения воздуха и его предсказуемость (%)

| Параметр | Примесь | | | |
|--------------------------------------|-----------------|-----------------|-------|-------------|
| | SO ₂ | NO ₂ | фенол | все примеси |
| Оправдываемость прогнозов I-й группы | 83 | 70 | 50 | 85 |
| Предсказуемость | 78 | 61 | 84 | 50 |

Было рассмотрено 20 составленных прогнозов городского фонового загрязнения воздуха отдельными примесями (сернистый газ, двуокись азота, фенол) и всеми примесями вместе. Рассмотрение этих прогнозов показывает, что если предсказывается высокое загрязнение воздуха (I группа) всеми примесями, то относительно отдельных примесей также ожидается I группа. Если прогнозируется повышенное загрязнение воздуха всеми примесями (II группа), то в большинстве случаев (5 из 6) для одной из примесей может осуществиться I группа. Когда прогнозируется общее пониженное загрязнение (III группа), то в отдельных случаях также может ожидать высокое загрязнение отдельными примесями.

Таким образом, несмотря на отсутствие принципиальных различий характера связей между метеоусловиями и содержанием в атмосфере отдельных примесей, разработка прогностических схем для заданных примесей позволяет детализировать прогноз городского фонового загрязнения воздуха.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Берлянд М. Е., Соломатина И. И., Сонькин Л. Р. О прогнозировании загрязнения воздуха.— Метеорология и гидрология, 1972, № 9, с. 11—18.
2. Методические указания по прогнозу загрязнения воздуха в городах/Под ред. М. Е. Берлянда.— Л.: Гидрометеиздат, 1979.
3. Сонькин Л. Р. Некоторые возможности прогноза содержания примесей в городском воздухе.— Труды ГГО, 1970, вып. 254, с. 121—132.
4. Сонькин Л. Р. Вопросы прогнозирования фонового загрязнения воздуха в городах.— Труды ГГО, 1974, вып. 314, с. 42—51.

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ГОРОДСКОГО ВОЗДУХА В ЛЕТНИЙ СЕЗОН

В ранее выполненных работах [5, 6, 7] показано, что целесообразно проводить анализ связей между загрязнением воздуха и метеорологическими условиями и составлять прогностические схемы раздельно по сезонам. Такой подход позволяет более полно учитывать метеорологические характеристики, определяющие высокое содержание примесей в конкретную часть года.

Метеорологический режим в каждом сезоне отличается наличием определенных погодных комплексов. В годовом ходе меняется повторяемость и продолжительность ситуаций, благоприятных для накопления или рассеивания вредных веществ в атмосфере. Летом состояния с устойчивой стратификацией атмосферы имеют незначительную продолжительность и обычно наблюдаются в ночное время. Слабые ветры в теплую часть года не всегда характерны для высокого загрязнения воздуха. Одной из особенностей метеорологического режима пограничного слоя является также развитие в дневные часы интенсивной турбулентности, конвекции, сопровождающихся сверхадиабатическими температурными градиентами. Таким образом, городское фоновое загрязнение воздуха летом формируется под влиянием метеорологических условий, отличающихся от условий других сезонов.

В летний период связи между концентрациями вредных веществ и метеорологическими параметрами нередко выражены менее четко, чем в другие сезоны. Поэтому при разработке схемы прогноза загрязнения воздуха имеются существенные трудности. Для их преодоления проведено специальное исследование метеорологических факторов, которые в значительной степени отражают физические процессы в приземном слое и определяют сезонные особенности в проявлениях связей между концентрациями и метеопараметрами [6, 7]. На этой основе выявлены наиболее информативные предикторы для прогнозирования в летний период.

Однако, в большинстве работ, относящихся к данной проблеме, вопросы, касающиеся исследования метеорологических условий формирования интенсивного загрязнения воздуха в сезонном аспекте, освещены недостаточно.

При выполнении настоящей работы детально проанализированы методы прогноза загрязнения воздуха с точки зрения возможности применения их в летний сезон.

При разработке любой прогностической схемы неизбежна формализация отдельных закономерностей и связанных с нею неучет части зависимостей. В большинстве методов рассматривается одновременно влияние нескольких основных параметров, в значительной степени определяющих содержание примесей в городском воздухе. Данный принцип положен в основу статистических мето-

дов прогнозирования загрязнения воздуха, разработанных как в СССР, так и за рубежом.

В последние годы создано большое количество схем, основанных на методе линейной регрессии. В ряде случаев прогнозы, составленные с использованием уравнений линейной регрессии, имеют высокую оправдываемость при выбранном диапазоне метеорологических условий в зимний период. В летние месяцы наблюдаются значительные суточные амплитуды метеорологических элементов, неблагоприятные условия имеют небольшую продолжительность. Поэтому достаточно сложно выделить метеорологические ситуации, при которых сохраняется линейная зависимость концентраций от метеорологических предикторов. Таким образом, данный метод находит весьма ограниченное применение в летние месяцы.

В [1] исследованы возможности прогноза загрязнения воздуха методом распознавания образов. В рассматриваемой схеме также недостаточно учитывается нелинейность связей между содержанием примесей и отдельными метеорологическими элементами. Применение данной схемы дает положительные результаты только в тех случаях, когда имеются довольно существенные различия между средними значениями метеорологических параметров, соответствующих отдельным группам уровней концентраций. Известно [4], что такие различия в теплый период менее выражены, чем в другие сезоны, поэтому применение упомянутой схемы малоэффективно для прогнозирования летом.

В качестве примера приводится табл. 1, в которой показаны средние значения (\bar{x}) и дисперсии (σ) скорости ветра на высотах флюгера (v_0) и 500 м (v_{500}) для трех групп уровней концентраций в Ленинграде зимой и летом в первую половину дня.

Таблица 1

Средние концентрации предикторов (\bar{x}) и их дисперсии (σ) в группах высокого (I), среднего (II) и относительно пониженного (III) загрязнения воздуха

| Предиктор | Характеристика | Зима | | | Лето | | |
|-----------|----------------|------|------|------|------|-----|-----|
| | | I | II | III | I | II | III |
| v_0 | \bar{x} | 1,44 | 1,84 | 6,25 | 2,8 | 3,1 | 2,9 |
| | σ | 2,4 | 2,3 | 5,2 | 1,2 | 1,6 | 1,8 |
| v_{500} | \bar{x} | 6,1 | 8,6 | 13,3 | 7,8 | 7,4 | 8,0 |
| | σ | 3,4 | 4,6 | 4,4 | 3,4 | 4,2 | 4,2 |

Как видно из табл. 1, в летний сезон средние значения скоростей ветра и их дисперсий почти не отличаются для выделенных групп значений концентраций.

В созданных в США схемах [8] используется допущение о том, что интенсивное скопление примесей формируется при ослабленном переносе и устойчивой стратификации в пограничном слое ат-

мосферы. При этом не учитывается ряд существенных закономерностей распространения примесей. Не рассматривается влияние ряда параметров: направления ветра, температуры в пограничном слое атмосферы, инерционного фактора и других характеристик. В то же время нередко рост содержания примесей отмечается при условиях, отличных от застойных, причем повторяемость таких состояний особенно велика в летнее время. В теплый период, очевидно, не выполняется один из критериев рассматриваемой схемы, а именно сохранение застойной ситуации в течение 36 часов. На этом основании применение упомянутой схемы представляется не всегда возможным для прогнозирования в летний сезон.

В работах [6, 7] показано, что при прогнозировании загрязнения воздуха в теплый период наиболее эффективными оказываются схемы, составленные по методу множественной графической регрессии. Одним из преимуществ упомянутого способа является возможность учета нелинейности связей. Данная схема обладает достаточной гибкостью, поскольку в качестве предикторов могут использоваться такие метеорологические параметры и их сочетания, которые весьма полно характеризуют условия интенсивного скопления примесей в каждом конкретном городе и сезоне.

Известно, что одним из показателей эффективности прогностических схем является оправдываемость предупреждений случаев высокого загрязнения воздуха.

В Ленинградском бюро погоды выполнена сравнительная оценка степени предупрежденности высоких уровней концентраций по методу линейной регрессии и множественной графической регрессии. Оказалось, что по первой схеме можно предсказать 59 % случаев высокого содержания примесей в летний сезон, по второй схеме — 77 % [2].

Обычно при прогнозировании в зимний сезон в качестве предикторов используются следующие параметры: скорость ветра на высоте флюгера (v_0) и AT_{925} , AT_{850} . За характеристику интенсивности вертикального перемешивания принимается разность температур (ΔT) между поверхностью земли и AT_{925} .

Связь между содержанием примесей, скоростью ветра и параметром ΔT в подавляющем большинстве случаев достаточно объективно характеризует условия интенсивного загрязнения при слабом ветре и устойчивом состоянии атмосферы в 500-метровом слое, а также при ситуациях с незначительно развитой турбулентностью. Поскольку в холодный период повышена повторяемость застойных условий, рассматриваемые предикторы с полным основанием используются в прогностической схеме зимнего сезона.

Как показали испытания данного метода, оправдываемость прогнозов в зимний сезон достаточно высокая и составляет в среднем 85 %. Учет дополнительных качественных условий повышает обеспеченность прогнозов примерно на 10 %.

Использование тех же предикторов в схеме летнего сезона в ряде случаев снижает обеспеченность прогнозов.

В табл. 2 приводятся результаты испытаний схемы графической регрессии, выполненные в 15 городах страны в 1976—1977 гг. [3]. Как видно из табл. 2, в большинстве городов оправдываемость прогнозов в теплый сезон ниже, чем в холодный.

Таблица 2

Оправдываемость (%) прогнозов загрязнения воздуха, составленных по схеме множественной графической регрессии

| Город | Сезон | | Город | Сезон | |
|---|-------|------|--|-------|------|
| | зима | лето | | зима | лето |
| <i>Предикторы одинаковые для зимнего и летнего периодов</i> | | | Свердловск | 85 | 75 |
| Алма-Ата | 80 | 75 | Фрунзе | 95 | 84 |
| Горький | 81 | 78 | Хабаровск | 87 | 82 |
| Ереван | 75 | 66 | Чита | 88 | 78 |
| Киев | 93 | 89 | Ленинград | 85 | 78 |
| Куйбышев | 84 | 77 | <i>Предикторы различные для зимнего и летнего периодов</i> | | |
| Курск | 87 | 77 | Владивосток | 82 | 85 |
| Минск | 78 | 64 | Ленинград | 85 | 85 |
| Мурманск | 85 | 88 | Таллин | 86 | 90 |
| Омск | 80 | 70 | Чита | 88 | 93 |
| Ростов-на-Дону | 89 | 87 | Южно-Сахалинск | 86 | 91 |

На основе выявленных особенностей метеорологического режима в теплый сезон оказалось возможным усовершенствовать рассматриваемую прогностическую схему применительно к данному периоду. В [5, 6, 7] выполнены разработки по исследованию тех параметров, которые достаточно полно характеризуют факторы, определяющие формирование опасных метеорологических комплексов.

По материалам наблюдений в Ленинграде составлена схема с учетом физических особенностей загрязнения воздуха в летний сезон [7]. Так, весьма тесные связи между уровнем концентраций и стратификацией атмосферы в утренние часы летом удалось получить при совместном рассмотрении нижней границы приподнятой инверсии и состояния устойчивости более низких слоев городского воздуха. В дневные часы информация о высоте слоя перемешивания может использоваться в качестве параметра толщины слоя перемешивания, в котором развивается турбулентный обмен и конвекция.

В предлагаемой прогностической схеме зависимость от температуры воздуха рассматривается при различных значениях вертикального перепада скоростей ветра в приземном слое. Как известно, данный параметр зависит как от стратификации, так и от развития турбулентности в анализируемом слое, поэтому он является одним из показателей интенсивности перемешивания.

По нашим рекомендациям в пяти городах проведены испытания предложенной схемы. В табл. 2 показана также оправдываемость

мость прогнозов по данному методу. Как следует из таблицы, включение предикторов, учитывающих особенности метеорологического режима летом, повышает оправдываемость прогнозов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Генихович Е. Л., Гущин В. А., Сонькин Л. Р. О возможности прогноза загрязнения городского воздуха методом распознавания образов.— Труды ГГО, 1973, вып. 293, с. 21—25.
2. Иванова Е. И. Прогноз загрязнения воздушной среды г. Ленинграда в летний период.— Сб. работ Ленинградской ГМО, 1978, № 10, с. 22—32.
3. Методические указания по прогнозу загрязнения воздуха в городах.— Л.: Гидрометеоиздат, 1979.—76 с.
4. Сонькин Л. Р. и др. О влиянии метеорологических условий на загрязнение воздуха в различных городах.— Труды ГГО, 1975, вып. 325, с. 52—60.
5. Сонькин Л. Р., Храпаченко В. А. Содержание примесей в городском воздухе в зависимости от метеорологических условий в летний сезон.— Труды ГГО, 1973, вып. 293, с. 68—77.
6. Сонькин Л. Р., Храпаченко В. А. Уточнение схем прогнозирования загрязнения воздуха в городе с учетом новых результатов анализа информации.— Труды ГГО, 1975, вып. 352, с. 65—70.
7. Храпаченко В. А. Вопросы прогнозирования загрязнения воздуха в летний сезон.— Труды ГГО, 1977, вып. 387, с. 52—58.
8. Gross E. The national air pollution potential. Forecast program.— ESSA Techn. Mem. WBTM, 47, National Meteorol. Center, 1970, p. 28.

