

Глава 10 Суточный ход температуры воздуха в пограничном слое атмосферы

1 Экспериментальные данные

Хорошо выраженный суточный ход температуры воздуха обусловлен изменением притока тепла к земной поверхности и атмосфере в течение суток. В дневные часы земная поверхность вследствие притока солнечной радиации нагревается, а ночью под влиянием излучения охлаждается. В то же время непосредственное поглощение воздухом коротковолновой солнечной радиации днем и собственное излучение ночью сравнительно мало влияют на температуру воздуха. В результате этого возникает теплообмен между земной поверхностью и атмосферой, который и служит причиной суточных изменений температуры воздуха.

В передаче тепла от земной поверхности к атмосфере играют роль все процессы, рассмотренные в главе 9. Если бы тепло передавалось только посредством молекулярного обмена, то суточные колебания температуры воздуха распространялись лишь на очень тонкий слой (в несколько метров), прилегающий к земной поверхности. Тогда почва и тонкий слой воздуха очень сильно нагревались бы днем и охлаждались ночью. Однако в нижней тропосфере основная роль принадлежит турбулентному обмену, под влиянием которого суточные колебания температуры воздуха распространяются на слой высотой до 1—1,5 км.

Слой атмосферы, в котором хорошо выражен суточный ход температуры и других метеорологических величин (скорости ветра, характеристик влажности), обусловленный турбулентным обменом, носит название *пограничного слоя атмосферы*. Высота этого слоя H колеблется в довольно широких пределах (от 300—400 м до 1—2 км) в зависимости от шероховатости земной поверхности (чем больше шероховатость, тем больше H), термической устойчивости (с увеличением неустойчивости растет H), скорости ветра и др.

Из непосредственных наблюдений известно, что минимум температуры земной поверхности наступает незадолго до восхода Солнца. С восходом Солнца быстро повышается температура земной поверхности. Путем турбулентного обмена и радиационных

процессов тепло от земной поверхности передается воздуху. Часть тепла усваивается тонким слоем воздуха, непосредственно прилегающим к земной поверхности. Остальная часть распространяется в вышележащий элементарный слой, где также происходит его частичное поглощение, и т. д. Благодаря усвоению тепла температура воздуха после восхода Солнца также начинает расти, но с некоторым запаздыванием по сравнению с температурой земной поверхности; запаздывание тем больше, чем выше расположен элементарный слой воздуха.

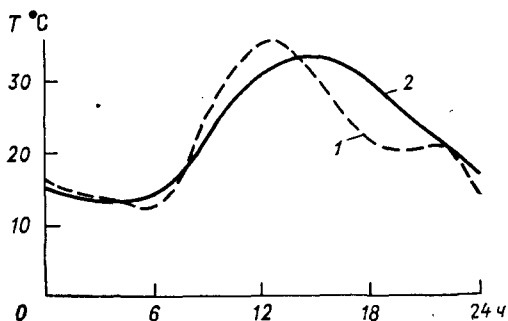


Рис. 10.1. Суточный ход температуры воздуха на высотах 0,05 (1) и 1,5 м (2). Арысь (Казахская ССР), 5 сентября 1945 г.

В утренние часы температура воздуха быстро растет (во времени). В 9—10 ч (в умеренных широтах летом) нарастание температуры воздуха замедляется. Максимум ее на уровне 2 м наступает в 13—14 ч. После этого температура вновь начинает понижаться, сначала медленно, а затем (с 16—17 ч) до захода Солнца быстро; после захода Солнца в течение ночи продолжается медленное падение температуры. Типичный график суточного хода температуры воздуха на двух высотах при отсутствии облачности приведен на рис. 10.1 и в табл. 10.1.

Из рисунка и таблицы следует, что на высоте 1,5 м максимум и минимум температуры наступает несколько позже, чем на высоте 0,05 м.

