

Полученные уравнения широко используются для исследования различных атмосферных явлений и процессов.

5 Определение и высота приземного слоя

Изучение физических процессов и явлений в прилегающем к земной поверхности слое атмосферы толщиной в несколько десятков метров представляет большой научный и практический интерес. Состояние этого слоя оказывает существенное влияние на растительный и животный мир Земли, на производственную деятельность и условия жизни человека. Через приземный слой осуществляется взаимодействие атмосферы с земной поверхностью, происходит «питание» вышележащих слоев влагой и теплом. Формирующиеся в приземном слое потоки тепла, водяного пара и количества движения оказывают большое влияние на температурный и ветровой режим других слоев атмосферы, на образование и эволюцию облаков и осадков.

Закономерности физических процессов, происходящих в приземном слое, во многом отличаются от закономерностей этих процессов в других слоях атмосферы. Состояние приземного слоя самым тесным образом связано с состоянием земной поверхности. Метеорологические величины претерпевают в приземном слое резкие изменения с высотой и во времени. Вертикальные градиенты метеорологических величин в этом слое на один-два порядка выше, чем в других слоях; в то время как в свободной атмосфере абсолютная величина вертикального градиента температуры γ имеет порядок $1^\circ\text{C}/100$ м, в приземном слое модуль γ в десятки и сотни раз больше γ_a .

В табл. 9.1 и 9.2 приведены два примера распределения температуры воздуха по высоте по данным наблюдений. Согласно этим данным, температура воздуха в приземном слое растет с высотой ($\gamma < 0$) ночью и падает ($\gamma > 0$) днем. Наибольшие (по модулю) значения γ наблюдаются вблизи земной поверхности: здесь они

Таблица 9.1. Распределение температуры воздуха по высоте вблизи земной поверхности. Арысь, Казахская ССР, 27 августа 1945 г.

z м	2 ч		16 ч	
	T °C	γ °C/100 м	T °C	γ °C/100 м
0,05	18,2		37,8	
0,2	18,5	—200	37,3	330
0,5	18,8	—100	36,9	133
1,5	19,5	—80	36,3	60

Таблица 9.2. Распределение температуры воздуха по высоте в приземном слое и в нижней части пограничного слоя атмосферы. Обнинск, 20 июня 1968 г.

z м	3 ч (ясно)		16 ч (Си, 1 балл)	
	T °C	γ °C/100 м	T °C	γ °C/100 м
0,5	12,8	-260,0	28,0	80,0
1	14,1	-70,0	27,6	20,0
2	14,8	-65,0	27,4	15,0
4	16,1	-15,0	27,1	7,5
8	16,7	-4,7	26,8	1,8
25	17,5	-4,6	26,5	1,7
49	18,6	-5,4	26,1	1,0
97	21,2	-1,5	25,6	0,8
169	22,3	0,2	25,0	1,0
217	22,2	0,8	24,5	1,2
265	21,8	0,8	23,9	0,8
301	21,5		23,6	

превышают в десятки и сотни раз γ_a (как, например, в Арыси, где в условиях полупустыни под влиянием радиации температура воздуха вблизи земной поверхности резко увеличивается днем и понижается ночью). Однако в лесостепной зоне (Обнинск) вертикальные градиенты температуры в приземном слое также достаточно велики. С увеличением высоты γ (по модулю) уменьшается. Обратим внимание на то, что инверсия температуры распространяется ночью до высоты около 170 м.

Для выяснения наиболее существенных особенностей приземного слоя обратимся к уравнению притока тепла в турбулентной атмосфере. Для упрощения рассуждений предположим, что адвективное изменение температуры, вертикальные движения, радиационный (ϵ_{π}) и конденсационный (ϵ_{κ}) притоки тепла отсутствуют. В этом случае уравнение притока тепла принимает вид

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} k \frac{\partial \Theta}{\partial z}. \quad (5.1)$$

Если это уравнение проинтегрировать (предварительно умножив на $c_p \rho$) по высоте в пределах от нуля до произвольной высоты z , то получим

$$-c_p \rho k \frac{\partial \Theta}{\partial z} = Q_0 - c_p \int_0^z \rho \frac{\partial T}{\partial t} dz, \quad (5.2)$$

где $Q = -c_p \left(\rho k \frac{\partial \Theta}{\partial z} \right)_0$ — поток тепла, сформировавшийся на поверхности земли (называемый также ее теплоотдачей); $-c_p \rho k \times \frac{\partial \Theta}{\partial z} = Q$ — турбулентный поток тепла на высоте z .

Введем такую высоту $z=h$, чтобы модуль отношения второго слагаемого правой части (5.2) к первому равнялся некоторой малой величине ε , т. е.

$$c_p \left| \int_0^h \rho \frac{\partial T}{\partial t} dz \right| = c_p \rho \left| \frac{\partial T}{\partial t} \right| h = \varepsilon |Q_0|. \quad (5.3)$$

Здесь введены средние значения в слое от нуля до h . Обычно $|Q_0| = 40 \div 250$ Вт/м².

Если предположить, что за 12 ч температура воздуха в слое от нуля до h изменилась на 5 °С, то из соотношения (5.3) при $\varepsilon = 0,1$, $\bar{\rho} = 1,2$ кг/м³ и $Q_0 = 150$ Вт/м² получаем

$$h = \frac{0,1 \cdot 150 \cdot 12 \cdot 60 \cdot 60}{1006 \cdot 1,2 \cdot 5} \approx 108 \text{ м.}$$

Абсолютная величина интеграла в правой части (5.2) с увеличением z растет, поскольку производная от температуры по времени не только в приземном, но и пограничном слое на всех высотах имеет один и тот же знак. По этой причине при $z \leq h$ значение этого интеграла не больше $\varepsilon |Q_0|$. Пренебрегая этой малой по сравнению с Q_0 величиной, уравнение притока тепла в слое от нуля до h (с погрешностью порядка ε , т. е. около 10 %) можем записать в виде

$$-c_p \rho k \frac{\partial \theta}{\partial z} = Q_0. \quad (5.4)$$

Слой атмосферы, заключенный между земной поверхностью и высотой h , называется *приземным слоем атмосферы* (над водной поверхностью — *приводным слоем атмосферы*). Наиболее важная закономерность этого слоя выражена уравнением (5.4): турбулентный поток тепла в пределах приземного слоя практически (с точностью около 10 %) не изменяется с высотой — на любой высоте этот поток равен тому потоку (Q_0), который сформировался в непосредственной близости к земной поверхности. Это свойство приземного слоя носит название *квазистационарности*, поскольку реализуется оно с тем большей полнотой, чем меньше нестационарный, адвективный и конвективный члены в уравнении притока тепла.

Соотношение (5.3) показывает, что h в зависимости от Q_0 и $|\partial T/\partial t|$ колеблется в широких пределах — от десятков до сотен метров. Однако оценку h , получаемую по (5.3), следует в большинстве случаев считать заниженной: если не пренебрегать адвективным и конвективным притоками тепла, то в этом соотношении локальная производная должна быть заменена полной, которая меньше по абсолютной величине локальной производной.