Л. И. Елекова

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА РАЗЛОЖЕНИЯ ПОЛЕЙ ПО ЕСТЕСТВЕННЫМ ОРТОГОНАЛЬНЫМ ФУНКЦИЯМ ДЛЯ АНАЛИЗА И ПРОГНОЗА ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРЫ

Прогноз загрязнения воздуха является одной из важнейших задач проблемы обеспечения чистоты атмосферы. Разработка такого прогноза ведется в двух направлениях: гидродинамический прогноз, основанный на математических моделях, и физико-статистический прогноз, в котором используются материалы наблюдений за загрязнением воздуха. В СССР развиваются оба эти направления.

В настоящее время в практику широко внедряются гидродинамический метод прогноза загрязнения воздуха от отдельных источников и физико-статистический метод прогноза от многих источников или в целом по городу.

Методика физико-статистического прогноза разработана в [4], она основана на изучении зависимостей между метеорологическими характеристиками и параметрами загрязнения воздуха. Для описания загрязнения воздуха в целом по городу введен [1, 6] параметр $P = m/n$, где n — общее количество наблюдений за какой-то промежуток времени, m — число наблюдений с концентрациями, превышающими в 1,5 раза среднесезонные значения за тот же промежуток времени. Параметр P рассчитывается как по отдельным

ингредиентам, так и по всем примесям вместе. Он легко определяется по данным наблюдений и не зависит от среднего уровня загрязнения воздуха в городе, следовательно, его величина в основном определяется метеорологическими факторами.

На основании статистического анализа обширного материала установлены связи параметра P с некоторыми метеорологическими элементами, а также с сочетаниями неблагоприятных метеорологических условий, таких, как застой воздуха, приподнятая инверсия, опасная скорость ветра и др. Сформулированы прогностические правила по ряду городов СССР и показана их высокая оправдываемость [1, 6, 7].

В данной статье намечены пути к разработке метода прогноза повышенного уровня загрязнения воздуха в городе с помощью метода разложения полей по естественным ортогональным функциям (е. о. ф.).

Суть метода е. о. ф. изложена в [1, 2, 5], она состоит в том, что концентрацию, являющуюся функцией совокупности координат и времени $q(x, t_n)$, можно представить в виде:

$$\overline{q(x, t_h)} - \bar{q}(x, t) = \sum_{i=1}^N a_i(t_h) \overline{\varphi_i(x)}, \quad (1)$$

где $q(x, t_h)$ — текущая концентрация в пункте наблюдения в определенное число месяца t года h ; N — число членов разложения, $\bar{q}(x, t)$ — среднее значение концентрации в пункте наблюдения за h лет; $a_i(t_h)$ — i -й коэффициент разложения по е. о. ф. горизонтальных координат за t -ые сутки h -го года, $\varphi_i(x)$ — i -я компонента е. о. ф. горизонтальных координат x ; i — порядковый номер члена разложения.

Известно [5], что $\varphi_i(x)$ представляют собой собственные векторы корреляционной матрицы поля концентраций, т. е. ортогональные функции, зависящие только от пространственной переменной. Коэффициент $a_i(t_h)$ рассчитывается по формуле [5]:

$$a_i(t_h) = \sum_{k=1}^M [q(x, t_h) - \bar{q}(x, t)] \varphi_i(x_k), \quad (2)$$

где $k = 1, 2, \dots, M$ — количество пунктов в городе.

Из формулы (1) видно, что сумма всех членов разложения дает полное описание поля концентраций.

Основное преимущество метода в том, что он позволяет сконцентрировать информацию о состоянии поля в нескольких первых членах ряда разложения. Важным свойством данного метода является также то, что он дает возможность отделить информацию о крупномасштабных свойствах поля от несущественной мелко-масштабной (т. е. от шумов). Это особенно важно при анализе большого статистического материала.

Для статистического анализа данных о загрязнении воздуха этот метод был применен в работах [2, 3, 8]. Результаты этих работ показывают, что с помощью первых двух-трех членов разло-

жения можно описать от 70 до 90 % суммарной дисперсии поля концентраций. При этом вклад первого члена составляет почти половину общей дисперсии концентрации примеси. Как было установлено в [2], первый член разложения характеризует ту часть суммарной дисперсии, которая определяется одновременными изменениями уровня загрязнения воздуха по всему городу. Второй член разложения характеризует составляющую поля концентрации, связанную с основными отклонениями от одновременного загрязнения воздуха, например, за счет направленного переноса примеси или «острова тепла».

Поле концентрации примеси вместо набора значений концентраций на пунктах можно описать несколькими первыми коэффициентами разложения $a_i(t_h)$. Коэффициент a_1 характеризует изменение загрязнения в целом по городу. Сравнение его с параметром P [3, 7] показало, что изменение во времени этих величин почти одинаково. Обе эти величины являются относительными характеристиками и определяют одновременное загрязнение воздуха на всех пунктах города. Как a_1 , так и P характеризуют изменение во времени общего фона загрязнения воздуха без учета пространственной изменчивости. Для более детального описания структуры загрязнения воздуха в городе необходимо учитывать, кроме первого члена, также и последующие (второй и третий члены разложения).

Установив связи нескольких первых коэффициентов разложения с метеорологическими элементами, следует перейти к прогнозу загрязнения воздуха по следующей схеме: прогноз метеоусловий — прогноз коэффициентов разложения — прогноз концентраций.

Основным и недостаточно разработанным элементом в данной схеме является установление зависимостей между коэффициентами $a_i(t_h)$ и метеорологическими условиями.

В работе [3] изучались зависимости между коэффициентом a_1 и метеорологическими элементами (температурой воздуха, скоростью ветра у земли и направлением ветра). Установлена связь с температурой воздуха, которая показала, что между a_1 и температурой воздуха существует обратная зависимость. Выявлена зависимость между третьим коэффициентом разложения (a_3) и направлением ветра.

В настоящей работе рассматриваются результаты статистического анализа данных по загрязнению атмосферы на примере одного из городов Западной Сибири.

Исходным материалом послужили данные о средней концентрации SO_2 за утренний (6—12 ч) и вечерний (15—21 ч) сроки наблюдений на восьми стационарных пунктах за зимний период (XII—II). Анализировался 8-летний ряд наблюдений (1969—1971 и 1974—1979 гг.; 1972 и 1973 гг. из расчетов исключались в связи с большим количеством пропусков в наблюдениях). Концентрация в отсутствующие сроки заменялась ее нормой, которая определялась как среднемесячное значение концентрации SO_2 отдельно в первую и вторую половину дня для каждого пункта. Всего

использовано 5376. полусуточных значений концентраций SO_2 . Расчеты проводились по программе И. И. Поляка на ЭВМ М-222.

В табл. 1 дается оценка вкладов в общую дисперсию поля концентраций отдельных членов ряда в процентах от суммарной фактической дисперсии (D), а также суммарный вклад в D при добавлении последующих членов. Как видно из таблицы, информация, описываемая первым членом разложения, составляет 58,8 %, вторым — 13,6 % суммарной дисперсии (D), а в сумме они дают 72,4 % всей изменчивости SO_2 в городе. Последующие члены разложения описывают до 6 % D .

Таблица 1

Оценка точности представления полей концентраций сернистого газа первыми членами разложения

| Члены разложения (i) | Вклад (λ_i/D) члена разложения в суммарную дисперсию (D), % | Суммарный вклад ($\sum \lambda_i/D$), % |
|--------------------------|---|---|
| 1 | 58,8 | 58,8 |
| 2 | 13,6 | 72,4 |
| 3 | 5,8 | 78,2 |
| 4 | 5,6 | 83,8 |

Примечание. В таблице λ_i — собственные числа корреляционной матрицы.

Анализ полей е. о. ф. показал, что в поле первой е. о. ф. в северо-западной и южной частях города отмечены наибольшие значения функций $\varphi_1(x)$, обусловленные размещением в этих районах большинства промышленных предприятий, что подтверждает выводы работ [2, 3, 8].

Перейдем к рассмотрению связей коэффициента a_1 со следующими метеорологическими элементами: температурой воздуха и скоростью ветра у земли, скоростью ветра на высоте 500 м, разностью температур между уровнями земли и 500 м. Оценивался также фактор инерционности для a_1 .

Анализ проводился отдельно за утренние и вечерние сроки, причем метеорологические характеристики были взяты за сроки наблюдений 6 и 15 ч. Это позволило исключить влияние суточного хода и использовать данные сетевых наблюдений в городе. Рассматривалась повторяемость положительных значений a_1^+ , которые соответствуют повышенным концентрациям SO_2 в воздухе, в процентах от общего числа всех значений коэффициента a_1 для отдельных градаций метеозлементов.

Анализировалась зависимость между a_1^+ и температурой воздуха. На рис. 1а представлена связь температуры воздуха с a_1^+ для двух городов, расположенных в разных географических районах (ЕТС и Западная Сибирь). Как видно из рисунка, наибольшая повторяемость a_1^+ (75—100 %) для обоих городов отмечена

при температурах от -10 до -20°C . При повышении температуры до 0°C происходит уменьшение повторяемости a_1^+ в сибирском городе до 39 %, а для города, расположенного на ЕТС, положительные значения a_1 отсутствуют, что, видимо, определяется сопутствующей активизацией циклонической деятельности в этот период и повышением температуры воздуха. При экстремально низких температурах, которые не наблюдались на ЕТС в зимний период, для сибирского города происходит также уменьшение повторяемости a_1^+ . Аналогичная связь получена Л. Р. Сонькиным [6] и объясняется усилением эффекта «всплывания» перегретых

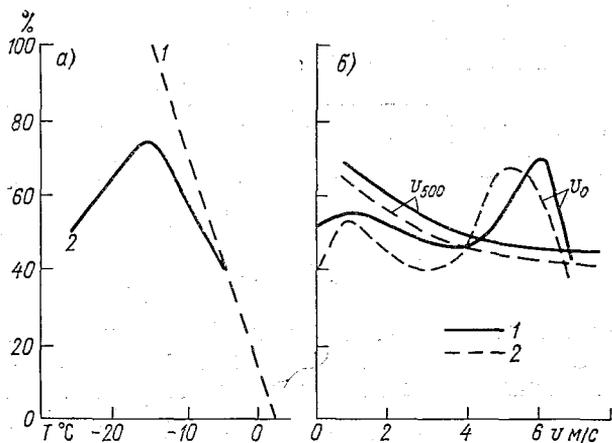


Рис. 1. Зависимость повторяемости случаев с a_1^+ от температуры воздуха T (а) для городов, расположенных на ЕТС (1) и в Западной Сибири (2), а также от скоростей ветра у земли v_0 и на высоте 500 м v_{500} (б) за утренние (1) и вечерние (2) сроки наблюдений.

выбросов при очень низких температурах и соответственно их рассеивание в атмосфере. Данный эффект возникает за счет возрастания начального (эффективного) подъема примесей при увеличении разности температур между сильно охлажденным окружающим воздухом и перегретыми выбросами.

Из рассмотрения рис. 1 б следует, что максимальные повторяемости a_1^+ как утром, так и вечером наблюдаются при v_0 , равном 5—6 м/с. Это объясняется действием выбросов из высоких источников, характерных для данного города, и подтверждается выводами, полученными по другим городам [7].

Получена связь между повторяемостью коэффициента a_1^+ и скоростью ветра на высоте 500 м. На рис. 1 б показано, что при скоростях ветра 0—2 м/с повторяемость a_1^+ выше (примерно 70 %), чем при других грациях скоростей ветра.

Зависимость коэффициента a_1^+ от разности температур (ΔT) в слое 0—500 м приведена в табл. 2. Как видно из этой таблицы, в первую половину дня увеличена повторяемость a_1^+ при неустойчивой стратификации в 500 м слое, что также соответствует выводам теоретических исследований [1], а именно для высоких источников наиболее неблагоприятные условия создаются при неустойчивой стратификации. В утренние часы в период разрушения приземной инверсии за счет турбулентного перемешивания примеси опускаются из верхних слоев в нижние.

Таблица 2

Повторяемость (%) коэффициента a_1^+
в зависимости от распределения ΔT

| Время наблюдений, ч | Стратификация | |
|---------------------|-------------------------------|---------------------------------|
| | устойчивая ($\Delta T < 0$) | неустойчивая ($\Delta T > 0$) |
| 6—12 | 52 | 71 |
| 15—21 | 44 | 40 |

Загрязнение воздуха в городе в текущий день зависит от загрязнения в предшествующий день. Интересно рассмотреть вероятность появления положительных значений коэффициента a_1^+ после различных его значений в предшествующий день (a_1'). Поскольку наблюдения за загрязнением воздуха проводились по скользящему графику, то рассматривались два варианта интервалов: вечер предшествующего дня — утро текущего, и наоборот.

Из анализа полученных данных следует, что для a_1^+ инерционный фактор четко выражен. При положительных значениях a_1' в предшествующий день почти всегда (в 77—80 % случаев) в текущий день отмечались положительные значения a_1^+ . Если в предшествующий день отмечены пониженные концентрации, то только в 13—18 % случаев можно ожидать повышения концентраций примеси.

Выявленные в данной работе зависимости между коэффициентом a_1 и метеорологическими характеристиками подтверждают полученные выводы по другим городам на основе теоретических исследований [1], а также путем анализа фактического материала этих городов. Однако вышеупомянутые связи дают лишь приближенное представление о влиянии метеорологических условий на загрязнение воздуха. В дальнейшем необходимо исследовать связи коэффициентов a_2 и a_3 с метеорологическими параметрами, что позволит дать более полную картину воздействия метеорологических условий на поле концентраций и разработать основы статистических схем прогноза загрязнения воздуха.