Таблица 10.1. Суточный ход температуры воздуха (°С).
Арысь, Казахская ССР

z м	Время, ч											
	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24
0,05	21,1	17,2	19,2	29,1	35,0	39,0	40,2	38,8	34,2	28,8	26,9	22,0
1,5	22,0	19,0	19,4	27,6	32,1	35,2	37,3	37,3	34,9	29,6	27,4	23,8

Сравним амплитуду суточного хода температуры воздуха на этих двух высотах, т. е. половину разности между ее максимальным и минимальным значениями¹:

$$A = (T_{\max} - T_{\min})/2.$$

В рассматриваемом примере (см. табл. 10.1) $2A_{0,05} = 40,2 - 17,2 = 23,0^\circ\text{C}$; $2A_{1,5} = 37,3 - 19,0 = 18,3^\circ\text{C}$. Таким образом, $A_{1,5} < A_{0,05}$, т. е. амплитуда суточного хода с высотой уменьшается.

Исследования суточного хода температуры воздуха выше 1,5—2 м проводились с помощью привязных и свободных аэростатов, радиозондов, а также путем производства градиентных наблюдений (на специальных мачтах).

На рис. 10.2 приведен суточный ход температуры воздуха в Московской области по данным учащенного радиозондирования атмосферы. Радиозонды выпускались через каждые 2 ч в период с 10 по 24 мая 1955 г. Кривые на рис. 10.2 показывают суточный ход средней (за 15 сут) температуры воздуха. Осреднение позволило уменьшить влияние непериодических изменений температуры (адвекции). Максимум температуры на высоте 0,19 км (т. е. на уровне 2 м над землей) наступает, согласно рис. 10.2, между 13 и 14 ч, на высоте 0,5 км — около 14 ч, на высотах 1 и 1,5 км — между 14 и 15 ч (высоты над уровнем моря). Таким образом, с увеличением высоты наблюдается запаздывание в наступлении максимума температуры. За рассматриваемый период получены следующие амплитуды $2A$ суточного хода температуры воздуха на различных высотах:

z км . . .	0,19	0,5	1,0	1,5	2,0
$2A$ °C . . .	9,2	5,7	2,8	2,1	1,4

На высотах 1,5 и 2 км, согласно рис. 10.2, наблюдается сложный суточный ход температуры воздуха (с двумя и даже тремя максимумами и минимумами).

Более детальные опытные данные по суточному ходу температуры воздуха, так же как скорости ветра и влажности, в погра-

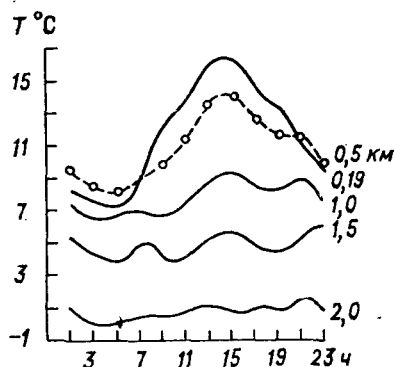


Рис. 10.2. Суточный ход температуры воздуха на различных высотах. Московская область, май.

¹ Амплитудой называют также разность $T_{\max} - T_{\min}$, т. е. величину $2A$.

ничном слое получены с помощью привязных аэростатов, высота подъема которых колебалась, как правило, между 500 и 1000 м (при средней высоте 700—800 м).

Одним из недостатков аэростатного зондирования атмосферы является большая зависимость от условий погоды: при современном состоянии техники подъемы производятся при скорости ветра (у земной поверхности) не более 7—8 м/с, высоте облаков не менее 500 м и дальности видимости более 1 км. Вследствие этого полученные с помощью аэростатов опытные данные характеризуют в основном антициклонические условия погоды.

Средние значения амплитуды суточного хода по данным 50 суточных серий аэростатного зондирования (из них зимой — 11, весной — 13, летом — 14, осенью — 12 серий; подъемы производились через 2—3 ч) приведены в табл. 10.2.

