

А. Е. ФЕДОРИЩЕВ

**МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА  
НА РАЗЛИЧНЫХ ВЫСОТАХ  
В ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ АТМОСФЕРЫ**

Как показывалось ранее [2], разность между температурой на любой высоте 500-метрового пограничного слоя и температурой, измеренной на высоте 2 м у подстилающей поверхности, может быть представлена полиномом

$$\Delta t_0 = (f_1 + k_1 \tau) h + (f_2 + k_2 \tau) h^2 + (f_3 + k_3 \tau) h^3 + \\ + (f_4 + k_4 \tau) h^4 + (f_5 + k_5 \tau) h^5, \quad (1)$$

где  $\tau$  — вертикальная разность температур, измеренных на высоте 2 и 25 м;  $f_i$ ,  $k_i$  — некоторые коэффициенты при ( $i=1, 2, 3, 4, 5$ ). Тогда

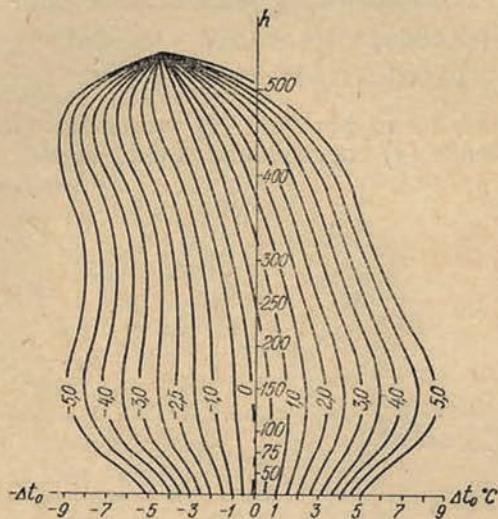


Рис. 1. Номограмма для определения  $\Delta t_0$  по вертикальным разностям  $\tau$  и высоте  $h$ .

температура  $t$  на любой высоте  $h$  пограничного полукилометрового слоя может быть получена по формуле

$$t = t_0 + \Delta t_0, \quad (2)$$

где  $t_0$  — температура, измеренная у подстилающей поверхности на высоте 2 м.

Нахождение поправки  $\Delta t_0$  по формуле (1) требует больших вычислений, поэтому для удобства получения  $\Delta t_0$  создана номограмма (рис. 1). На оси абсцисс откладывались разности температур  $\Delta t_0$ , рассчитанные по формуле (1), на оси ординат — высоты  $h$ . В этой системе координат наносились точки и строились кривые  $\Delta t_0$ , соответствующие значениям  $\tau$  от  $+5^\circ\text{C}$  до  $-5^\circ\text{C}$  через  $0,5^\circ\text{C}$ .

Для определения  $\Delta t_0$  по номограмме необходимо по измеренному значению  $\tau$  найти соответствующую ему кривую, подняться или опуститься по этой кривой до нужной высоты  $h$  и по оси абсцисс снять величину  $\Delta t_0$ .

Анализ номограммы показывает, что все ее кривые взаимно пересекаются на высоте около 540 м, при этом величина  $\tau$  практически не влияет на значение  $\Delta t_0 \approx -4,5^\circ\text{C}$ .

В формуле (1) аргументами при вычислении  $\Delta t_0$  являются вертикальные разности температур  $t$ , поэтому для определения  $\Delta t_0$  по номограмме необходимо измерять температуру на высоте 25 м, что не всегда удобно. При отсутствии данных на высоте 25 м температуру следует измерить на другой удобной высоте \*, например, 5—10 м, затем, пользуясь линейным интерполированием, вычислить на высоте 25 м. Разумеется,  $\Delta t_0$  будет иметь некоторую погрешность. Для проверки полученной номограммы нами найдены разности  $\delta t_0$  между измеренными значениями температур на различных высотах зондирования и определенными на этих высотах по номограмме, то есть

$$\delta t_0 = t_{\Phi} - t_n, \quad (3)$$

где  $t_{\Phi}$  — фактическая температура;  $t_n$  — температура, полученная по номограмме.

Проверка проводилась на материалах, вошедших в выборки при построении номограммы. Полученные при этом разности разделены нами на четыре группы: в первую группу отнесены те разности, для которых температура  $t_0$  лежала в интервале  $0^{\circ}\text{C} > t_0 < +10^{\circ}\text{C}$ , в последующие группы — разности с интервалами температур  $+10^{\circ}\text{C} < t_0 < +17^{\circ}\text{C}$ ;  $+17^{\circ}\text{C} < t_0 < +23^{\circ}\text{C}$ ;  $+23^{\circ}\text{C} < t_0$  соответственно. Каждая из групп содержала в среднем по 90 результатов зондирования.