В заключение выражаю благодарность Е. Л. Гениховичу, Л. Р. Сонькину и И. Е. Чувашиной за ценные советы и помощь в работе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Берлянд М. Е. Современные проблемы атмосферной диффузии и загрязнения атмосферы.— Л.: Гидрометеиздат, 1975, с. 255—400.
2. Вавилова Н. Г., Генихович Е. Л., Сонькин Л. Р. Статистический анализ данных о загрязнении воздуха с помощью естественных функций.— Труды ГГО, вып. 238, 1969, с. 27—32.
3. Елекоева Л. И., Чувашина И. Е. Анализ поля концентраций сернистого газа методом разложения по естественным ортогональным функциям.— Труды ГГО, вып. 436, 1979, с. 72—78.
4. Методические указания по прогнозу загрязнения воздуха в городах.— Л.: Гидрометеиздат, 1979.—78 с.
5. Мещерская А. В. и др. Естественные составляющие метеорологических полей.— Л.: Гидрометеиздат, 1970.—160 с.
6. Сонькин Л. Р. Некоторые возможности прогноза содержания примесей в городском воздухе.— Труды ГГО, вып. 254, 1971, с. 121—132.
7. Сонькин Л. Р., Храпаченко В. А. Содержание примесей в городском воздухе в зависимости от метеоусловий в летний сезон.— Труды ГГО, вып. 293, 1973, с. 68—73.
8. Hesek F. The physical and statistical analysis one year's observations of SO₂ in Bratislava.— Contributions of the Institute of Meteorology and Climatology of the Slovak Academy of Sciences, N 1, 1974, Bratislava, p. 111—126.

*Н. Ш. Вольберг, Е. Д. Егорова, Т. А. Кузьмина,
А. А. Павленко, З. Г. Тульчинская*

МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ФОТОМЕТРИЧЕСКИХ МЕТОДОВ АНАЛИЗА ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРЫ

Данные измерений концентраций вредных веществ в воздухе служат основанием для планирования весьма дорогостоящих природоохранных мероприятий. Поэтому достоверность получаемой информации имеет большое значение. Вместе с тем большинство лабораторных методов, разработанных в прошлые годы и используемых в настоящее время, не исследованы в достаточной степени с метрологической точки зрения. Многие из них испытывались в ограниченном диапазоне метеопараметров (температур, освещенности, влажности) и недостаточно проверены на мешающее влияние сопутствующих веществ.

Кроме того, при разработке многих методик не полностью использованы имеющиеся возможности снижения систематических погрешностей.

Изложенное выше свидетельствует о необходимости заново пересмотреть используемые методы анализа атмосферы с целью получения более подробной их метрологической характеристики и возможного снижения погрешности, что необходимо также для аттестации методов в органах Госстандарта.

В связи с изложенным в Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова в тесном контакте с Всесоюзным научно-исследовательским институтом метрологии им. Д. И. Менделеева недавно была начата такая работа и в первую очередь применительно к методам измерения наиболее важных загрязнителей атмосферы: двуокиси серы, двуокиси азота, сероводорода, фтористого водорода и аммиака.

В результате ее проведения была выработана схема такого исследования, которая позволила оценить неисключенную систематическую погрешность отдельных этапов анализа, а также случайную и результирующую погрешности методов измерения ряда упомянутых выше загрязнителей.

Целью настоящей работы является обобщение полученных результатов и рекомендации по снижению погрешностей на каждом этапе анализа. Эти рекомендации могут быть полезными при совершенствовании имеющихся методов анализа и разработке новых. На первом этапе исследовались фотометрические методы анализа как наиболее широко применяемые при измерении загрязнения воздуха.

Анализ атмосферы лабораторными фотометрическими методами включает ряд независимых одна от другой операций: приготовление стандартного раствора, приготовление градуировочных растворов, построение с их помощью градуировочного графика, отбор проб, измерение объема анализируемого воздуха, измерение концентрации определяемого вещества в пробе.

Рассмотрим систематические погрешности, вносимые на каждом этапе, и возможные пути их снижения.

1. В большинстве случаев стандартный раствор готовится растворением навески определяемого вещества в известном объеме растворителя. Погрешность приготовления стандартного раствора складывается из следующих величин:

- погрешности взвешивания на аналитических весах;
- погрешности, с которой известна чистота стандартного образца;
- погрешности измерения объема раствора.

Для высокочувствительных методов анализа, обычно применяемых для анализа воздуха, при калибровке фотометров используют весьма разбавленные основные стандартные растворы, содержащие 1—100 мкг/мл определяемого вещества. При их приготовлении в разных методах рекомендуют исходить из навесок различной величины. В одних случаях следует брать большую навеску и полученный раствор разбавлять два или три раза, в других — брать маленькую навеску и растворять ее в большом объеме растворителя, сразу получая необходимый стандартный раствор.

Рассмотрим, в каких случаях какие способы точнее. Для этого необходимо сопоставить погрешности отвешивания небольших количеств вещества и разбавления раствора. Обычно для аналитических весов 2-го класса общая погрешность взвешивания, включающая погрешности кольцевых гирь, отсчета по оптической шкале

и от неравноплечести весов, составляет $\pm 0,4$ мг. Отсюда минимальная навеска, обеспечивающая погрешность не более 0,1 %, составляет 0,4 г.

Погрешность измерения объема при использовании мерной посуды 2-го класса оценивалась согласно ГОСТ 1770-74.

С учетом изложенного выше при навеске не менее 0,4 г, взятой только при использовании кольцевых гирь, и при растворении ее в мерной колбе на 1 л погрешность основного стандартного раствора, рассчитанная в соответствии с ГОСТ 8.207—76 при доверительной вероятности $P = 0,95$, составит $\theta_{ст} = 1,1 \sqrt{\delta_i^2 + \varepsilon_i^2}$ [1], где $\theta_{ст}$ — погрешность приготовления стандартного раствора, δ_i — погрешность взвешивания, ε_i — погрешность разведения.

$$\theta_{ст} = 1,1 \sqrt{0,1^2 + 0,06^2} = 0,13 \%$$

При взятии же меньшей навески и растворении в меньшем объеме раствора погрешность увеличивается. Например, если взять навеску 0,04 г и растворить в колбе на 100 мл, то погрешность приготовления раствора той же концентрации будет $\theta = 1,12 \%$ (при $\delta = 1$, $\varepsilon = 0,2$ по ГОСТ 1770-74), т. е. погрешность возрастает в 8,6 раза.

Таким образом, для приготовления основного стандартного раствора следует брать навеску не менее 0,4 г, используя для взвешивания только миллиграммовые гири, и применять большие колбы для ее растворения. В этом случае погрешность приготовления основного стандартного раствора может быть на уровне примерно 0,1 %.

Следующим этапом является приготовление серии градуировочных растворов. Для этого различные объемы основного стандартного раствора отмериваются при помощи пипеток в мерные колбы и разбавляются до метки.

В значительном числе используемых методик для отмеривания нескольких объемов раствора применяется одна пипетка. При использовании пипеток 2-го класса для отмеривания объема, соответствующего номинальной емкости пипетки, погрешность измерения составляет 1—0,2 %. При использовании пипеток для отмеривания объемов меньших, чем номинальные, погрешность соответственно возрастает. Например, при построении градуировочного графика требуется разбавить 1, 2, 5 и 10 мл основного стандартного раствора до 50 мл. При использовании для отмеривания этих объемов пипеток вместимостью 1, 2, 5 и 10 мл погрешность приготовления растворов составит $\theta_p = 1,12 \%$. При применении для этой цели пипеток вместимостью только 10 мл погрешность приготовления первого раствора возрастает до 11,2 %, поскольку при расчетах учитывается максимальная из величин.

Таким образом, при приготовлении градуировочных растворов следует для каждого из них использовать свою пипетку, заполненную объемом раствора по возможности близким к номинальному. В случаях когда отмериваются объемы раствора, на кото-

рые имеются пипетки с расширением (пипетки Мора), предпочтительнее пользоваться ими как более точными.

При отборе проб основными источниками погрешности обычно являются неполнота улавливания определяемого вещества из воздуха и неточность измерения объема отобранной пробы анализируемого воздуха.

В некоторых работах дается рекомендация использовать поглотительные приборы с эффективностью улавливания не хуже 95 %. Поскольку при этом погрешность данного этапа составляет 5 %, желательно (и в большинстве случаев возможно) снизить эту величину. По-видимому, следует стремиться к эффективности поглощения не менее 97 %. Попутно можно заметить, что полнота поглощения должна быть проверена в условиях, максимально приближенных к реальным условиям использования методики, т. е. во всем диапазоне встречающихся температур, а в некоторых случаях влажности воздуха. Особенно важной является проверка эффективности при отборе проб в органические растворители.

Для проверки эффективности поглощения наиболее удобным способом является измерение количества вещества, проскочившего в поглотительный прибор, подсоединенный за испытуемым. Однако при этом для определения проскока значением не менее 1 % в первом приборе необходимо накапливать количество вещества, превышающее определяемый минимум не менее, чем в 100 раз.

Погрешность измерения объема отобранной пробы воздуха является одной из самых значительных и может быть оценена для используемых в настоящее время электроаспираторов значением примерно ± 20 %. Приборы ЭА-1 и ЭА-2, которые с 1980 г. начинают выпускать серийно, обеспечивают погрешность ± 10 %, а автоматический пробоотборник «Компонент», в котором использованы термостатированные критические сопла, ± 5 %. В связи с тем, что именно отбор проб вносит наибольшую погрешность в анализ, совершенствование соответствующей аппаратуры является весьма актуальным.

При отборе в жидкостной поглотительный прибор часть жидкости испаряется, поэтому перед анализом она должна быть компенсирована. Поскольку поглотительные приборы не могут быть точно откалиброваны, при операции доведения до исходного объема также вносятся большие погрешности. Проверка показала, что ошибки при этом могут составлять 15—20 %. Особенно важно это для определения хлора с метилоранжем, поскольку в этом случае в процессе отбора проб происходит ослабление окраски раствора. Погрешность доведения раствора до исходного объема в 10 % в данном случае приводит к погрешности измерений в сотни процентов. Значительного снижения этой погрешности можно достигнуть, доводя жидкость в поглотительных приборах не до исходного объема, а до исходной массы. Для этой цели удобно использовать квадрантные весы. Достигаемая при этом погрешность может составлять 0,2 % при точности взвешивания 0,01 г.

В ряде случаев наиболее удобным и точным является применение для отбора проб пленочных твердых сорбентов, при использовании которых испарение сорбента практически не имеет значения.

Специально следует остановиться на погрешности от изменения температуры и давления анализируемого воздуха. Температура при отборе пробы может колебаться от 0 до 40 °С. Так как ее изменение на каждый градус дает погрешность 0,33 %, это соответствует погрешности ± 7 %. Что касается давления, то пределы его колебаний могут составлять ± 8 %. При отборе разовых проб колебания температуры и давления малы и обычно точно учитываются. При отборе же среднесуточных проб учитывать изменения температуры значительно труднее.

Если учет давления при среднесуточном отборе проб осуществляется усреднением показаний барографа, который может быть расположен даже в другом месте населенного пункта, например на метеоплощадке, то при расчете температурной поправки дело осложняется тем, что усредняться должна температура не наружного воздуха и даже не помещения, где стоит аппаратура для отбора пробы, а температура воздуха, проходящего через прибор для измерения его расхода (или объема).

Из всех приборов для отбора воздуха, используемых в СССР в настоящее время, лишь автоматический пробоотборник «Компонент» обеспечивает отсутствие температурной погрешности благодаря встроенному термостату.

Вместе с тем для внесения ориентировочной поправки целесообразно записывать с помощью термографа температуру помещения, где установлены поглотительные приборы, и вычислять среднее за время отбора значение, исходя из предположения, что используемый воздух, проходя по коммуникациям, успеваает принять температуру, близкую к температуре помещения.

Хотя изложенное выше не исчерпывает всех погрешностей, вносимых в ходе анализа, учет даже их позволяет существенно (на 10—20 %) снизить результирующую погрешность измерений загрязнения воздуха.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Planning the Sampling of the Atmosphere. N D 1357-57 (Reap. 1967), Annual book of ASTM standards, Am. Society for testing and materials, 1976.— 457 p.

*Н. Ш. Вольберг, М. Ю. Горина,
Т. А. Кузьмина, В. С. Титов*

ДОЗИРОВАНИЕ ФТОРИСТОГО ВОДОРОДА

Для метрологической оценки автоматических приборов и лабораторных методов измерения концентраций фтористого водорода в атмосфере необходимы стандартные образцы (СО), содер-

жащие известные концентрации этого соединения в воздухе. Основной сложностью при их изготовлении является высокая агрессивность HF по отношению к стеклу, а также способность сорбироваться и прочно удерживаться на поверхностях многих материалов. В связи с этим малоперспективны баллонные и другие статические способы приготовления СО HF не могут быть применены. Единственно пригодными в данном случае представляются динамические установки для приготовления СО, включающие источник чистого газа-носителя с измерителем расхода и стабильный источник микропотока фтористого водорода. В качестве таких источников наиболее перспективными являются проницаемые ампулы из фторолона.