Таблица 10.2. Средняя амплитуда $2A$ ($^{\circ}\text{C}$) суточного хода температуры воздуха. Московская область (по В. А. Девятовой)

Сезон	Высота, м										
	2	50	100	150	200	300	400	500	600	700	800
Весна	9,1	6,1	5,2	4,7	4,0	3,5	2,5	1,9	1,7	1,6	1,9
Лето	10,1	6,5	5,9	4,8	4,2	2,8	2,4	2,2	2,0	1,8	—
Осень	6,6	5,2	4,7	4,2	3,0	1,9	1,9	1,2	0,8	0,5	—
Зима	5,1	3,9	3,3	2,2	2,4	1,2	0,6	0,6	0,8	0,8	0,7

Первоисточником суточных колебаний температуры является солнечная радиация, поглощаемая земной поверхностью. Летом приток солнечной радиации к земной поверхности в околополуденные часы значительно больше, чем зимой. Вследствие этого и амплитуда суточного хода температуры воздуха вблизи земной поверхности летом почти в 2 раза больше, чем зимой. Турбулентный обмен летом более интенсивен, чем во все другие сезоны года. Следствием этого является более медленное убывание амплитуды с высотой летом и весной по сравнению с зимой и осенью: летом и весной амплитуда на высоте 700 м примерно в 5 раз меньше, чем вблизи земной поверхности, зимой и осенью — соответственно в 7 и 8 раз.

Суточные колебания испытывает не только температура, но и ее вертикальный градиент γ . В табл. 10,3 приведены средние значения γ летом и зимой в различных слоях. Летом вертикальный градиент температуры в трех нижних слоях положителен днем и отрицателен ночью. Амплитуда суточного хода γ с высотой уменьшается. Согласно данным табл. 10.3, выше 200 м $\gamma > 0$ во все часы суток, но значения его изменяются в достаточно широких пределах (в слое 200—400 м от 0,94—0,96 $^{\circ}\text{C}/100$ м в околополуденные часы до 0,36—0,44 $^{\circ}\text{C}/100$ м в ночные).

Таблица 10.3. Средние значения вертикального градиента температуры γ ($^{\circ}\text{C}/100$ м) в различные часы суток. Московская область

Время, ч	Высота, м									
	0—50	50—100	100—200	200—400	400—600	0—50	50—100	100—200	200—400	400—600
	Лето					Зима				
7	2,12	0,40	-0,10	0,39	0,77	-0,56	-1,00	-1,52	-0,90	-0,74
10	3,71	1,20	0,84	0,96	0,82	0,10	-1,10	-1,32	-0,72	-0,48
13	3,24	1,23	0,90	0,94	0,85	1,60	0,33	-0,55	-0,76	-0,25
16	2,56	1,23	0,87	0,95	0,93	0,03	-0,63	0,17	-0,30	-0,22
19	0,14	0,43	0,14	0,89	0,94	-0,20	-1,12	-0,90	-0,58	-0,44
22	-4,18	-0,81	-0,03	0,69	0,70	-1,60	-1,43	-1,12	-0,70	-0,20
1	-3,90	-2,68	-0,32	0,36	0,76	-3,10	-2,43	-0,55	-1,05	-0,45
4	-4,60	-2,98	-1,03	0,44	0,70	-1,84	-2,63	-0,66	-1,34	-0,37

Зимой вертикальный градиент в слое 0—200 м также изменяет знак в течение суток, но промежуток времени, в течение которого $\gamma > 0$, зимой значительно меньше, чем летом (в слоях 50—100 и

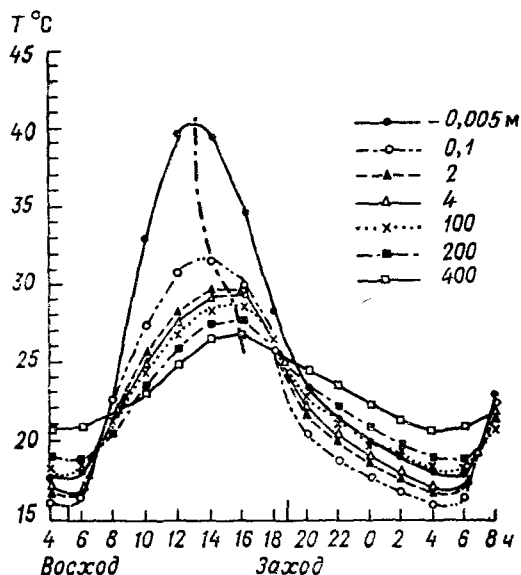


Рис. 10.3. Суточный ход температуры воздуха на различных высотах, осредненный по шести суточным сериям наблюдений. О'Нейл (США), август—начало сентября 1953 г.

