температуру T на виртуальную T_v. В частности, вместо вертикальных градиентов температуры γ следует пользоваться вертикальными градиентами виртуальной температуры γ_v:

$$\gamma_v = (1 + 0{,}608s)\,\gamma - 0{,}608T\,(\partial s/\partial z).$$

Поскольку обычно $\partial s/\partial z < 0$, то $\gamma_v > \gamma$.

Если учитывается влияние влажности на плотность частицы, то сухоадиабатический градиент γ_a также должен быть заменен на градиент виртуальной температуры частицы:

$$\gamma_{vi} = -\frac{\partial T_{vi}}{\partial z} = (1 + 0{,}608s_i)\,\gamma_a - 0{,}608T_i\frac{\partial s_i}{\partial z}.$$

Критерии устойчивости атмосферы с учетом влияния влажности на плотность принимают вид: $\gamma_v < \gamma_{vi}$, $\gamma_v = \gamma_{vi}$ и $\gamma_v > \gamma_{vi}$.

13 Метод слоя

Метод частицы и установленный на его основе критерий устойчивости предполагают, что изолированная частица движется в неподвижной окружающей среде. В действительности же при развитии вертикальных движений отдельных частиц окружающая атмосфера не остается неподвижной. Как правило, перемещение частиц вверх вызывает компенсационное нисходящее движение окружающей среды. Влияние этих движений на условия устойчивости в атмосфере учитывается в *методе слоя*, теоретические основы которого заложены в 1938—1939 гг. Я. Бьеркнесом и С. Петтерсеном. Дальнейшее развитие этот метод получил в работах Н. С. Шишкина.

Выделим в атмосфере некоторый достаточно распространенный по горизонтали и вертикали объем (слой), в пределах которого наблюдается восходящее и нисходящее движение воздуха. Пусть восходящим движением со скоростью w' ($w' < 0$) охвачен вертикальный столб с поперечным сечением S', а нисходящее движение со скоростью w'' ($w'' < 0$) наблюдается в окружающем этот столб кольце, горизонтальное сечение которого S''. Теория метода слоя строится при следующих основных предположениях: а) все изменения величин внутри выделенного слоя происходят адиабатически; б) адвективные изменения величин отсутствуют; в) масса воздуха выше любого уровня не изменяется. Последнее означает, что потоки массы воздуха через сечения S' и S'' равны:

$$\rho' S' w' = -\rho'' S'' w''. \qquad (13.1)$$

Здесь ρ' и ρ'' — плотность воздуха в восходящем и нисходящем потоках соответственно. Поскольку $\rho' \approx \rho''$, то соотношение (13.1) принимает вид

$$S' w' = -S'' w''. \qquad (13.2)$$

Для вывода критерия устойчивости по методу слоя необходимо оценить разность ΔT температур восходящего (T') и нисходящего (T'') потоков ($\Delta T = T' - T''$) на некотором уровне z, которая характеризует силу плавучести восходящего потока. Очевидно, при $\Delta T > 0$ восходящий поток будет ускоряться (состояние неустойчивое), а при $\Delta T < 0$ — замедляться (состояние устойчивое). Чтобы оценить разность ΔT, проведем некоторые рассуждения.

Пусть за некоторый промежуток времени Δt на уровень z придут частицы восходящего потока с нижележащего уровня z_1, где температура воздуха T_1. За то же время в нисходящем потоке на уровень z придут частицы с некоторого вышележащего уровня z_2, где температура воздуха T_2. Поскольку подъем и опускание происходят адиабатически, то можем записать:

$$T' = T_1 - \gamma' (z - z_1), \tag{13.3}$$

$$T'' = T_2 + \gamma'' (z_2 - z). \tag{13.4}$$

Здесь γ' и γ'' — адиабатические градиенты в восходящем и нисходящем потоках соответственно.

С другой стороны,

$$z - z_1 = w' \Delta t, \tag{13.5}$$

$$z_2 - z = -w'' \Delta t. \tag{13.6}$$

С учетом соотношений (13.3)—(13.6) формула для разности ΔT температур на уровне z принимает вид

$$\Delta T = T_1 - T_2 - (\gamma' w' - \gamma'' w'') \Delta t. \tag{13.7}$$

В то же время, если γ — градиент стратификации внутри выделенного слоя, то

$$T_1 - T_2 = \gamma (z_2 - z_1) = \gamma (z_2 - z) + \gamma (z - z_1) = \gamma \Delta t (w' - w'').$$

Подставив это выражение в (13.7), получим

$$\Delta T = [\gamma (w' - w'') - (\gamma' w' - \gamma'' w'')] \Delta t. \tag{13.8}$$

Если еще воспользоваться соотношением (13.2), то последнюю формулу можно переписать в следующем окончательном виде:

$$\Delta T = \left[(\gamma - \gamma') + \frac{S'}{S''} (\gamma - \gamma'') \right] w' \Delta t. \tag{13.9}$$

Проанализируем несколько частных случаев.