Целью настоящего исследования явилось создание устройства, обеспечивающего дозирование паров фтористого водорода на уровне микрограммов в минуту и ниже, и разработка способов оценки производительности такого устройства. В работе [3] имеется указание на возможность использования для дозирования HF ампул из феп-тефлона (FEP-тефлон, США). Представляло интерес исследовать возможность использования для этой цели аналогичного отечественного материала — фторолон 4МБ.

С этой целью изготовленные из указанного материала ампулы с безводным фтористым водородом термостатировались при температуре $25 \pm 0,1^\circ\text{C}$ в полиэтиленовом контейнере, через который непрерывно продували очищенный и высушенный воздух с расходом 5—7 мл/мин.

Производительность ампул определялась путем их многократного взвешивания через определенные интервалы времени и рассчитывалась для каждого из этих интервалов по формуле

$$q = \frac{m - m_0}{\tau - \tau_0}, \quad (1)$$

где m и m_0 — массы ампулы в момент времени τ и τ_0 соответственно. Полученные для одной ампулы результаты приведены в табл. 1. Из данных табл. 1 видно, что в течение трех месяцев

Таблица 1

Результаты оценки производительности дозатора (q) гравиметрическим методом

| Номер взвешивания | Масса ампулы, г | τ сут | q мкг/мин | Номер взвешивания | Масса ампулы, г | τ сут | q мкг/мин |
|-------------------|-----------------|------------|-------------|-------------------|-----------------|------------|-------------|
| 1 | 2,4565 | 0 | | 6 | 2,3391 | 59 | 1,40 |
| 2 | 2,4346 | 1 | 1,38 | 7 | 2,3176 | 70 | 1,36 |
| 3 | 2,4049 | 26 | 1,37 | 8 | 2,2918 | 83 | 1,38 |
| 4 | 2,3829 | 37 | 1,39 | 9 | 2,2679 | 95 | 1,39 |
| 5 | 2,3632 | 47 | 1,37 | Среднее | | | 1,38 |

изменения производительности ампулы не наблюдалось. При этом случайная составляющая погрешности результата измерения производительности ампулы составила $1,2 \cdot 10^{-2}$ мгк/мин, т. е. $\pm 0,9\%$.

Полученные данные позволяют считать ампулы из фторолона 4МБ пригодными для изготовления стабильных источников микропотоков фтористого водорода.

Проведенное метрологическое исследование гравиметрического метода оценки производительности дозатора выявило следующие присущие этому методу систематические погрешности:

— погрешность взвешивания ампулы на аналитических весах θ_m ;

— погрешность регистрации времени непрерывной работы дозатора θ_τ ;

— погрешность поддержания постоянной температуры θ_t ;

— погрешность от изменения температуры при взвешивании $\theta_{t\text{вз}}$.

Суммарная неисключенная погрешность взвешивания на аналитических весах θ_m складывается из следующих величин:

— погрешности кольцевых гирь (по аттестату равна 0,05 мг на каждую гирю),

— погрешности от неравноплечести весов (исключается при взвешивании по методу Борда [1]),

— погрешности отсчета по оптической шкале (для весов типа АДВ-200 равна 0,3 мг на 100 делений).

Значение θ_m , рассчитанное по ГОСТ 8.207—76 для доверительной вероятности $P = 0,95$, оказалось равным 0,4 мг. Погрешность регистрации времени может быть принята равной 5 мин.

Поскольку максимальное значение температурного коэффициента производительности дозатора k_t , определенное для фторолона 4МБ в диапазоне $\theta = 50^\circ\text{C}$, составляет $0,13^\circ\text{C}^{-1}$, а погрешность регулирования температуры $\theta_t \leq 0,1^\circ\text{C}$, то вклад последней в суммарную неисключенную погрешность оценки производительности дозатора составляет $k_t\theta_t = 0,1 \cdot 0,13 \cdot 100 = 1,3\%$.

В связи с тем, что при взвешивании дозатора его температура снижается на короткое время (не более чем на 20 мин) до температуры весов, его производительность во время взвешивания изменяется, что вносит погрешность в результаты измерения, значение которой может быть вычислено по формуле

$$\theta_{t\text{вз}} = \frac{k_t(t - t_{\text{в}})}{\tau - \tau_0} 100 \%,$$

где $t - t_{\text{в}}$ — разность температур термостатирования и взвешивания ($^\circ\text{C}$), $\tau_{\text{вз}}$ — продолжительность взвешивания (мин), $\tau - \tau_0$ — интервал времени между взвешиваниями (мин).

Поскольку почти все составляющие погрешности снижаются по мере увеличения интервала между взвешиваниями, оказалось целесообразным представить суммарную неисключенную систематическую погрешность в виде уравнения, позволяющего оценить

интервал времени между взвешиваниями $\tau - \tau_0$, обеспечивающий получение заданной погрешности. Это уравнение в соответствии с уравнением (1) и ГОСТ 8.207-76 имеет вид

$$\theta_q = 1,1 \sqrt{\left[\frac{2\theta_m}{q(\tau - \tau_0)} \right]^2 + \left[\frac{2\theta_t}{\tau - \tau_0} \right]^2 + [k_t \theta_t]^2 + \left[\frac{k_t(t - t_B) \tau_{вз}}{\tau - \tau_0} \right]^2} 100 \% \quad (2)$$

На основе уравнения (2), при $\theta_\tau = 5$ мин, $\theta_t = 0,1$ °С, $k_t = = 0,13$ (°С)⁻¹, $t - t_B = 20$ °С и $\tau_{вз} = 20$ мин, был определен ряд интервалов между взвешиваниями для двух значений погрешностей и разных производительностей ампул (табл. 2).

Т а б л и ц а 2

Интервал между взвешиваниями дозатора (сутки),
требующийся для получения необходимого значения
погрешности для $P=0,95$ и числа измерений $n=5$

| q мкг/мин | ВЛР-20 | | ВЛР-200 | |
|-----------|----------------|----|---------|----|
| | Погрешность, % | | | |
| | ±3 | ±5 | ±3 | ±5 |
| 10 | 3 | 2 | 6 | 3 |
| 5 | 3 | 2 | 9 | 5 |
| 2 | 5 | 2 | 18 | 10 |
| 1 | 6 | 3 | 35 | 16 |
| 0,5 | 9 | 5 | 50 | 30 |

Как видно из табл. 2, для измерения гравиметрическим методом значений производительности ампулы меньших, чем 0,5 мкг/мин с погрешностью 3—5 % требуется не менее недели. Поэтому был применен более чувствительный метод определения производительности — потенциометрический, использование которого, как и в случае гравиметрического метода, дает возможность достаточно точно определить границы погрешности полученных с его помощью результатов [2]. При этом появляется возможность не только измерять меньшие значения производительности, но и существенно сократить продолжительность этого процесса.

Для измерения производительности ампулы потенциометрическим методом поток диффундирующего через ее стенки фтористого водорода в течение определенного времени поглощался в пробирке, содержащей 5 мл буферного раствора с $pH = 5,8 \pm 0,1$, приготовленного путем смешения 0,3 моль/л раствора уксуснокислого натрия с концентрированной уксусной кислотой. Ионная сила полученного раствора составила около 0,3. Концентрация фторид-

иона в этом растворе измерялась потенциометрически с помощью фторидного (типа ЭЕ-VI) и хлорсеребряного (типа ЭВЛ-1МЗ) электродов. Градуировка электродной системы осуществлялась непосредственно до и после измерений по растворам фторида натрия квалификации ч. д. а. в том же буферном растворе в диапазоне концентрации 10^{-5} — 10^{-3} моль/л. В качестве рF-метра использовался рН-метр типа рН-262.

Поскольку во всех случаях результаты измерений концентрации фторид-иона в градуировочных растворах, выполненных до и после измерений его концентрации в исследуемом растворе, совпадали в пределах погрешности отсчета по шкале прибора (2,5 мВ при цене деления рН-метра 5 мВ), то величину случайной составляющей погрешности результатов этих измерений считали пренебрежимо малой по сравнению с неисключенной систематической составляющей погрешности, определяемой погрешностью взятия навески NaF, погрешностью измерения объемов растворов, погрешностями измерения э. д. с. и времени отбора пробы.

Для приготовления градуировочных растворов навеску NaF (примерно 100 мг) растворяли дистиллированной водой в мерной колбе на 500 мл. Из этого раствора, разбавляя его буферным раствором в колбах на 100 мл с использованием пипеток на 20, 10, 5 и 2 мл, готовили растворы с концентрацией фторид-иона от 10^{-3} до 10^{-4} моль/л, а из раствора с концентрацией 10^{-3} моль/л получали 10^{-4} — 10^{-5} -молярные растворы.

Погрешность приготовления самого разбавленного раствора (она являлась максимальной) определялась как сумма погрешностей: взятия навески на весах АДВ-200 — 0,4 %, измерения объема колбой на 500 мл — 0,06 %, измерения объема пипеткой на 20 мл — 0,3 %, измерения объема колбой на 100 мл — 0,2 %, измерения объема пипеткой на 2 мл — 0,5 % и измерения объема колбой на 100 мл — 0,2 %.

Значение этой погрешности, рассчитанное по ГОСТ 8.207—76 (при $P = 0,95$ и при равномерном распределении), составило 0,84 %.

Поскольку погрешность измерения э. д. с. по паспортным данным рН-метра равна 0,58 мВ, то погрешность определения рF, обусловленная погрешностями измерения э. д. с., в градуировочных и исследуемом растворе с учетом уравнения Нернста равна $\pm 3,8$ %.

Суммарная неисключенная погрешность результата измерения производительности ампулы при погрешности измерения количества фторид-иона в 5 мл раствора, равной $\pm 0,4$ %, и погрешности измерения времени отбора пробы, равной $\pm 0,2$ %, составила ± 4 %. Среднее арифметическое значение производительности ампулы, оцененное по данным 15 измерений, выполненных в течение 10 дней, оказалось равным 1,36 мкг/мин (табл. 3). При этом значение среднего квадратического отклонения результата измерения производительности $q - S_q$ — составило 1,2 %, а доверительные

**Результаты оценки производительности ампулы,
содержащей фтористый водород, потенциометрическим методом**

| | | | | | | | | |
|----------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Измерение | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| q мкг/мин. | 1,30 | 1,30 | 1,39 | 1,42 | 1,46 | 1,31 | 1,30 | 1,42 |
| Измерение | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | |
| q мкг/мин. | 1,36 | 1,32 | 1,29 | 1,29 | 1,40 | 1,42 | 1,43 | |

границы погрешности результата измерения, рассчитанные в соответствии с ГОСТ 8.207-76 по формулам

$$\Delta q = S_{\Delta q} \cdot k, \quad S_{\Delta q} = \sqrt{S_{\theta_q}^2 + S_{\bar{q}}^2},$$

$$S_{\theta_q} = \frac{\theta_q}{\sqrt{3}}, \quad k = \frac{\theta_q + S_{\bar{q}}}{S_{\bar{q}} + S_{\theta_q}},$$

оказались равными:

$$S_{\theta_q} = \frac{4}{\sqrt{3}} = 2,31 \text{ ‰}; \quad S_{\Delta q} = 2,31^2 + 1,2^2 = 2,60 \text{ ‰};$$

$$k = \frac{4 + 1,2}{1,2 + 2,31} = 1,48; \quad \Delta q = 2,60 \cdot 1,48 = 3,85 \approx 4 \text{ ‰}.$$

Таким образом, результаты гравиметрического ($1,38 \pm \pm 0,07$ мкг/мин, $P = 0,95$, $n = 5$) и потенциометрического ($1,36 \pm \pm 0,06$ мкг/мин, $P = 0,95$, $n = 15$) методов оценки производительности ампулы отличаются не более чем на 2 ‰.

Полученные данные свидетельствуют о возможности и целесообразности использования потенциометрического метода для оценки производительности ампул, меньшей 0,5 мкг/мин.

В заключение можно сделать следующие выводы:

1) в качестве средств метрологического обеспечения методик измерения концентрации фтористого водорода в атмосфере могут быть использованы ампулы из фторолон 4МБ, заполненные безводным фтористым водородом;

2) при измерении значений производительности таких ампул от 0,5 мкг/мин и выше целесообразно применять гравиметрический метод, а при меньшей производительности — более чувствительный потенциометрический метод.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Горина М. Ю. Исследование возможности применения ионометрического метода для измерения микроконцентраций химически активных газов в воздухе.—Труды метрологических институтов СССР, 1978, вып. 222 (282), с. 34—38.
2. Измерения массы, объема и плотности/С. И. Гаузнер, С. С. Кивилис, А. П. Осокина, А. И. Павловский.—М.: Изд-во стандартов, 1972.
3. E l f o r s L. A., D e c k e r C. E. Determination of fluoride in air and stack gas samples by use of an ion specific electrode.—Anal. Chem., 1968, vol. 40, N 11, p. 1658—1661.

ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ АТМОСФЕРНЫХ ОСАДКОВ В НЕКОТОРЫХ РАЙОНАХ СССР И ТОЧНОСТЬ ЕГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Атмосферные осадки, являясь одним из важных индикаторов загрязнения атмосферы, одновременно удаляют содержащиеся в ней примеси и участвуют таким образом в круговороте веществ в природе. Их изучению придается большое значение. Одним из существенных разделов программы фоновых станций ВМО являются работы по сбору и определению химического состава осадков. Адекватность интерпретации данных о химическом составе осадков в сильной степени зависит от начальных этапов их исследования, включая методы сбора и анализа, в связи с чем методическим аспектам этих работ следует уделять большое внимание.