100—200 м лишь за один срок наблюдений $\gamma > 0$). Выше 200 м вертикальный градиент температуры зимой во все часы суток отрицателен: температура растет с высотой. Однако и в этих слоях значения γ изменяются в течение суток в 3—4 раза.

Рисунок 10.3, построенный по данным наблюдений в течение 6 сут, позволяет подметить еще одну характерную особенность су-

Таблица 10.4. Относительная амплитуда A/A_0 и время наступления $t_{\text{макс}}$ (фаза) максимума температуры

Величина	Высота, м				
	-0,005	0	0,1	2	4
A/A_0 (5+6)	0,91	1,0	0,565	0,460	0,432
$t_{\text{макс}}$ ч мин (5+6)	13 00	—	13 50	14 20	14 42
A/A_0 (все)	0,91	1,0	0,640	0,543	0,512
$t_{\text{макс}}$ ч мин (все)	13 00	—	14 00	15 00	15 08

Величина	Высота, м				
	8	16	100	200	400
A/A_0 (5+6)	0,420	0,405	0,380	0,340	0,270
$t_{\text{макс}}$ ч мин (5+6)	14 50	14 55	15 00	15 10	15 30
A/A_0 (все)	0,500	0,493	0,450	0,360	0,250
$t_{\text{макс}}$ ч мин (все)	15 10	15 20	15 25	15 30	15 40

Примечание. Здесь 5+6 означает, что осреднение произведено по пятой и шестой сериям наблюдений, осуществленных 24—25 августа и 31 августа—1 сентября при малооблачной погоде. Слово «все» указывает на то, что осреднение произведено по всем шести суточным сериям наблюдений.

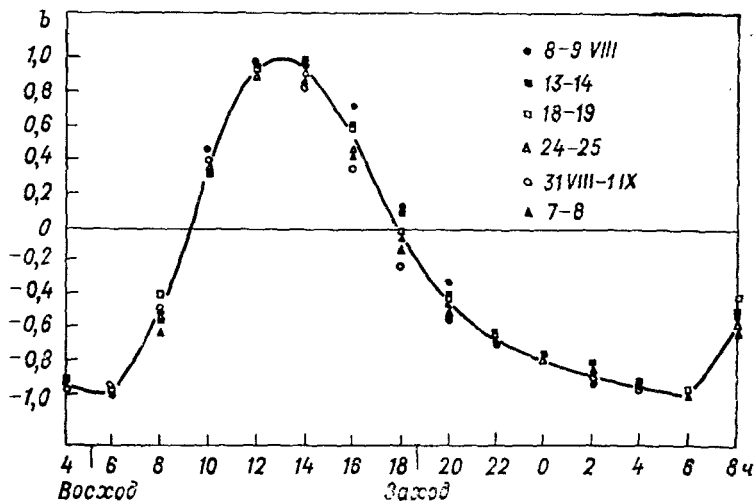


Рис. 10.4. Суточный ход температуры T_1 поверхностного слоя почвы (на глубине 0,5 см) в безразмерном виде. О'Нейл (США).

точного хода температуры воздуха. Видно, что с увеличением высоты амплитуда суточного хода уменьшается, а максимум температуры запаздывает. Однако существенное запаздывание наблюдается лишь в нижней части пограничного слоя.

