

Динамика роста мощности грозовой облачности при наличии испарения с подстилающей поверхности

Г.С. Голицын¹⁾, Б.П. Руткевич²⁾, П.Б.
Руткевич³⁾

- 1) *Институт физики атмосферы РАН, 119017, Москва,
Пыжевский пер., 3, E-mail: mail_adm@ifaran.ru;*
- 2) *Радиоастрономический Институт НАН Украины, ул.
Краснознаменная 4, Харьков 61002, Украина*
- 3) *Институт космических исследований РАН, Москва
email: peter@d902.iki.rssi.ru*

- Термодинамика влажного воздуха
- Модель роста толщины облака
- Конвекция на верхней границе облака

Термодинамика влажного воздуха

- Термодинамические параметры: P, ρ, T, q, E .

- $P = \rho RT, \quad q = R/R_w E/P, \quad dE = EL/R_w T^2 dT$

- количество тепла dQ элемента влажного воздуха расходуется на:

- увеличение внутренней энергии $dU = C_v dT$,

- работу, производимую над газом PdV ,

- увеличение количества пара Ldq (L – скрытая теплота конденсации)

- $dQ = TdS = C_v dT + PdV + Ldq$

Система уравнений, позволяющая определить вертикальную зависимость температуры и влажности.

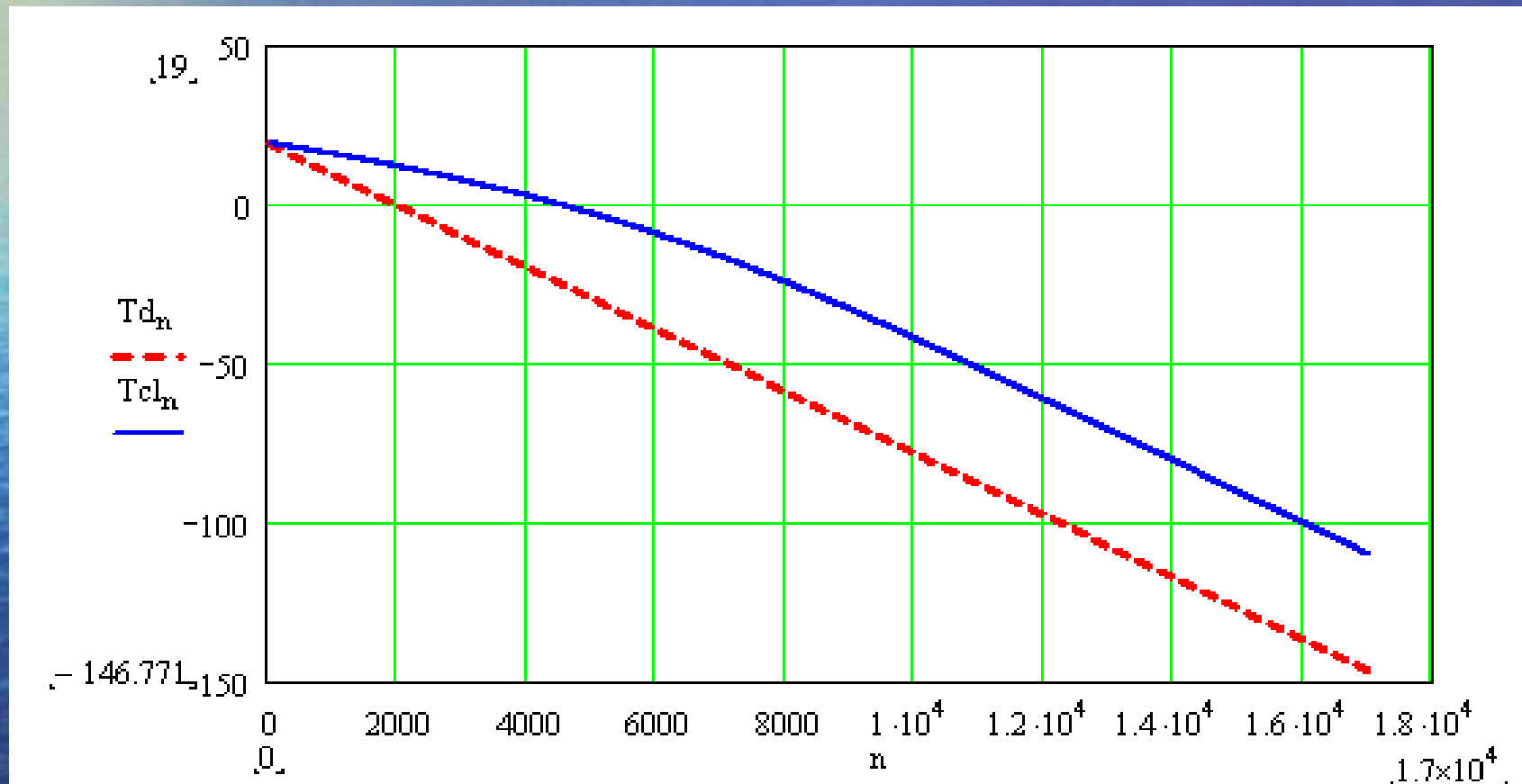
После определения этих термодинамических параметров остальные определяются интегрированием.