В СССР действует сеть по сбору осадков, организация которой относится к периоду МГГ и которая составляет в настоящее время около 70 станций. Из них 5 фоновых станций работают по программе ВМО. Для получения сопоставимых по всей территории Советского Союза данных сбор проб атмосферных осадков и их химический анализ производятся по единой методике, удовлетворяющей требованиям ВМО. Сравнение результатов анализа контрольных проб ВМО, представленных Национальным бюро стандартов Америки, показало достаточно хорошее качество анализов, выполняемых в СССР.

Для оценки качества химического анализа проб атмосферных осадков в СССР принята методика, которая включает: 1) расчет баланса катионов и анионов, 2) сравнение измеренной и рассчитанной удельной электропроводности, 3) выявление соответствия между величинами рН и щелочности.

Остановимся на этих критериях более подробно. Анализ проб атмосферных осадков включает основные ионы, содержащиеся в них. В связи с этим при выражении концентрации ионов в мг-эквивалентной форме суммы катионов и анионов должны быть равны. Несоответствие между балансом катионов и анионов объясняется погрешностями, возникающими при анализе. Относительную ошибку анализа определяют по формуле [1]

$$A = \frac{\sum a - \sum k}{\sum a + \sum k} 100 \%, \quad (1)$$

где $\sum a$ и $\sum k$ — суммы анионов и катионов (мг-экв/л).

Средняя относительная ошибка анализа не должна превышать 5—10%. Следует заметить, однако, что в случае компенсации ошибок, возникающих при определении катионов и анионов, оценка качества анализа по балансу катионов и анионов оказывается недостаточно объективной. Поэтому одновременно с определением

относительной ошибки анализа используется второй способ проверки, заключающийся в сравнении расчетных и измеренных величин удельной электропроводности.

Расчетная удельная электропроводность определяется по формуле [3, 8].

$$\kappa_p = \sum c_n u_n, \quad (2)$$

где c_n — концентрация n -го иона в растворе (мг-экв/л), u_n — ионная электропроводность (подвижность) n -го иона ($\text{см}^2/(\text{Ом} \times \text{Г-экв})$).

В табл. 1 приводятся значения подвижностей ионов, определяемых в пробах атмосферных осадков [2].

Таблица 1

Значения подвижности ионов ($\text{см}^2/\text{Ом} \cdot \text{г-экв}$)
при температуре 25 °С

| Катион | u_+ | Анионы | u_- |
|---------------------|--------|-----------------------|-------|
| H^+ | 349,82 | Cl^- | 76,34 |
| K^+ | 73,52 | NO_2^- | 71,44 |
| Na^+ | 50,11 | HCO_3^- | 44,48 |
| NH_4^+ | 73,40 | $1/2\text{SO}_4^{2-}$ | 80,00 |
| $1/2\text{Ca}^{2+}$ | 59,50 | | |
| $1/2\text{Mg}^{2+}$ | 53,06 | | |

Уравнение (2) справедливо для очень разбавленных растворов, общая минерализация которых не превышает 1,5 мг-экв/л, при условии, что значения рН в этих растворах заключены в интервале от 4 до 9. Расхождение между измеренной удельной электропроводностью κ_m и рассчитанной κ_p определяется по формуле

$$B = \frac{\kappa_m - \kappa_p}{\kappa_m + \kappa_p} 200 \%, \quad (3)$$

и относительная ошибка не должна превышать 5—10 %.

Третий способ проверки заключается в рассмотрении соответствия между величинами рН и щелочности анализируемых проб осадков. Как показывают результаты измерений рН и щелочности в осадках, соотношение между ними довольно близко соответствует экспериментальной кривой 1 (рис. 1), полученной путем измерения концентрации HCO_3^- и величин рН в стандартных растворах NaHCO_3 .

Для большинства природных вод величина рН зависит главным образом от соотношения концентраций угольной кислоты и ее ионов [1]:



В соответствии с законом действия масс имеем

$$[\text{H}^+] = \frac{[\text{H}_2\text{CO}_3]}{[\text{HCO}_3^-]} K_1, \quad (4)$$

где $K_1 = 4,0 \cdot 10^{-7}$ — первая константа диссоциации угольной кислоты, $[\text{H}_2\text{CO}_3] = 1,27 \cdot 10^{-5}$ моль/л — концентрация CO_2 в дистиллированной воде.

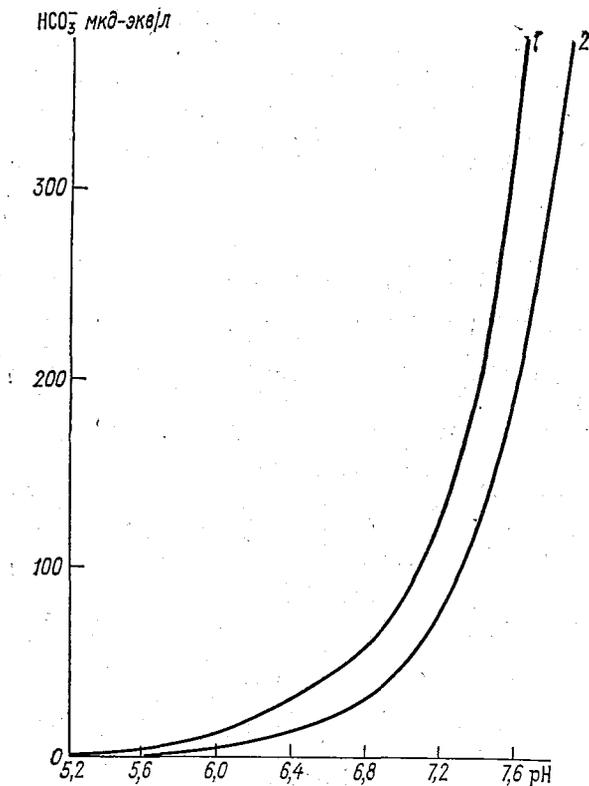


Рис. 1. Связь между рН и щелочностью HCO_3^- .

Решая уравнение (4) при заданных значениях HCO_3^- , характерных для атмосферных осадков, находим связь между рН и щелочностью, выраженную на рис. 1 кривой 2. Сравнение расчетных данных (кривая 2) с реально наблюдаемыми (кривая 1) показывает хорошее согласование характера связи между рН и щелоч-

ностью. Существующее некоторое количественное расхождение кривых 1 и 2, очевидно, обусловлено допущениями о равенстве концентраций CO_2 в осадках и дистиллированной воде, сделанными при решении уравнения (4).

Таким образом, рассмотренные методы проверки анализа позволяют достаточно объективно оценить его достоверность и в целях повышения качества анализов их следует использовать в практической работе. В этой связи следует заметить, что отсутствие разработанных критериев надежности результатов химического анализа осадков приводит к тому, что нередко данные по отдельным странам, публикуемые в сборниках ВМО, вызывают сомнения, которое подтверждается при расчете баланса катионов и анионов, а также значений удельной электропроводности.

Проиллюстрируем сказанное конкретными примерами, которые приводятся в табл. 2. В ней даются две группы данных (А и Б). Для группы А удельная электропроводность, обусловленная ионами водорода $C_{\text{H}^+}U_{\text{H}^+}$, значительно превышает измеренные величины удельной электропроводности $\kappa_{\text{м}}$. Это вызывает сомнение в точности измерения как рН, так и $\kappa_{\text{м}}$. Однако большой избыток

Таблица 2

Результаты расчета удельной электропроводности ($\kappa_{\text{р}}$) и баланса катионов и анионов по данным ВМО [4, 6]

| Дата | рН | C_{H^+} | $C_{\text{H}^+}U_{\text{H}^+}$ | $\kappa_{\text{м}}$ | $\kappa_{\text{р}}$ | А % | $\sum a$ | $\sum k$ | В % |
|----------------------|------|------------------|--------------------------------|---------------------|---------------------|-----|----------|----------|-----|
| | | | | мкСм/см | | | мг-экв/л | | |
| А. Северная Каролина | | | | | | | | | |
| V 1974 г. | 3,72 | 0,191 | 67 | 23 | 73 | 104 | 0,057 | 0,225 | 69 |
| XI | 3,79 | 0,162 | 57 | 22 | 64 | 98 | 0,084 | 0,182 | 37 |
| XII | 3,63 | 0,234 | 82 | 21 | 90 | 124 | 0,085 | 0,278 | 54 |
| Нью-Джерси | | | | | | | | | |
| V 1974 г. | 3,81 | 0,155 | 54 | 39 | 74 | 63 | 0,179 | 0,270 | 21 |
| Миссисипи | | | | | | | | | |
| I 1975 г. | 4,10 | 0,079 | 28 | 10 | 32 | 105 | 0,015 | 0,093 | 72 |
| Венгрия | | | | | | | | | |
| X 1974 г. | 3,82 | 0,151 | 53 | 19 | 68 | 113 | 0,120 | 0,229 | 31 |
| XI | 3,50 | 0,316 | 110 | 24 | 140 | 142 | 0,205 | 0,508 | 42 |
| XII | 3,30 | 0,501 | 175 | 18 | 196 | 166 | 0,134 | 0,645 | 66 |
| Б. Финляндия | | | | | | | | | |
| IV 1975 г. | 3,90 | 0,126 | 44 | 73 | 70 | 4 | 0,247 | 0,229 | 4 |
| IX | 4,20 | 0,063 | 22 | 50 | 46 | 8 | 0,186 | 0,203 | 4 |
| XI | 4,20 | 0,063 | 22 | 54 | 50 | 8 | 0,244 | 0,211 | 7 |
| XII | 4,30 | 0,050 | 18 | 36 | 38 | 5 | 0,166 | 0,173 | 2 |

катионов (Σk), обусловленный концентрацией ионов водорода, подтверждает неправдоподобность столь низких значений рН в данных случаях. В группе Б проверка результатов анализа данных убеждает в достоверности и реальности низких значений рН. Таким образом, оперативная проверка результатов анализа каждой пробы позволяет исключить грубые просчеты или систематические ошибки определения ионов (рН или κ).

Остановимся на рассмотрении некоторых результатов исследования химического состава осадков в СССР. На рис. 2 представ-

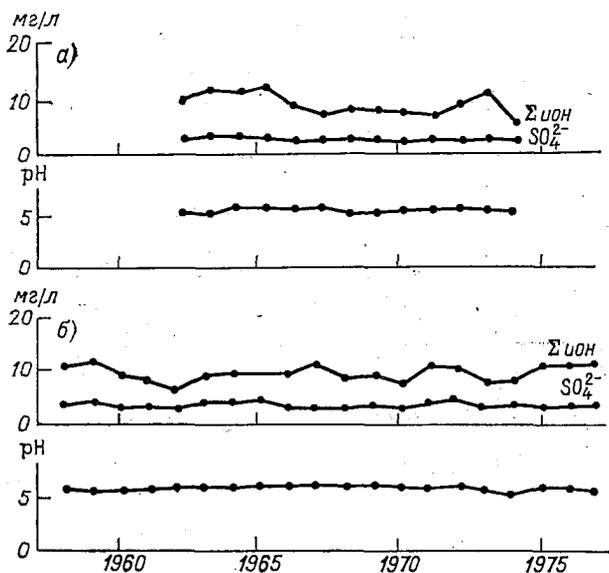


Рис. 2. Годовое изменение характеристик химического состава осадков на фоновых станциях Туруханск (а) и Сыктывкар (б).

лены среднегодовые значения минерализации осадков, концентрации ионов SO_4^{2-} и величины рН для региональных фоновых станций Сыктывкар и Туруханск, удаленных от промышленных источников и расположенных соответственно на севере ЕТС и в Восточной Сибири. Рассмотрение показывает, что атмосферные осадки на этих станциях довольно чистые. Их суммарная среднегодовая минерализация на протяжении 15—20-летнего периода заключена в пределах 6—12 мг/л. Концентрация ионов SO_4^{2-} составляет 2—3 мг/л в Туруханске и 3—5 мг/л в Сыктывкаре. Значения рН сохраняются все время довольно устойчивыми и равны 5—6. Какая-либо тенденция к увеличению минерализации осадков здесь не обнаруживается.

Иная картина наблюдается в западных районах ЕТС. На рис. 3 представлены некоторые характеристики химического состава

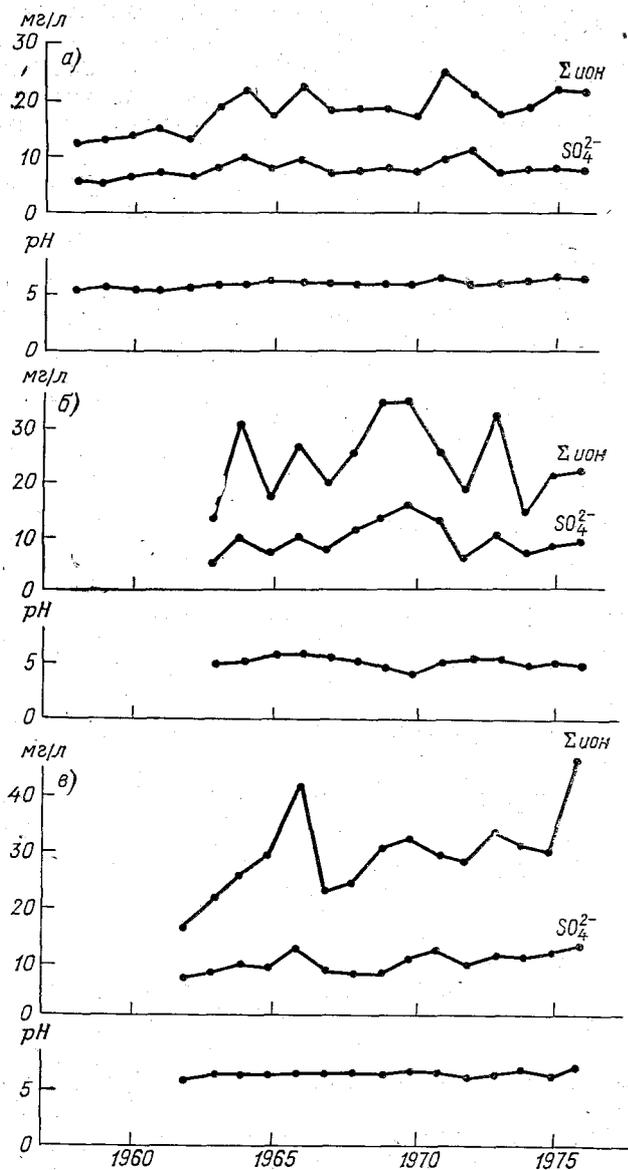


Рис. 3. Годовое изменение характеристик химического состава осадков в западных районах СССР на станциях Кемери (а), Каунас (б), Березино (в).