Сведения об относительной амплитуде A/A_0 и фазе максимума температуры по данным наблюдений в О'Нейле приведены в табл. 10.4. Максимум температуры на высоте 4 м наступает на 1 ч 42 мин позже, чем на глубине 0,5 см (эта глубина взята вместо поверхности земли, температура которой определяется с большой погрешностью). В то же время на 200 м максимум наступает всего лишь на 28 мин позже, чем на 4 м.

На рис. 10.4 представлен суточный ход температуры T_1 поверхностного слоя почвы (на глубине 0,5 см) в безразмерном виде. По оси ординат отложено безразмерное отношение $b = (T_1 - \bar{T}_1)/\Delta T$, где $\bar{T}_1 = (T_{\max} + T_{\min})/2$, $\Delta T = T_{\max} - T_{\min}$. Согласно этому графику, кривые суточного хода температуры во всех сериях наблюдений практически совпадают, если привести этот ход к безразмерному виду.

Вертикальные профили температуры воздуха в различные моменты времени приведены на рис. 10.5. Общие закономерности таковы. В дневное время температура падает с высотой, очень быстро вблизи земной поверхности ($\gamma > \gamma_a$) и более медленно ($\gamma \approx \gamma_a$) выше 50—100 м. В ночную половину суток в нижней части слоя (до высоты 300—400 м) температура растет с высотой, а выше падает. Обратим внимание на то, что в слое 1000—1500 м температура воздуха в ранние утренние часы (6 ч 35 мин) выше, чем в околополуденные часы (14 ч 35 мин).

В последние десятилетия уникальные наблюдения проведены на высотной метеорологической мачте в Обнинске (Калужская область) и на телевизионных башнях Москвы, Ленинграда, Горького, Киева и других городов Советского Союза. Таблица 10.5 содержит сведения об амплитудах суточного хода температуры воздуха по наблюдениям в Обнинске за 1962—1963 гг., которые проводились систематически по двое суток через каждые две недели. Наибольшие амплитуды наблюдаются летом и осенью, наимень-

Таблица 10.5. Средние амплитуды $2A$ (°С) суточного хода температуры воздуха в различные сезоны года

Сезон	Высота, м								
	2	25	49	97	169	217	241	265	289
Зима	2,1	1,7	1,3	1,0	0,8	0,6	0,5	0,4	0,4
Весна	4,8	4,4	4,7	3,8	2,3	1,9	1,6	1,6	1,8
Лето	8,0	5,4	4,7	4,3	3,2	2,9	2,7	2,8	2,8
Осень	8,5	6,4	5,8	4,5	3,0	2,5	2,3	2,5	2,6

шие — зимой. С увеличением высоты амплитуды суточного хода во все сезоны падают (исключение составляют два последних уровня).

По наблюдениям 1968—1970 гг. приводятся сведения об амплитудах суточного хода температуры воздуха в Обнинске в ясную и

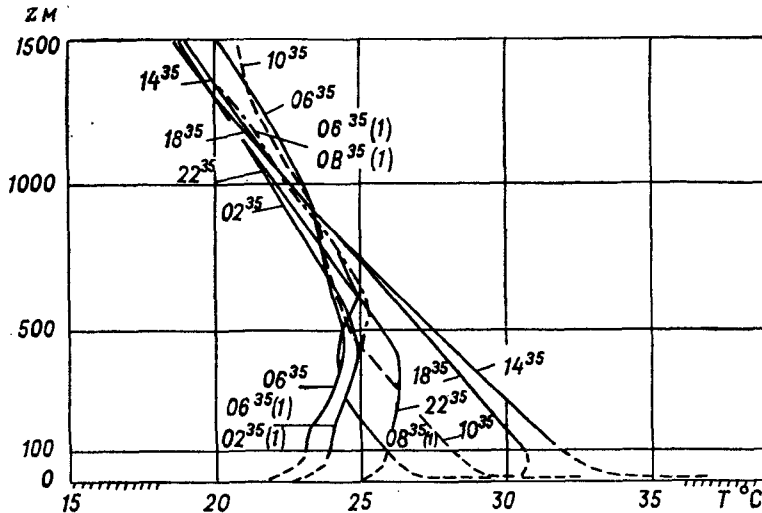


Рис. 10.5. Вертикальные профили температуры воздуха 31 августа—1 сентября 1953 г. О'Нейл (США).

