

## 2 · Распределение температуры воздуха по высоте в пограничном слое атмосферы

Близость исключительно неоднородной по своим физическим свойствам земной поверхности, большие колебания (во времени и пространстве) содержания поглощающих радиацию газов (прежде всего водяного пара), наличие облаков, туманов и твердых примесей и другие факторы обуславливают исключительно большое разнообразие профилей температуры воздуха, равно как и других величин (скорости ветра, характеристик влажности воздуха и турбулентного обмена), в пограничном слое атмосферы. При этом имеет место тесное взаимодействие и взаимообусловленность полей различных метеорологических параметров атмосферы. Так, распределение температуры оказывает решающее влияние на распределение характеристик влажности воздуха и турбулентного обмена. Но водяной пар и особенно облака и туманы как продукты конденсации водяного пара в свою очередь весьма существенно влияют на поле температуры. То же самое можно сказать о распределении температуры и скорости ветра: здесь посредником выступает турбулентный обмен, оказывающий большое влияние на профили температуры и скорости ветра (но одновременно и зависящий от них).

При получении опытных данных о распределении метеорологических величин в пограничном слое встречаются большие трудности: с одной стороны, с помощью радиозондов вследствие большой скорости их подъема удается получить в пределах пограничного слоя значения величин лишь на двух-трех высотах (чего явно недостаточно для построения кривых распределения); с другой стороны, с помощью градиентных наблюдений представляется возможным изучить слой атмосферы до высоты в несколько десятков (в отдельных пунктах — сотен) метров. Поэтому основными средствами зондирования пограничного слоя служит самолет и аэростат. Однако эти средства не являются массовыми и применение их ограничено условиями погоды.

Распределение средней за сезон температуры воздуха по данным аэростатного зондирования в Московской области изображено на рис. 10.7. Зимой во всем слое (до высоты 700 м) стратификация инверсионная; температура растет с высотой сначала быстро (примерно на  $1,5-2^{\circ}\text{C}/100\text{ м}$ ), а затем все медленнее. Летом инверсия температуры наблюдается лишь до высоты 100 м, выше температура падает (градиент температуры составляет  $0,6-0,8^{\circ}\text{C}/100\text{ м}$ ). Весной и осенью до высоты 150—200 м наблюдается рост температуры, выше — падение (более медленное, чем летом).

По данным измерений температуры воздуха на аэростатах под Ленинградом П. А. Воронцов выделил четыре типа стратификации. В качестве критерия взят параметр  $\Delta T/c^2$  (здесь  $\Delta T$  — разность

Таблица 10.8. Средние значения температуры воздуха ( $^{\circ}\text{C}$ ) на различных высотах ( $N$  — число случаев)

$\Delta T / c^2$	Высота, м						$N$
	2	25	50	100	200	500	
Зима							
$> 0,06$	-3,3	-3,8	-4,0	-4,4	-5,0	-5,8	13
От 0,06 до 0,02	-3,3	-3,6	-3,8	-4,3	-4,8	-5,9	30
От 0,02 до -0,02	-1,9	-1,9	-2,0	-2,0	-1,8	-1,6	48
$< -0,02$	-6,8	-6,2	-5,6	-4,3	-3,4	-4,1	15
Лето							
$> 0,06$	19,0	18,3	17,8	17,2	16,3	13,7	50
От 0,06 до 0,02	17,1	16,4	16,1	15,4	14,6	12,3	43
От 0,02 до -0,02	15,0	14,8	14,7	14,7	14,5	12,8	24
$< -0,02$	13,0	13,6	14,2	15,0	15,3	13,6	20

температур воздуха на высотах 2 и 100 м,  $c$  — скорость ветра на высоте 100 м). Средние значения температуры воздуха для каждого из четырех типов приведены в табл. 10.8.

При первом типе температура падает с высотой во всем 500-метровом слое; в этом случае градиент температуры превышает  $\gamma_a$  в слое 0—100 м и близок к нему выше 100 м. При втором

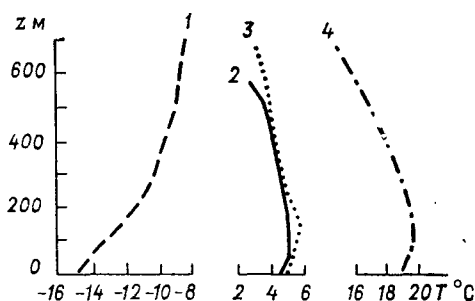


Рис. 10.7. Средние вертикальные профили температуры воздуха. Московская область.

1 — зима, 2 — осень, 3 — весна, 4 — лето.

типе температура также падает с высотой во всем слое, но более медленно, чем при первом. Третий тип характеризуется практически изотермической стратификацией во всем слое, а четвертый тип — инверсионной стратификацией: температура растет с высотой летом и зимой до высоты около 300 м. Летом преобладают первый и второй типы стратификации, зимой — третий и четвертый. Обратим внимание на то, что наиболее низкая температура воздуха у земли наблюдается как зимой, так и летом при инверсионном типе стратификации. С высотой различия в температурах уменьшаются.