осадков в Кемери (вблизи Риги), Березино (в Белоруссии) и фоновой станции Каунас. Видно, что в течение последних 10—15 лет суммарная минерализация осадков на этих трех станциях увеличивается. Так, в Кемери с 1958 по 1976 г. она возросла от 10 до 20 мг/л, причем в отдельные годы она превышала 20 мг/л. Четко выраженная тенденция к увеличению концентрации сульфатных ионов не наблюдается, хотя период с 1963 по 1972 г. характеризуется повышенным содержанием сульфатов в осадках, превышающим в 1,5—2 раза концентрацию в 1958 г. Среднегодовая концентрация SO_4^{2-} за этот период изменяется от 5 до 10 мг/л. Величина рН довольно устойчива на протяжении всего времени. Она характеризует осадки в целом как равновесные растворы, и диапазон ее изменений заключен в пределах 5,2—6,3.

В Каунасе атмосферные осадки более минерализованы по сравнению с Кемери. Суммарная минерализация их изменялась за 14-летний период от 15 до 36 мг/л, а концентрация ионов SO_4^{2-} — от 5,5 до 15,7 мг/л. Повышенные концентрации сульфатов и минерализации отмечались в отдельные годы, в частности в период с 1968 по 1971 г. Максимальному значению концентрации SO_4^{2-} в 1970 г. соответствовало минимальное значение рН, равное 4,86, которое соответствует кислым осадкам. В остальные годы значения рН, равные от 5 до 6, характеризовали осадки как нейтральные растворы. Ион SO_4^{2-} доминирует в суммарной минерализации осадков, в связи с чем кривые изменения их среднегодовых значений в рассматриваемый период почти параллельны.

Аналогично станциям Кемери и Каунас на станции Березино также отмечается увеличение суммарной минерализации осадков. За 15-летний период она изменялась от 14 до 47 мг/л. Повышенные значения минерализации и концентрации сульфатов в осадках отмечались не только на ст. Березино, но в отдельные годы и на ст. Каунас. Однако, несмотря на высокую концентрацию сульфатов в осадках, значение рН сохранялось на протяжении всего 15-летнего периода в пределах 5,2—6,7 и закисления осадков не наблюдалось.

Значения суммарной минерализации осадков для всех рассматриваемых станций представлены на рис. 4. Из рассмотрения этого рисунка четко видно влияние промышленного развития в западных районах Европы на химический состав осадков.

Следует отметить, что химический состав осадков в последнее время стал объектом пристального изучения, особенно в Скандинавии [5]. Это объясняется тем, что на протяжении последних двух десятилетий существенно возросло загрязнение атмосферных осадков, выпадающих на территории скандинавских стран, и это уже оказало ощутимое влияние на некоторые экологические системы. Было обнаружено, что концентрация ионов SO_4^{2-} в осадках возросла вдвое, примерно от 2 до 4 мг/л. Соответственно этому значение рН понизилось до 4,0, что характерно для кислых осадков. Область кислых осадков, а также зона закисления воды рек

и озер существенно расширилась и распространилась на север Скандинавского полуострова.

Такое загрязнение осадков в Скандинавии, прогрессирующее на протяжении последних двух десятилетий, объясняется значительно возросшим в этот период потреблением топлива в европейских странах, обусловившим увеличение выбросов в атмосферу диоксида серы и перенос соединений серы на дальние расстояния. В результате в осадках, выпадающих в скандинавских странах (особенно в Норвегии), содержится сравнительно большое количество соединений серы, значительно превышающее их собственное производство [5, 7].

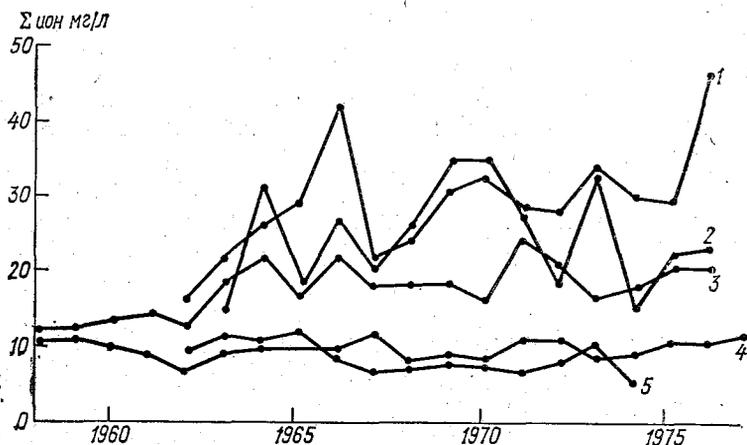


Рис. 4. Годовое изменение минерализации атмосферных осадков на станциях Березино (1), Каунас (2), Кемери (3), Сыктывкар (4), Туруханск (5).

Атмосферные осадки, выпадающие в западных районах ЕТС, более минерализованы по сравнению с осадками в скандинавских странах. Однако наряду с большим содержанием иона SO_4^{2-} в них отмечается высокая концентрация ионов HCO_3^- , NH_4^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , нейтрализующих кислую среду, что и приводит к значению pH, типичному для растворов, близких к равновесным.

Атмосферные осадки, выпадавшие в скандинавских странах до 60-х годов, характеризовались незначительной минерализацией. В течение последних 10—15 лет концентрация ионов SO_4^{2-} в них возросла примерно в 2 раза, при этом существенного изменения содержания ионов Ca^{2+} , Na^+ , K^+ не отмечалось. Возросшая концентрация сульфатных ионов обусловила наблюдаемое закисление атмосферных осадков, что в свою очередь привело к ощутимому закислению почв, воды рек, озер и повлияло на некоторые экологические системы.

Почти синхронное появление высоких концентраций сульфатов в атмосферных осадках, выпадающих в отдельные годы на стаи-

циях Кемери, Каунас; Березино, позволяет заключить о действии единого механизма, вызывающего их. При этом не исключена возможность дальнего переноса соединений серы. Однако поскольку в нашем распоряжении имелись результаты анализа лишь суммарных за месяц проб осадков, то представляется затруднительным установить тип траекторий воздушных масс, связанных с наибольшим загрязнением осадков.

В заключение можно сделать следующие выводы.

1. В целях обеспечения надежности данных по химическому составу осадков важно уделять большое внимание точности химических анализов и проводить оперативную проверку результатов анализа, руководствуясь предложенными критериями.

2. Для увеличения объема информации о химическом составе примесей, содержащихся в атмосфере, по данным о химическом составе осадков и оценки влияния метеорологических условий важно наряду с суммарными проводить отбор проб осадков из отдельных дождей и снегопадов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алевкин О. А. Основы гидрохимии.—Л.: Гидрометеиздат, 1970.—442 с.
2. Киреев В. А. Курс физической химии.—М.: Химия, 1975.
3. Руководство по контролю загрязнения атмосферы.—Л.: Гидрометеиздат, 1979.—448 с.
4. Atmospheric turbidity and precipitation chemistry data for the world, 1974. Publ. WMO, Env. Prot. Agency and NOAA, 1976.—227 p.
5. Brosset C. Airborne particles; black and white episodes.—AMBIO, 1976, vol. 5, N 4, p. 157—163.
6. Global monitoring of the environment for selected atmospheric constituents, 1975. Publ. WMO, Env. Prot. Agency and NOAA, 1977.—263 p.
7. Dovland H., Joranger E., Semb A. Deposition of air pollutants in Norway.—In: Impact of acid precipitation on forest and freshwater ecosystems in Norway, SNSF-project, FR 6/76, 1976, p. 15—35.
8. Selezneva E. S., Lavrinenko R. F. The significance of measurements of pH and electrical conductivity in investigations of chemical composition of precipitation.—Jdöjaras, 1971, N 5—6, p. 288—291.

М. А. Беляшова

ВЕРТИКАЛЬНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ ЧАСТИЦ НАД ЧЕРНЫМ МОРЕМ В ПЕРИОД ФРОНТАЛЬНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

Знание характера распределения аэрозолей в свободной атмосфере над морями и прилегающими к ним районами представляет интерес в связи с рядом практических задач, а также в связи с основным вопросом о происхождении активных ядер конденсации и переносом их в свободной атмосфере.

В данной работе рассматриваются результаты вертикальных зондирований атмосферы над Черным морем в районе Сухуми. В декабре 1971 г. было выполнено 15 зондирований, 2 из которых

на расстоянии 10—15 км от берега, 13 на расстоянии 100—200 км.

1. Методика полетов и средние характеристики вертикального профиля концентрации частиц. Концентрация ядер Айткена измерялась счетчиком Шольца малой модели, специально приспособленным для самолетных исследований, по методике [1, 7].

Зондирования производились по площадкам на стандартных уровнях (250, 500, 750, 1000 и 1500 м и далее) с непрерывным подъемом до высоты 5 км согласно Наставлению [8]. На каждой площадке бралось не менее 10—15 проб воздуха, которые соответствуют при скорости движения самолета 250—350 км/ч расстоянию по горизонтали 20—30 км. При наличии облачности концентрация частиц измерялась под нижней и над верхней кромками облаков, а также в облаках в зависимости от их мощности через каждые 200 м; определялись микрофизические характеристики и водность облаков по методике, изложенной в [8].

Характер погоды в период исследований обуславливался фронтальной деятельностью с выпадением обложных и ливневых осадков.

Два зондирования, произведенные в мощной фронтальной облачности типа Ns—As, верхней кромки облаков не достигли. Это были облака с безоблачными коридорами и прослойками. В остальных случаях преобладали облака холодного фронта или фронтов окклюзии (Cu и Cb). Фронты перемещались на восток и северо-восток, т. е. в направлении к горной цепи Кавказа, где и задерживались, превращаясь в орографические.

Кучевые облака над морем были маломощными; из них выпадали ливневые осадки в виде зарядов. Очень часто и на теплом фронте появлялись Cu и Cb, пробивающие Ns. В период исследований в основном преобладал «хаотический» вид неба. Грозовая деятельность более отчетливо проявлялась над морем.

Среднее распределение концентрации частиц над Черным морем в период фронтальной деятельности (рис. 1 а, кривая 1) характеризуется быстрым убыванием их с высотой в подоблачном слое атмосферы. В облаках происходит более замедленное изменение концентраций, а на высотах более 4 км они практически остаются постоянными.

Применительно к экспериментальным данным расчеты выполнены по формуле Е. С. Селезневой [10]

$$N = N_0 \frac{C^2}{(H + C)^2}, \quad (1)$$

где N — концентрация ядер Айткена (см^{-3}) на том или ином уровне, N_0 — концентрация частиц на высоте 250 м над поверхностью воды, H — высота, C — постоянная интегрирования, которая определяется из экспериментальных данных, и по формуле Б. Г. Андреева [2]

$$N = \frac{B}{A} \left[\frac{1}{\text{sh}^2 \frac{\sqrt{B}}{2} (C + z)} \right]. \quad (2)$$

Здесь

$$B = \frac{\beta}{k}, \quad A = \frac{2}{3} \frac{\alpha}{k}, \quad C = \frac{2}{\sqrt{B}} \operatorname{arctg} \sqrt{\frac{AN_0 + B}{B}},$$

где α — коэффициент коагуляции, β — коэффициент вымывания аэрозолей атмосферными осадками, k — коэффициент турбулентности.

Расчеты, выполненные по формуле (2), хорошо согласуются с экспериментальными данными только в подоблачном слое атмо-

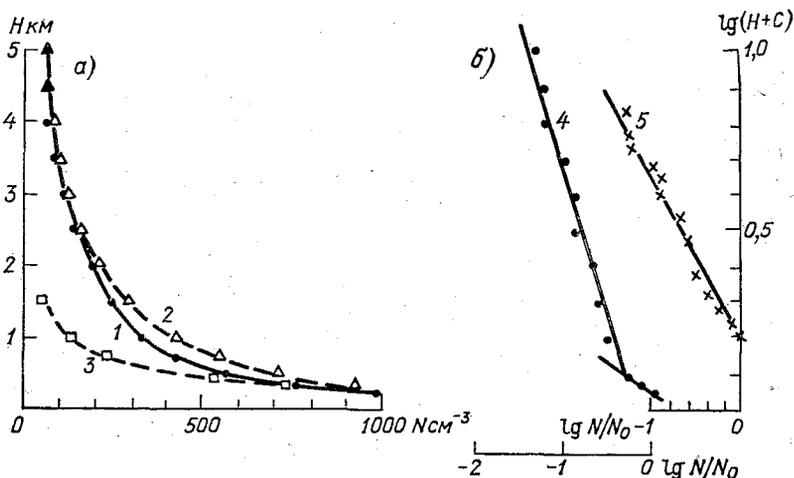


Рис. 1. Среднее распределение ядер Айткена с высотой в период выпадения осадков над Черным морем в абсолютных (а) и относительных (б) единицах.