Цифры у кривых — поясное время.

облачную погоду (табл. 10.6). В выборку «облачно» вошли случаи с переменной (не сплошной) облачностью. Поэтому различие между амплитудами в ясную и облачную погоду по этим данным не очень велико. Вблизи земной поверхности (8 м) амплитуда суточного хода больше в ясную, чем в облачную погоду. На высоте 301 м наблюдается обратная картина: амплитуда во все сезоны в облачную погоду больше, чем в ясную.

Таблица 10.6. Средние амплитуды $2A$ (°C) суточного хода температуры воздуха в ясную и облачную погоду (N — число случаев)

Высота, м	Ясно			Облачно		
	Весна	Лето	Осень	Весна	Лето	Осень
8	9,6	10,6	11,8	8,8	8,6	5,9
169	4,1	5,4	4,6	6,9	5,0	3,9
301	3,4	3,8	2,7	4,4	4,2	3,4
N	5	6	2	3	9	4

Непрерывная регистрация величин на высотной мачте в Обнинске за 1968—1970 гг. использована для определения времени наступления максимума и минимума температуры (табл. 10.7).

Таблица 10.7. Среднее время (ч мин) наступления экстремальных температур. Обнинск (N — число случаев)

Высота, м	Весна		Лето		Осень		Зима	
	макс.	мин.	макс.	мин.	макс.	мин.	макс.	мин.
8	15 00	5 30	16 00	4 30	15 00	5 30	14 30	6 30
169	16 30	6 00	17 00	6 00	16 00	6 00	14 30	9 00
301	16 30	6 30	17 00	8 30	16 30	6 00	14 30	10 30
N	11		16		11		5	

На рис. 10.6 показан хорошо выраженный, не искаженный адвекцией и облачностью суточный ход температуры 5—6 августа 1970 г., когда только с 13 до 17 ч наблюдалась кучевая облачность 1—2 балла, а в остальное время было ясно. На этом пространственно-временном разрезе приведены термоизоплеты: кривые,

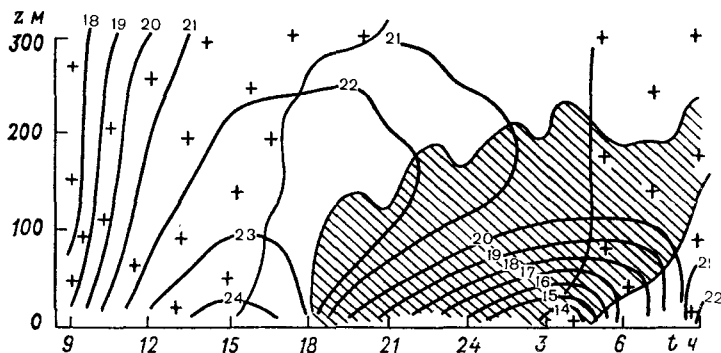


Рис. 10.6. Пространственно-временной разрез поля температуры ($^{\circ}\text{C}$) 5—6 августа 1970 г. Обнинск.

соединяющие точки с одними и теми же значениями температуры. Знаком «плюс» отмечены области нарастания температуры во времени; область с инверсионной стратификацией заштрихована. На всех высотах суточный ход температуры при таких погодных условиях имеет вид волны: на высоте 8 м с максимумом ($24,4^{\circ}\text{C}$) в 15 ч 30 мин и минимумом ($13,4^{\circ}\text{C}$) в 4 ч 30 мин, на высоте 169 м — соответственно в 17 ч 30 мин ($22,7^{\circ}\text{C}$) и в 5 ч 30 мин ($20,4^{\circ}\text{C}$), на высоте 301 м — в 18 ч ($21,2^{\circ}\text{C}$) и в 7 ч 30 мин (20°C).