Средние значения  $\delta t_0$  для соответствующих высот и значений  $t_{0\text{ср}}$  приведены в табл. 1.

Исследуя данные табл. 1, приходим к выводу, что средние значения разностей  $\delta t_0$  зависят от температуры  $t_0$ . Зависимость не линейная и тем большая, чем выше высота  $h$ . Кроме того, величина  $\delta t_0$  сильно зависит от  $h$  при данной средней температуре  $t_{0\text{ср}}$ . Учитывая это, мы аппроксимировали полученные разности полиномами вида:

$$\left. \begin{array}{l} \delta_1 t_0 = a'_1 h + b'_1 h^2 + c'_1 h^3 + d'_1 h^4 \\ \delta_2 t_0 = a'_2 h + b'_2 h^2 + c'_2 h^3 + d'_2 h^4 \\ \delta_3 t_0 = a'_3 h + b'_3 h^2 + c'_3 h^3 + d'_3 h^4 \\ \delta_4 t_0 = a'_4 h + b'_4 h^2 + c'_4 h^3 + d'_4 h^4 \end{array} \right\}, \quad (4)$$

Коэффициенты  $a'_i$ ,  $b'_i$ ,  $c'_i$ ,  $d'_i$ , где  $i=1, 2, 3, 4$ , вычислены по способу наименьших квадратов.

Для определения поправки  $\delta t_0$  положим, что между каждыми из принятых нами интервалов средних температур коэффициенты менялись по линейному закону, то есть

$$\left. \begin{array}{l} a_i = a_{0,i} + a_{1,i} t_0 \\ b_i = b_{0,i} + b_{1,i} t_0 \\ c_i = c_{0,i} + c_{1,i} t_0 \\ d_i = d_{0,i} + d_{1,i} t_0 \end{array} \right\}, \quad (5)$$

где  $i=1, 2, 3$  — количество интервалов температур  $t_0$ .

Значения коэффициентов системы (5) для интервалов  $i$  получены из решения систем уравнений и приведены в табл. 2.

Зависимость поправки  $\delta t_0$  от высоты  $h$  и температуры в диапазоне от  $+29^{\circ}\text{C}$  до  $-14^{\circ}\text{C}$  с учетом численных значений коэффициентов

\* Для этих целей используют подвешиваемые на мачтах психрометры Асмана или термометры сопротивления.

Таблица 1

Значения средних разностей  $\delta_{t_0}$ 

| $t_{0cp}^C$ | Высота зондирования, м |        |        |        |        |        | 500    |        |        |        |
|-------------|------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|             | 25                     | 50     | 75     | 100    | 150    | 200    |        |        |        |        |
| -14,20      | +0,051                 | +0,194 | +0,546 | +0,938 | +1,700 | +2,462 | +4,698 | +6,821 | +9,018 |        |
| +14,38      | +0,190                 | +0,305 | +0,356 | +0,424 | +0,548 | +0,855 | +1,165 | +1,482 | +2,132 | +3,321 |
| +20,12      | -0,039                 | +0,053 | +0,218 | +0,211 | +0,180 | +0,222 | +0,246 | +0,582 | +1,219 | +2,180 |
| +29,33      | -0,180                 | -0,166 | -0,258 | -0,315 | -0,530 | -0,676 | -0,766 | -0,784 | -0,356 | +0,338 |

Таблица 2

Значения коэффициентов уравнений для интервалов температур  $t_0$ 

| Интервалы температур              | Коэффициенты уравнений |           |          |          |          |          |          |         |
|-----------------------------------|------------------------|-----------|----------|----------|----------|----------|----------|---------|
|                                   | $a_{0l}$               | $a_{t_l}$ | $b_{0l}$ | $b_{1l}$ | $c_{0l}$ | $d_{0l}$ | $d_{1l}$ |         |
| $+29^\circ C > t_0 > +20^\circ C$ | +1,6639                | -0,0639   | -0,4631  | +0,0068  | +0,1055  | +0,0004  | -0,0048  | -0,0002 |
| $+20^\circ C > t_0 > +14^\circ C$ | +0,8133                | -0,0216   | -0,5253  | -0,0423  | -0,1929  | +0,0153  | +0,0204  | -0,0015 |
| $+14^\circ C > t_0 > -14^\circ C$ | +0,3434                | +0,0111   | +0,3613  | -0,0309  | -0,0590  | +0,0060  | +0,0044  | -0,0004 |

табл. 2 и принятых интервалов может быть представлена полиномами.