1 — экспериментальные данные; 2 — расчетные данные по формуле Е. С. Селезневой (1), 3 — расчетные данные по формуле Б. Г. Андреева (2), 4 — $\lg N/N_0 = f(H)$, 5 — $\lg N/N_0 = f \lg(H+C)$.

сферы, т. е. в слое вымывания аэрозолей атмосферными осадками. Значения параметров для расчетов по (2) определены из экспериментальных данных с учетом продолжительности осадков в период исследований ($\beta = 2,3 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$; $k = 2,4 \cdot 10^4 \text{ см}^2/\text{с}$; $\alpha = 5 \times 10^{-8} \text{ см}^3/\text{с}$). На уровнях, соответствующих облачному системам, расчетная кривая 3 сильно отклонена влево от экспериментальной кривой 1. Очевидно, для расчета в облачных слоях необходимо учитывать ряд процессов, не учтенных в (2). Вообще формула Б. Г. Андреева применима только к профилям наиболее быстрого убывания аэрозолей с высотой.

Кривая 2, рассчитанная по (1), хорошо согласуется с экспериментальными данными на всех высотах, за исключением отдельных данных для приводного слоя, которые отклонены от экспериментальных на 15—30 %.

Ход кривой $\lg N/N_0$ показывает, что простая логарифмическая зависимость не оправдывается. В данном случае можно выделить

два слоя — подоблачный и облачный. Линейная зависимость $\ln N/N_0 [\lg (H+C)]$ указывает на то, что расчеты по диффузионно-коагуляционной формуле (1) удовлетворительно согласуются со

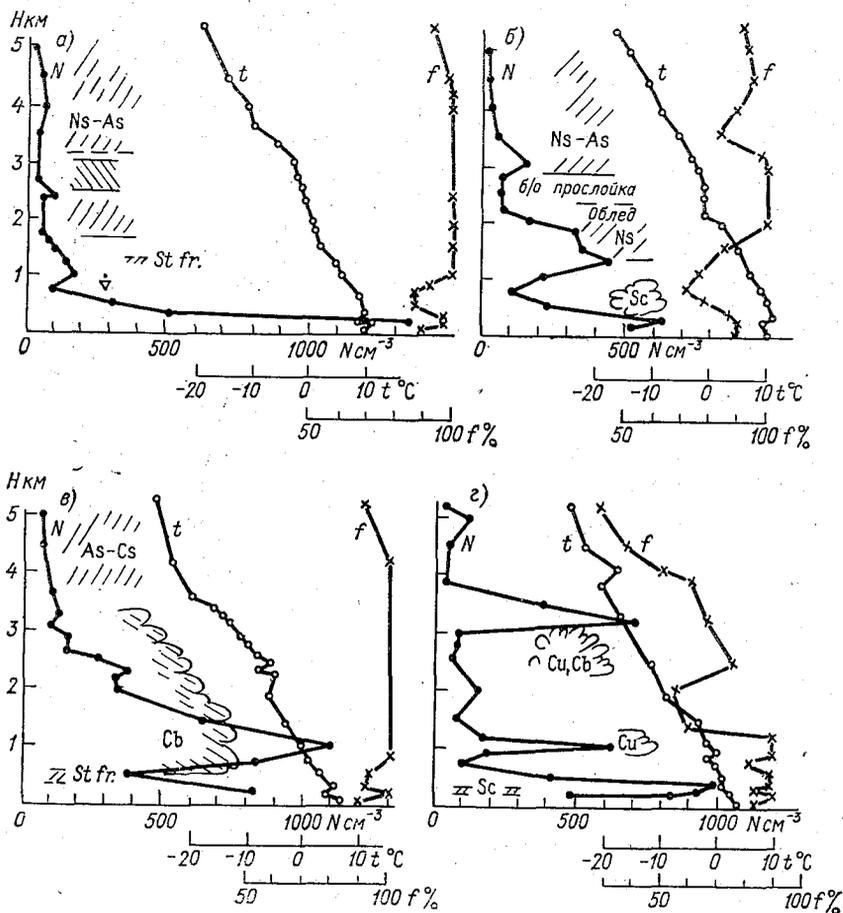


Рис. 2. Вертикальные профили распределения ядер Айткена (N), температуры (t) и влажности (f) воздуха над Черным морем. 1971 г.

а) 11 XII в 10 ч 40 мин—13 ч 15 мин ВЗА выполнено в 10—15 км от берега, волнение моря 3 балла, 10/10 Ns; б) 11 XII в 16 ч 25 мин—17 ч 45 мин ВЗА выполнено в 50 км от берега, волнение моря 4 балла, 10/10 Ns; в) 13 XII в 11 ч 12 мин—14 ч 50 мин ВЗА выполнено в 50 км от берега, волнение моря 3 балла, Cb; г) 19 XII в 9 ч 37 мин—12 ч 35 мин ВЗА выполнено в 15—100 км от берега, волнение моря 3—4 балла, Cu, Sc, Cb с грозой.

средним распределением ядер Айткена над морем и в период фронтальной деятельности.

2. Распределение аэрозолей в облаках. Данные единичных полетов указывают на слоистость аэрозолей в облачных системах. На рис. 2 а, б представлены профили распределения концентрации

частиц в облаках стационарного теплого фронта. Длительные обложные осадки, временами переходящие в ливни, способствовали вымыванию аэрозолей во всем облачном слое. Так, например, 11 XII 1971 г. (рис. 2 а) концентрация частиц в N_s — A_s , начиная от нижнего основания облаков и до потолка подъема самолета, были меньше 100 см^{-3} . Над открытой водной поверхностью на высоте 250 м сохранились достаточно высокие значения концентрации частиц ($N = 1,4 \cdot 10^3 \text{ см}^{-3}$). Во второй половине дня при юго-западном переносе воздушных масс произошло усиление теплового фронта за счет неустойчивости, возникшей в приводном слое атмосферы (волнение моря усилилось до 4 баллов). На фоне N_s — A_s образовались C_u и C_b . По всему побережью и над морем отмечались дожди, ливни и местами грозы. Распределение аэрозолей с высотой в послеполуденное время представлено на рис. 2 б, на котором отмечаются три инверсии в распределении концентрации частиц. Первая инверсия располагается под нижней кромкой S_c в подынверсионном температурном слое.

Местами сквозь S_c пробивались C_u , верхний уровень их коегде достигал высоты примерно 1000 м. Очевидно, первый слой аэрозолей имеет морское происхождение. Существование второго и третьего максимумов, возможно, и связано с происхождением воздушных масс, но несомненным является тот факт, что все три аэрозольных слоя расположены под нижними кромками облаков. В прослойках наблюдалось очень мало ядер ($N < 100 \text{ см}^{-3}$). С нашей точки зрения, увеличение аэрозолей под нижней кромкой дождящих облаков типа N_s обязано высвободившимся ядрам конденсации за счет разрушения облака, так как последнее происходило снизу вверх.

Для фронтальных облаков кучевых форм также характерна слоистость аэрозолей. Однако зоны их повышенного содержания встречаются на разных уровнях. Так, в C_b максимальное количество ядер отмечено примерно на высоте 200 м от нижнего основания облаков; второй слабовыраженный слой соответствовал уровню $2/3$ облачного слоя (рис. 2 в).

Во внутримассовых облаках кучевых форм, находящихся в стадии развития, зоны повышенного содержания ядер находились на уровне $1/3$ от нижнего основания C_u med. и при подходе к вершине C_b (рис. 2 г).

Для выяснения типичных особенностей в распределении концентрации частиц с высотой в облаках различных форм был использован безразмерный аргумент

$$h = \frac{H - H_{\text{нг}}}{\Delta H}, \quad (3)$$

где H — высота взятия проб воздуха на том или ином уровне, $H_{\text{нг}}$ — высота нижней границы облаков, ΔH — мощность облачного слоя.

На рис. 3 представлено относительное изменение концентрации частиц с высотой в облаках различных форм, а в табл. 1 — харак-

теристики этих облаков. На рис. 3 цифры, стоящие у точек излома кривых, обозначают количество площадок, выполненных на том или ином уровне в облаках. Как видно из рисунка, вертикальное распределение аэрозолей в облачных системах связано с их формой. Характерной чертой для профилей N в облаках теплового фронта (N_s , A_s) является наличие максимума аэрозолей под нижней кромкой облаков и в зоне обледенения. В центральной части N_s и в нижней половине A_s концентрации частиц почти не изменялись с высотой.

В облаках кучевых форм максимальное количество ядер обнаружено на высоте $1/3$ части чижнего основания облака и в пред-

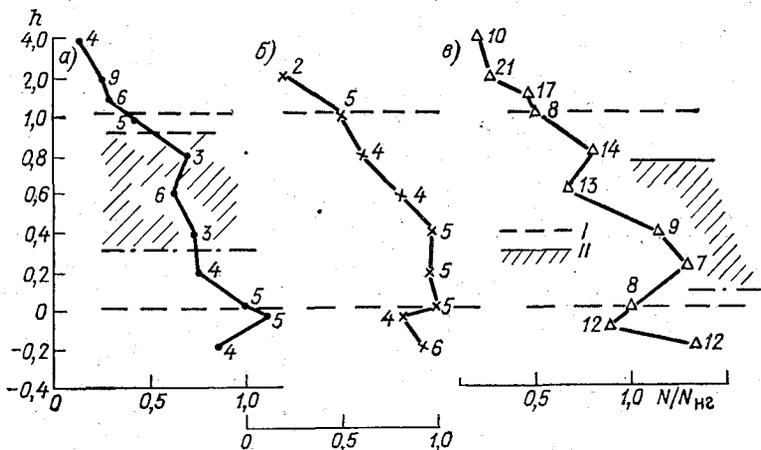


Рис. 3. Относительное изменение концентрации частиц в облаках N_s (а), A_s (б) и C_i и C_b с осадками (в) над Черным морем (ноябрь—декабрь 1971 г.).

1 — граница облачного слоя, 2 — зона обледенения.

вершинной части облака, что, возможно, и связано с конвективными движениями в кучевых облаках. Результаты исследований восходящих потоков в облачной атмосфере и в облаках, проведенных в Высокотгорном геофизическом институте [11, 12], показали, что скорость восходящего потока на северных склонах Кавказа в мощных кучевых и кучево-дождевых облаках (до начала выпадения осадков) начиная примерно от основания облака растет с высотой. В средней (или предвершинной) части облака она достигает максимума, после чего начинает убывать. В C_b наряду с восходящими потоками наблюдались и нисходящие. При этом в пяти случаях из семи максимальная скорость нисходящего потока сравнима с максимальной скоростью восходящего потока. Выпадение осадков из облаков сопровождается нисходящими потоками.

Слоистость распределения крупных частиц по данным единичных измерений неоднократно отмечалась в работах Л. С. Ивлева и др., К. Я. Кондратьева и др. [4, 9]. Так, в [9] приводятся два

вертикальных профиля тропосферного аэрозоля над Черным морем в летнее время. В обоих случаях наблюдалось по два аэрозольных слоя, высоты которых были несколько сдвинуты по отношению друг к другу. Однако данные об изменении метеоэлементов с высотой и какой-либо связи с синоптическими процессами отсутствуют.

Мощность зимних облаков над Черным морем невелика (табл. 1). Фронтальные облака за исследуемый период не были сплошными, а состояли из ряда прослоек и безоблачных коридоров. Наименьшие значения концентрации частиц Айткена были обнаружены в As ($\bar{N} = 170 \text{ см}^{-3}$) на высоте более 3,5 км; наибольшие — в Cu и Cb ($\bar{N} = 360 \text{ см}^{-3}$). Число свободных ядер, не участвующих в процессе облакообразования, в Ns соизмеримо с числом капель в этих облаках. В облаках вертикального развития

Таблица 1

Характеристики облаков

| Форма облаков | Число зондирований | Высота, м | | | | Число ядер, $N_{\text{я}}$ | Концентрация ядер Айткена, см^{-3} | | | |
|---------------|--------------------|-----------------|-----------------|------------|---------------------|----------------------------|---|------------|------------------|------------------|
| | | $H_{\text{нг}}$ | $H_{\text{вг}}$ | ΔH | $\sigma_{\Delta H}$ | | $\bar{N}_{\text{я}}$ | σ_N | N_{max} | N_{min} |
| As | 6 | 3630 | 4800 | 1200 | 360 | 192 | 170 | 15 | 600 | 20 |
| Ns | 5 | 1150 | 2320 | 1170 | 130 | 156 | 240 | 30 | 830 | 20 |
| Cu, Cb | 11 | 690 | 2140 | 1450 | 280 | 354 | 360 | 60 | 1105 | 30 |

| Форма облаков | Число зондирований | Число ядер, $N_{\text{к}}$ | Концентрация облачных капель, см^{-3} | | | Размеры капель, мкм | | | Водность облаков, $\text{г}/\text{м}^3$ | | |
|---------------|--------------------|----------------------------|--|------------------|------------------|----------------------|------------------|------------------|---|------------------|------------------|
| | | | $\bar{N}_{\text{к}}$ | N_{max} | N_{min} | $\bar{r}_{\text{ш}}$ | r_{max} | r_{min} | \bar{W} | W_{max} | W_{min} |
| As | 6 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| Ns | 5 | 44 | 200 | 884 | 5 | 20 | 110 | 2 | 0,42 | 1,55 | 0,04 |
| Cu, Cb | 11 | 113 | 190 | 1204 | 2 | 27 | 140 | 2 | 0,55 | 4,30 | 0,01 |

Примечание. В таблице обозначено \bar{r}_m — средний радиус капель, дающий наибольший вклад в водность облака.

