

кулярные потоки Q_M , обусловленные тепловым движением молекул. Эти потоки также пропорциональны градиенту удельного содержания:

$$Q_M = -\rho D \frac{\partial s}{\partial z}. \quad (2.4)$$

Коэффициент D носит название коэффициента молекулярной диффузии. Его единицей (так же, как и единицей k) служит $\text{м}^2/\text{с}$. Коэффициент диффузии зависит от температуры: для водяного пара при температурах 0 и 20 °С он равен соответственно $0,198 \cdot 10^{-4}$ и $0,283 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$.

Сравнение этих значений коэффициента диффузии со значениями k показывает, что в условиях атмосферы перенос примесей (водяного пара и др.) осуществляется главным образом посредством турбулентного перемешивания, а не молекулярной диффузии, так как турбулентный поток Q в десятки и сотни тысяч раз больше молекулярного ($Q/Q_M \approx 10^4 \div 10^6$). Только в вязком подслое молекулярный поток сравним с турбулентным. Таким образом, за исключением этого тонкого слоя, молекулярным потоком в атмосфере можно пренебречь по сравнению с турбулентным.

Турбулентные потоки примесей в горизонтальном направлении (например, вдоль осей x и y) записываются аналогично потоку по вертикали:

$$Q_x = -A' \frac{\partial s}{\partial x} = -\rho k' \frac{\partial s}{\partial x},$$

$$Q_y = -A' \frac{\partial s}{\partial y} = -\rho k' \frac{\partial s}{\partial y}.$$

Здесь A' и k' — коэффициенты турбулентного обмена и турбулентности в горизонтальном направлении. Оценка порядка величины коэффициентов A' и k' показала, что они в десятки и сотни тысяч раз больше коэффициентов A и k .

3 Конвективный и турбулентный потоки тепла

Основным источником тепла для Земли как планеты и ее составной части — атмосферы — является солнечная радиация, большая часть которой достигает земной поверхности (см. главу 6). Тропосфера получает тепло главным образом от земной поверхности.

В переносе тепла от земной поверхности к атмосфере и внутри атмосферы основную роль играют следующие процессы: а) конвективный и турбулентный теплообмен, б) излучение и поглощенные радиации, в) фазовые превращения воды (испарение и за-

мерзание воды, конденсация и сублимация водяного пара), γ) молекулярный теплообмен.

Воздух находится в непрерывном движении. Вместе с перемещающимися частицами (массами) воздуха переносится и тепло-содержание этих частиц. Назовем *потоком тепла* теплосодержание $c_p T$, переносимое частицами воздуха в единицу времени через единичную площадку в направлении нормали к ней. Поток тепла через такую площадку складывается из двух потоков: конвективного Q_k и турбулентного Q_t .

Конвективный поток тепла обусловлен упорядоченным перемещением воздуха со средней скоростью s :

$$Q_k = c_p \rho T s, \quad (3.1)$$

так как за единицу времени через площадку 1 м^2 проходит масса воздуха, равная ρs . Поток тепла через произвольно ориентированную единичную площадку равен

$$Q_{kn} = c_p \rho T s_n, \quad (3.2)$$

где s_n — проекция вектора средней скорости s на нормаль n к площадке. Единица Q_k — Дж/(с · м²).

Так как горизонтальная составляющая средней скорости ветра в сотни раз больше вертикальной составляющей, то конвективный поток Q_k представляет собой перенос тепла преимущественно по горизонтали. Горизонтальная составляющая Q_k называется *адвективным* потоком тепла; собственно конвективным потоком чаще всего называют лишь вертикальную составляющую потока.

Турбулентный поток тепла Q_t обусловлен пульсациями скорости.

Турбулентные потоки таких субстанций, как водяной пар, примеси, озон и др., пропорциональны градиенту их удельного содержания (см. п. 2). Общими условиями, которым должна удовлетворять переносимая в процессе турбулентного перемешивания субстанция, являются: 1) *постоянство* (неуничтожаемость) ее в элементарной массе воздуха (турбулентном моле), пока она движется, не смешиваясь с окружающим воздухом; 2) *сохранение* ее количества при смешении двух масс воздуха; 3) *пассивность* — отсутствие обратного влияния субстанции на движение турбулентных частиц.

Теплосодержание воздуха $c_p T$ первому и, вообще говоря, третьему условиям не удовлетворяет. При вертикальных движениях температура частиц изменяется. Однако при отсутствии притока тепла (лучистого или вследствие конденсации водяного пара) сохраняет постоянное значение потенциальная температура частицы Θ . В результате роль неуничтожаемой субстанции при переносе тепла играет *потенциальное теплосодержание* $c_p \Theta$. Формула для

турбулентного потока тепла Q_T вдоль вертикали по этой причине имеет вид

$$Q_T = -c_p A \frac{\partial \theta}{\partial z} = -c_p \rho k \frac{\partial \theta}{\partial z} = -c_p \rho k \left(\frac{\partial T}{\partial z} + \gamma_a \right). \quad (3.3)$$

Таким образом, поток Q_T пропорционален *градиенту потенциальной* (а не кинетической) *температуры* и в этом смысле существенно (принципиально) отличается от молекулярного потока тепла, который пропорционален $\partial T/\partial z$, и турбулентных потоков других субстанций.

Коэффициент A в формуле (3.3), нередко называемый *коэффициентом турбулентного теплообмена* (в то время как $c_p A$ и k — соответственно *коэффициенты турбулентной теплопроводности и температуропроводности*), вообще говоря, отличается от коэффициентов турбулентного обмена для других субстанций (водяного пара, количества движения), но указать, каково количественное различие между ними, в настоящее время затруднительно.

Турбулентный поток тепла Q_T отрицателен ($Q_T < 0$), т. е. направлен сверху вниз, при сухоустойчивой стратификации ($\gamma < \gamma_a$), равен нулю ($Q_T = 0$) при сухобезразличной ($\gamma = \gamma_a$) и положительна ($Q_T > 0$) при сухонеустойчивой ($\gamma > \gamma_a$) стратификации атмосферы.

Турбулентный поток тепла в каком-либо горизонтальном направлении l прямо пропорционален изменению потенциальной температуры в этом направлении:

$$Q_T^{(l)} = -c_p A' \frac{\partial \theta}{\partial l}. \quad (3.4)$$

Здесь A' — коэффициент горизонтального турбулентного теплообмена.

Результирующий горизонтальный турбулентный поток тепла совпадает по направлению с горизонтальным градиентом потенциальной температуры $\Gamma_\theta = -\partial \theta / \partial n$:

$$Q_T^{(n)} = -c_p A' \frac{\partial \theta}{\partial n}, \quad (3.5)$$

где n — направление нормали к изолиниям $\theta = \text{const}$ (положительное направление в сторону уменьшения θ).

Так как давление по горизонтали изменяется медленно, то в формуле для горизонтального турбулентного потока тепла потенциальную температуру можно заменить кинетической температурой, т. е. считать $\partial \theta / \partial n \approx \partial T / \partial n$. С этой точки зрения горизонтальный турбулентный поток тепла не имеет принципиальных отличий от потоков других субстанций (водяного пара, примесей и др.).