В табл. 10.9 приведены средние значения  $\gamma$  по наблюдениям в разные сроки в Обнинске за 1962—1963 гг. Наибольшие изменения  $\gamma$  наблюдаются в нижнем 100-метровом слое, особенно летом и осенью, когда днем градиенты сверхадиабатические ( $\gamma > \gamma_a$ ), а ночью — отрицательные ( $\gamma < 0$ ). В 13 ч сверхадиабатические градиенты наблюдаются летом во всем 300-метровом слое, осенью и весной — лишь до высоты 100 м.

Таблица 10.9. Средние значения  $\gamma$  (°С/100 м)

Слой, м	Сроки наблюдений, ч							
	1	7	13	19	1	7	13	19
	Зима				Весна			
2—100	-0,6	-0,4	0,6	-0,3	-2,2	0,0	1,4	1,2
100—200	0,3	0,1	0,5	0,2	0,1	-1,0	1,0	0,7
200—300	0,2	-0,2	0,4	-0,1	0,3	0,6	0,3	0,8
	Лето				Осень			
2—100	-3,8	0,3	1,4	-0,8	-2,3	-2,4	1,5	-2,1
100—200	-0,3	-0,6	1,1	0,7	-0,6	-1,3	0,6	0,3
200—300	0,4	0,5	1,1	0,6	0,1	0,3	10,5	0,3

Существенное влияние на распределение температуры оказывает облачность. Опытные данные о распределении температуры при разных формах и количестве облаков приведены в табл. 10.10.

Таблица 10.10. Средняя температура воздуха (°С) при разных формах и количестве облаков нижнего яруса. Ленинград

Форма облаков	Количество облаков, баллы	Высота, м					
		2	25	50	100	200	300
Лето							
Sc, St	10	12,7	12,2	11,7	11,4	10,9	9,3
Sc	7—9	13,2	12,7	12,8	13,7	13,7	11,2
Cu	7—8	17,8	17,0	16,5	15,8	14,9	12,0
Sc	3—6	16,5	16,2	16,0	15,8	15,4	13,2
Cu	3—6	19,3	18,7	18,3	17,7	16,7	14,0
	0—2	17,0	16,5	16,2	16,0	15,0	13,3
Зима							
Sc, St	10	-2,7	-3,0	-3,1	-3,3	-3,5	-5,1
Sc	7—9	-1,0	-1,4	-1,6	-2,3	-2,7	-3,5
	3—6	-7,9	-8,1	-8,2	-8,1	-8,5	-9,8
Cu	3—6	-0,2	-0,5	-0,7	-1,3	-2,2	—
	0—2	-2,4	-2,2	-2,1	-2,0	-1,7	-2,0

Особенно велико различие в температурах воздуха при большом и малом количестве облаков летом: разность между температурами при сплошной облачности и при облачности 3—6 баллов составляет на всех высотах 5—6 °С.

Рассмотрим экстремальные значения градиента температуры в пограничном слое. По данным измерений в Подмосковье за 1950—1954 гг., в слое 0—50 м градиент температуры изменялся от 5,6 до —15,4 °С/100 м (речь идет о градиентах, рассчитанных для всего указанного слоя). Чем выше расположен слой, тем меньше диапазон колебаний градиента температуры. Градиенты температуры, во всяком случае его положительные значения, выше 100—150 м уже не так сильно отличаются от сухоадиабатического. Так, в слое 200—400 м экстремальные значения изменяются от 1,20 до —4,55 °С/100 м, в слое 400—600 м — от 1,75 до —3,00 °С/100 м.

### 3 Теория суточного хода температуры воздуха в пограничном слое атмосферы

Первые работы по теории суточного хода температуры воздуха были выполнены В. Шмидтом и Дж. Тейлором свыше 50 лет тому назад.

Исходным уравнением служит уравнение притока тепла, полученное в главе 9:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} k \frac{\partial T}{\partial z} + \varepsilon'(z, t). \quad (3.1)$$

В этом уравнении через  $\varepsilon'(z, t)$  обозначен приток тепла, обусловленный всеми факторами (радиационными, конденсационными, адвективными, конвективными), кроме турбулентного обмена. Потенциальная температура в правой части (3.1) заменена кинетической по той причине, что вертикальные градиенты температуры в приземном слое существенно больше сухоадиабатического, вследствие чего

$$\frac{\partial}{\partial z} k \frac{\partial \Theta}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} k \left( \gamma_a + \frac{\partial T}{\partial z} \right) \approx \frac{\partial}{\partial z} k \frac{\partial T}{\partial z}.$$

Выше приземного слоя  $\gamma$  сравнимо с  $\gamma_a$ . Однако здесь  $k$  — практически постоянная (с высотой) величина. Поэтому

$$\frac{\partial}{\partial z} k \frac{\partial \Theta}{\partial z} = k \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}.$$

Теория суточного хода температуры воздуха наиболее полно развита для случая, когда учитывается один турбулентный приток тепла. Эта теория объясняет целый ряд особенностей суточного хода температуры, прежде всего в пограничном слое атмосферы.