свободных ядер было примерно в 2 раза больше, чем облачных капель, а количество последних в Ns было немного больше, чем в Cu и Cb, но зато в облаках кучевых форм они были наиболее крупные ($r_m = 27$ мкм), а в Ns более мелкие ($r_m = 19$ мкм). Естественно, наибольший запас воды в облаках, как и следовало ожидать, наблюдался в Cu и Cb. Полученные нами данные о микрофизических характеристиках облачных систем над акваторией Черного моря не противоречат сведениям о таких характеристиках

в континентальных облаках, систематизированным в монографиях и учебниках ряда авторов [5, 6, 13, 14 и др.].

Если предположить, что каждая капля несет одно ядро, то в первом приближении можно оценить отношение растворимой фракции аэрозолей к их нерастворимой части. Исходя из этого и учитывая данные табл. 1, во фронтальных облаках типа Ns над Черным морем была определена нерастворимая часть аэрозолей, которая составляла примерно 50 % их общего количества и 65—70 % в облаках Cu и Cb.

В работе [3] произведена оценка активных ядер конденсации в нижней тропосфере различных районов ЕТС по данным о химическом составе аэрозолей, облачной воды и осадков. Согласно этой оценке в южных районах ЕТС на высоте 500 м над сушей только $1/3$ часть из общего количества частиц Айткена растворима в воде. Оценка доли активных ядер конденсации в облаках над Черным морем близка к сделанной ранее.

Таким образом, даже над морями не все ядра Айткена имеют морское происхождение и служат центрами конденсации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Александров Н. Н., Петренчук О. П. Метод измерения ядер конденсации в свободной атмосфере.— Труды ГГО, 1959, вып. 93, с. 81—87.
2. Андреев Б. Г. Закономерности вертикального распределения мельчайших частиц аэрозоля в пограничном слое атмосферы.— Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана, 1967, т. III, № 9, с. 979—988.
3. Беляшова М. А., Петренчук О. П., Селезнева Е. С. Исследование физико-химических и электрических свойств атмосферных аэрозолей.— Труды VIII Всесоюзной конференции по физике облаков и активным воздействиям.— Л.: Гидрометеоздат, 1970, с. 84—92.
4. Зуев В. Е., Ивлев Л. С., Кондратьев К. Я. Новые результаты исследований атмосферного аэрозоля.— Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана, 1973, т. IX, № 4, с. 371—383.
5. Левин Л. М. Исследования по физике грубодисперсных аэрозолей.— М.: Изд-во АН СССР, 1961.—267 с.
6. Матвеев Л. Т. Основы общей метеорологии. Физика атмосферы и океана.— Л.: Гидрометеоздат, 1965.— 876 с.
7. Методические указания гидрометеорологическим станциям и пунктам самолетного зондирования атмосферы, № 28. Производство наблюдений за ядрами конденсации/Под ред. Е. С. Селезневой.— Л.: Гидрометеоздат, 1960.—20 с.
8. Наставление гидрометеорологическим станциям и постам.— Л.: Гидрометеоздат, 1958, вып. 4, ч. IV.—150 с.
9. Результаты самолетных исследований аэрозоля по программе КЭНЭКС в 1970—1971 гг./К. Я. Кондратьев, В. С. Гришечкин, В. И. Дмаховский и др.— Труды ГГО, вып. 317, с. 57—67.
10. Селезнева Е. С. Атмосферные аэрозоли.— Л.: Гидрометеоздат, 1966.— 173 с.
11. Сулаквелидзе Г. К., Бабилашвили Н. Ш., Лапчева В. Ф. Образование осадков и воздействие на градовые процессы.— Л.: Гидрометеоздат, 1965.—263 с.
12. Сулаквелидзе Г. К. Ливневые осадки и град.— Л.: Гидрометеоздат, 1967.—409 с.
13. Физика облаков/А. М. Боровиков, И. И. Гайворонский, Е. Г. Зак и др.— Л.: Гидрометеоздат, 1961.—459 с.
14. Шишкин Н. С. Облака, осадки и грозовое электричество.— Л.: Гидрометеоздат, 1964.—401 с.

СОДЕРЖАНИЕ

| | |
|---|-----|
| М. Е. Берлянд, Е. Л. Генихович, И. Г. Грачева. Основы расчета загрязнения воздуха в условиях пересеченной местности с учетом термической неоднородности | 3 |
| М. Е. Берлянд, Я. С. Канчан, Р. И. Оникул, С. С. Чичерин. К теоретической оценке годового и суточного хода загрязнения атмосферы при различных климатических условиях | 17 |
| Е. Л. Генихович. К вопросу о применимости гауссовской модели для расчета загрязнения воздуха | 35 |
| В. Б. Киселев. О выявлении источника, создающего повышенное загрязнение | 42 |
| Л. В. Травкина, С. С. Чичерин. О суточном и годовом ходе совместных повторяемостей скорости ветра и коэффициента обмена в приземном слое воздуха | 46 |
| В. Д. Степаненко, Б. И. Вдовин. О советско-американском эксперименте по исследованию условий образования и трансформации естественного аэрозоля — АФАЭКС-79 | 52 |
| Л. Г. Хуршудян, И. В. Некрасов. Совместный советско-американский эксперимент в аэродинамической трубе по моделированию воздушного потока и рассеяния примесей в холмистой местности | 57 |
| Н. С. Буренин, Б. Б. Горошко, Г. А. Панфилова. Основные результаты исследований распространения примесей в районе тепловой электростанции с высотой труб 320 м и сопоставление их с расчетами | 61 |
| Б. Б. Горошко, С. М. Немец, А. М. Царев. Некоторые особенности распределения тяжелых металлов в воздухе в районе отдельных промышленных предприятий | 68 |
| Н. С. Буренин, Б. И. Вдовин. Вертикальное распределение окиси углерода по экспериментальным данным | 72 |
| Б. И. Вдовин. Экспериментальные исследования вертикальной структуры городского острова тепла в Ленинграде | 76 |
| Г. П. Расторгуева. Особенности распределения температуры воздуха на промплощадках | 81 |
| Э. Ю. Безуглая, Е. К. Завадская, М. Н. Зашихин, И. А. Зильберштейн. Статистический метод расчета среднего поля концентраций примеси в городском воздухе | 85 |
| Л. Р. Соськин, Т. П. Ивлева. Вопросы прогнозирования загрязнения воздуха в городе отдельными примесями | 89 |
| В. А. Храпаченко. Прогнозирование загрязнения городского воздуха в летний сезон | 97 |
| Л. И. Елекоева. Использование метода разложения полей по естественным ортогональным функциям для анализа и прогноза загрязнения атмосферы | 101 |
| Н. Ш. Вольберг, Е. Д. Егорова, Т. А. Кузьмина, А. А. Павленко, З. Г. Тульчинская. Метрологические характеристики фотометрических методов анализа загрязнения атмосферы | 107 |
| Н. Ш. Вольберг, М. Ю. Горина, Т. А. Кузьмина, В. С. Титов. Дозирование фтористого водорода | 111 |
| О. П. Петренчук, Р. Ф. Лавриненко. Химический состав атмосферных осадков в некоторых районах СССР и точность его определения | 117 |
| М. А. Беляшова. Вертикальное распределение концентрации частиц над Черным морем в период фронтальной деятельности | 125 |

CONTENTS

| | |
|---|-----|
| M. E. Berlyand, E. L. Genikhovich, I. G. Gracheva. The principles of air pollution modeling under conditions of crossed terrain with regard for thermal inhomogeneity | 3 |
| M. E. Berlyand, Ya. S. Canchan, R. I. Onicul, S. S. Chicherin. Theoretical estimate of annual and daily variation of air pollution for different climatic conditions | 17 |
| E. L. Genikhovich. On the applicability of the Gaussian model for the calculation of air pollution | 35 |
| V. B. Kiselev. On determination of high air pollution source | 42 |
| L. V. Travkina, S. S. Chicherin. On daily and annual course of joint occurrence of wind velocity and exchange coefficient in the boundary air layer | 46 |
| V. D. Stepanenko, B. I. Vdovin. The Soviet-American experiment on the study of formation and transformation of a natural aerosol: the Abastuman Background Aerosol Experiment-79 (ABEX-79) | 52 |
| L. H. Khurshudyan, I. V. Necrasov. The Soviet-American wind tunnel experiment to study air flow and pollutant dispersion over hilly terrain | 57 |
| N. S. Burenin, B. B. Goroshko, G. A. Panfilova. The main results of the investigation of pollutant dispersion in the vicinity of thermal power stations with the stack height of 320 m and comparison with calculation data | 61 |
| B. B. Goroshko, S. M. Nemez, A. M. Zaryev. Some specific features of heavy metals dispersion in the vicinity of separate industrial enterprises | 68 |
| N. S. Burenin, B. I. Vdovin. Vertical distribution of carbon oxide from experimental data | 72 |
| B. I. Vdovin. Experimental studies of the vertical structure of an urban heat island in Leningrad | 76 |
| G. P. Rastorguyeva. The peculiarities of air temperature distribution on the area | 81 |
| E. Yu. Bezuglaya, E. K. Zavadskaya, M. N. Zashikhin, I. A. Silberstein. The statistic method of calculating an average field of concentration in urban air | 85 |
| L. R. Sonkin, T. P. Ivleva. Forecasting urban air pollution by various pollutants | 89 |
| V. A. Khrapachenko. Forecasting urban air pollution in summer | 97 |
| L. I. Elekoyeva. The application of the method of the decomposition of field by natural orthogonal functions for the analysis and forecast of air pollution | 101 |
| N. Sh. Volberg, E. D. Egorova, T. A. Kuzmina, A. A. Pavlenko, Z. G. Tulchinskaya. Metrological characteristics of photometric methods of air pollution analysis | 107 |
| N. Sh. Volberg, M. I. Gorina, T. A. Kuzmina, V. S. Titov. Hydrogen fluoride dosage | 111 |
| O. P. Petrenchuk, P. F. Lavrinenko. The chemical composition of precipitation in some areas of the USSR and the precision of its determination | 117 |
| M. A. Belyashova. Vertical distribution of the concentration of particles over Black Sea in the period of frontal activity | 125 |

Труды ГГО, вып. 450

АТМОСФЕРНАЯ ДИФФУЗИЯ И ЗАГРЯЗНЕНИЕ ВОЗДУХА

Редактор Л. И. Штанникова. Технический редактор М. И. Брайнина. Корректор А. В. Хюркес

Сдано в набор 12.02.82. Подписано в печать 27.08.82. М-33089. Формат 60×90^{1/16}. Бум. тип. № 1.
Литературная гарнитура. Печать высокая. Печ. л. 9. Кр.-отт. 9,25. Уч.-изд. л. 10,10.
Тираж 930 экз. Индекс МЛ-19. Заказ № 177. Цена 70 коп. Заказное.

Гидрометеоздат. 199053. Ленинград, 2-я линия, д. 23.

Ленинградская типография № 8 ордена Трудового Красного Знамени Ленинградского объединения «Техническая книга» им. Евгении Соколовой Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли.
190000, г. Ленинград, Прачечный переулок, 6

УДК 551.510.64

Основы расчета загрязнения воздуха в условиях пересеченной местности с учетом термической неоднородности. Берлянд М. Е., Генихович Е. Л., Грачева И. Г. Труды ГГО, 1982, вып. 450, с. 3—17.

Излагается постановка задачи о трансформации воздушного потока над термически неоднородным препятствием. Приведены примеры расчета характеристик потока над двумерным изолированным холмом, а также распределение максимальных наземных концентраций в зависимости от положения источника относительно этого препятствия. Предложен способ учета трехмерного рельефа в задачах диффузии.

Библ. 19. Илл. 4.

УДК 551.510.04

К теоретической оценке годового и суточного хода загрязнения атмосферы при различных климатических условиях. Берлянд М. Е., Канчан Я. С., Оникул Р. И., Чичерин С. С. Труды ГГО, 1982, вып. 450, с. 17—35.

Развиваются методы определения осредненных за длительные периоды времени концентраций по данным градиентных наблюдений и исследований их сезонной, суточной и пространственной изменчивости на основе результатов расчетов среднегодовых и средних за теплый и холодный периоды концентраций, в том числе, отдельно по данным за каждый срок наблюдений. Расчеты проводятся для модельных источников: одиночного типа ТЭС и мелкой котельной, а также для города. Производится оценка пространственно-временной изменчивости осредненных концентраций, обусловленной пространственно-временной изменчивостью характеристик ветрового и турбулентного режима приземного слоя атмосферы. Начато изучение межгодовой изменчивости осредненных концентраций. Обсуждаются вопросы определения осредненных концентраций в периоды, когда градиентные наблюдения не проводятся из-за осадков, туманов и сильных ветров, а также введение поправок на приподнятые инверсии.

Табл. 2. Илл. 5. Библ. 23.