1. Восходящий и нисходящий потоки не насыщены. В этом случае $\gamma' = \gamma'' = \gamma_а$ и формула (13.9) принимает вид

$$\Delta T = (\gamma - \gamma_а) \left(1 + \frac{S'}{S''}\right) w' \Delta t.$$

Знак разности ΔT в этом случае совпадает со знаком разности $\gamma - \gamma_а$: $\Delta T > 0$ при $\gamma > \gamma_а$, $\Delta T < 0$ при $\gamma < \gamma_а$. Таким образом, критерии устойчивости по методу частицы и методу слоя в этом случае дают один и тот же результат.

2. Восходящий и нисходящий потоки насыщены. В этом случае $\gamma' = \gamma'' = \gamma'_a$ и

$$\Delta T = (\gamma - \gamma'_a)\left(1 + \frac{S'}{S''}\right) w' \Delta t.$$

Здесь также критерии устойчивости по методу слоя и методу частицы совпадают: $\Delta T > 0$ при $\gamma > \gamma'_a$ и $\Delta T < 0$ при $\gamma < \gamma'_a$.

3. Восходящий поток насыщен, а нисходящий — не насыщен. В этом случае $\gamma' = \gamma'_a$, $\gamma'' = \gamma_a$, а формула (13.9) принимает вид

$$\Delta T = \left[(\gamma - \gamma'_a) + \frac{S'}{S''}(\gamma - \gamma_a)\right] w' \Delta t. \tag{13.10}$$

Этот случай представляет наибольший практический интерес. Он соответствует развитию кучевых облаков.

Из формулы (13.10) видно, что независимо от размеров потоков $\Delta T > 0$ при $\gamma > \gamma_a$ и $\Delta T < 0$ при $\gamma < \gamma'_a$. Таким образом, критерии устойчивости по методу слоя и частицы совпадают и в этом случае, если стратификация абсолютно неустойчивая ($\gamma > \gamma_a$) или абсолютно устойчивая ($\gamma < \gamma'_a$). Однако наиболее часто при развитии облаков наблюдается условно устойчивая стратификация, когда γ заключено между γ'_a и γ_a: $\gamma'_a < \gamma < \gamma_a$. Анализ формулы (13.10) показывает, что знак ΔT при такой стратификации зависит не только от γ, но и от отношеия S'/S''.

Введем понятие *критического градиента* $\gamma_{кр}$, при котором $\Delta T = 0$. Приравнивая первый множитель в правой части (13.10) нулю, найдем выражение для этого градиента:

$$\gamma_{кр} = \frac{\gamma'_a + \gamma_a (S'/S'')}{1 + S'/S''}. \tag{13.11}$$

Критический градиент близок к γ'_a при малых значениях S'/S'' и приближается к γ_a при больших значениях S'/S''.

Критерий устойчивости по методу слоя теперь можно сформулировать так: атмосфера неустойчива при $\gamma > \gamma_{кр}$ (поскольку в этом случае $\Delta T > 0$) и устойчива при $\gamma < \gamma_{кр}$ (поскольку $\Delta T < 0$). Эти же неравенства можно переписать в виде:

$$\frac{S'}{S''} < \frac{\gamma - \gamma'_a}{\gamma_a - \gamma} \quad \text{при} \quad \Delta T > 0, \tag{13.12}$$

$$\frac{S'}{S''} > \frac{\gamma - \gamma'_a}{\gamma_a - \gamma} \quad \text{при} \quad \Delta T < 0. \tag{13.13}$$

Таким образом, при условно устойчивой стратификации атмосфера неустойчива для частиц малого размера (для них отношение S'/S'' мало́ и удовлетворяет первому из этих неравенств) и устойчива для частиц большого размера (справедливо второе неравенство). В таких случаях говорят, что атмосфера *избирательно (селективно) неустойчива*.

Размеры частиц, для которых атмосфера неустойчива, зависят от γ. Если γ близко к γ'_a, то атмосфера неустойчива только по отношению к очень малым частицам (возмущениям) и только они будут ускоренно перемещаться по вертикали. В приложении к облакам это будет означать, что они занимают небольшую часть небесного свода и слабо развиты по вертикали.

Если γ близко к γ_a, то атмосфера неустойчива для более широкого диапазона размеров частиц. В этом случае кучевые облака занимают значительную часть небесного свода, причем наблюдаются как сильно, так и слабо развитые по вертикали облака.

Возможно и такое положение, когда в процессе развития облака неустойчивое состояние ($\Delta T > 0$ — сила плавучести положительная) сменяется устойчивым ($\Delta T < 0$). В самом деле, пока поперечное сечение облака невелико, выполняется неравенство (13.12). Но как только площадь сечения облака увеличится настолько, что будет выполняться неравенство (13.13), сила плавучести будет направлена вниз ($\Delta T < 0$).

Под влиянием отрицательной силы плавучести происходит смена восходящего движения в облаке на нисходящее. Нисходящее же движение в свою очередь способствует более быстрому выпадению осадков и увеличению их интенсивности.

Кроме рассмотренных в этой главе методов частицы и слоя, предложены другие методы анализа устойчивости атмосферы (в частности, основанные на понятии числа Ричардсона, на теории турбулентных струй и др.).