$$\begin{aligned}\delta t_0 &= (1.664 - 0.064 \tau) h + (-0.463 + 0.006 \tau) h^2 + \\&+ (0.106 + 0.0004 \tau) h^3 + (-0.0005 - 0.0002 \tau) h^4, \\ \delta t_0 &= (0.813 - 0.012 \tau) h + (0.525 - 0.042 \tau) h^2 + \\&+ (-0.193 + 0.015 \tau) h^3 + (0.020 - 0.002 \tau) h^4, \\ \delta t_0 &= (0.343 + 0.011 \tau) h + (0.361 - 0.031 \tau) h^2 + \\&+ (-0.059 + 0.006 \tau) h^3 + (0.004 - 0.0004 \tau) h^4.\end{aligned}\quad (6)$$

где  $h$  — высота, выраженная в сотнях метров. Для получения поправки  $\delta t_0$  нами построена номограмма (рис. 2), где на оси абсцисс отложены значения поправки  $\delta t_0$ , на оси ординат — высоты  $h$ . Кривые номограм-

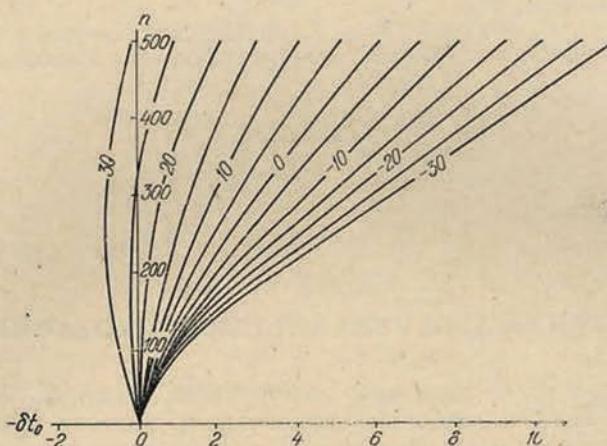


Рис. 2. Номограмма для определения  $\delta t_0$  по  $t_0$  и  $h$ .

мы, соответствующие значениям температур  $t_0$ , проведены через  $5^\circ\text{C}$  в интервале от  $+30^\circ\text{C}$  до  $-30^\circ\text{C}$ , при этом кривые  $t_0 < -14^\circ\text{C}$  и  $t_0 > 29^\circ\text{C}$  получены методом линейного экстраполирования.

Поправку  $\delta t_0$  по номограмме получаем следующим образом: по кривой температур  $t_0$  необходимо подняться или опуститься до соответствующей высоты  $h$  и на оси абсцисс снять величину поправки  $\delta t_0$ . С учетом данной номограммы окончательная температура на высоте  $h$  в нижнем 500-метровом пограничном слое определится по формуле

$$t = t_0 + \Delta t_0 + \delta t_0. \quad (7)$$

Точность определения температуры по номограммам характеризуется приведенными ниже среднеквадратическими ошибками:  $m_{100} = \pm 0.89^\circ\text{C}$ ,  $m_{200} = \pm 1.55^\circ\text{C}$ ,  $m_{300} = \pm 1.97^\circ\text{C}$ ,  $m_{500} = \pm 2.45^\circ\text{C}$  для высот 100, 200, 300 и 500 м соответственно \*.

Следует, однако, оговорить, что оценка точности определения температуры данным косвенным методом осуществлялась по так называемым «зависимым» материалам, по которым фактически создавались и номограммы и требует проверки на «независимых» выборках. Такая проверка частично выполнена. Полученные результаты (здесь не приводятся) незначительно отличаются от приведенных выше среднеквадратических отклонений.

\* Исключением является четвертый тип [1] стратификации — инверсионный, при котором ошибки определения  $t$  на высоте 500 м могут достигать  $m_{500} = \pm 4-6^\circ\text{C}$ .

Учитывая статистический подход к обработке материалов и их представительность (температурные данные получены в разные времена года, периоды суток, в различных пунктах), можно ожидать, что полученные среднеквадратические ошибки надежно характеризуют точность определения температуры данным методом.

В заключение отметим, что предложенная методика позволяет с помощью номограммы, не прибегая к специальным зондированиям атмосферы, легко и быстро определять температуру на различных высотах в нижнем пограничном слое воздуха с достаточной точностью для ряда случаев практики, а именно: при свето- и радиодальномерных измерениях, барометрическом и тригонометрическом нивелированиях.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Воронцов П. А. Аэрологические исследования пограничного слоя атмосферы. Л., Гидрометеоиздат, 1960.
2. Хижак Л. С., Федорищев А. Е. Исследование температурного поля с целью учета рефракционных искажений в пограничном слое атмосферы. Статья в данном сборнике.