$$\frac{dT}{dz} = -\frac{g}{c_p} \left(\frac{1}{\frac{L^2 q(T)}{c_p R_w T^2} - \frac{Lq(T)}{c_p T} + 1} \right), \quad \gamma_q = \frac{dq}{qdz} = -\frac{1}{T} \frac{g}{c_p} \left(\frac{\frac{L}{R_w T} - 1}{\frac{L^2 q}{c_p R_w T^2} - \frac{Lq}{c_p T} + 1} \right)$$

Неявная зависимость температуры в облаке от высоты

$$H(T) = -\frac{T_0 q_0 L e^{\frac{L}{R_w} \frac{(T-T_0)}{T_0 T}}}{g c_p T} + \frac{q_0 L}{g c_p} + \frac{c_p}{g} (T_0 - T)$$

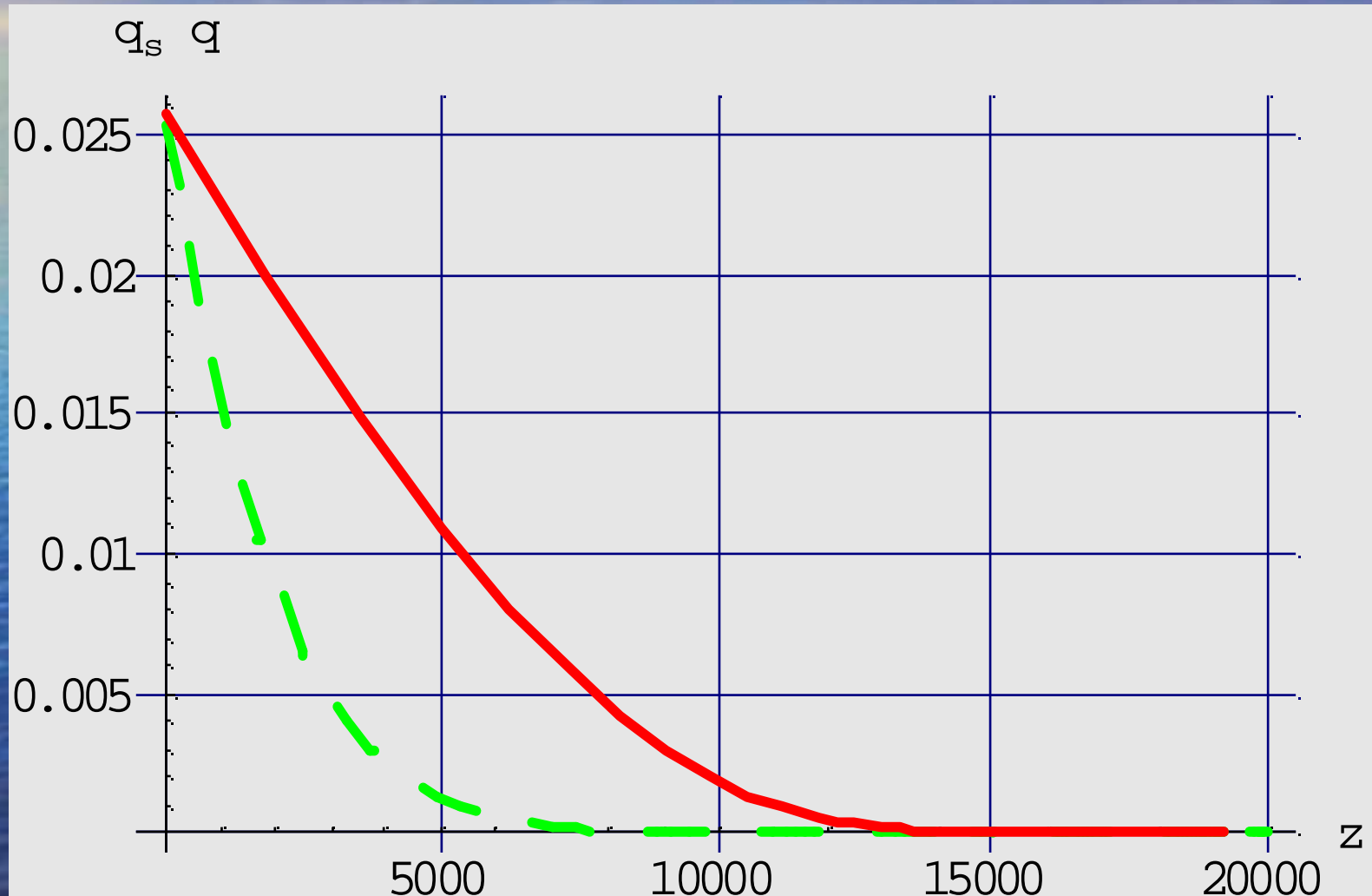
Вертикальные профили температуры в сухой и влажной атмосфере



Скорость звука c_q в облаке как функция термодинамических параметров

$$\frac{dP}{d\rho} = c_q^2 = RT \frac{c_p \left(\frac{L^2 q}{c_p R_w T^2} - \frac{Lq}{c_p T} + 1 \right)}{c_v \left(\frac{L^2 q}{c_v R_w T^2} - \frac{Lq}{c_v T} + 1 \right)}$$

Распределение плотности пара по высоте в насыщенном и ненасыщенном (сухом) воздухе



Физическая модель образования облака на морем за счет испарения с поверхности

Определим скорость роста толщины облака, используя уравнение переноса

$$\frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial j}{\partial z} = 0 \quad j = -D \frac{\partial q}{\partial z}.$$

Если коэффициент диссипации $D(z)$ зависит от координат, то уравнение принимает вид:

$$\frac{\partial q}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} D(z) \frac{\partial q}{\partial z}.$$

Учитывая конденсированную влагу в облаке, включаем в уравнение распределение капель $\alpha(z)$:

$$q'(z) = q(z) + \alpha(z)$$

Выражение для потока можно записать в виде:

$$j(z) = k(z) (n(z) - q'(z)), \quad k = \frac{D}{\Delta z}$$

$n(z)$ - распределение пара в сухом воздухе над облаком, а $q(z)$ - распределение пара в насыщенном влажном воздухе в самом облаке.

Воспользуемся одним из способов параметризации капельной фазы облака

$$\alpha(z) = q_0 \left(1 - \frac{z}{H_0} - e^{-\frac{z}{B}} \right)$$

$$\frac{1}{B} = \frac{L}{R_w T_0^2} - \frac{g}{RT_0} \quad B = 2262 \text{ m}$$

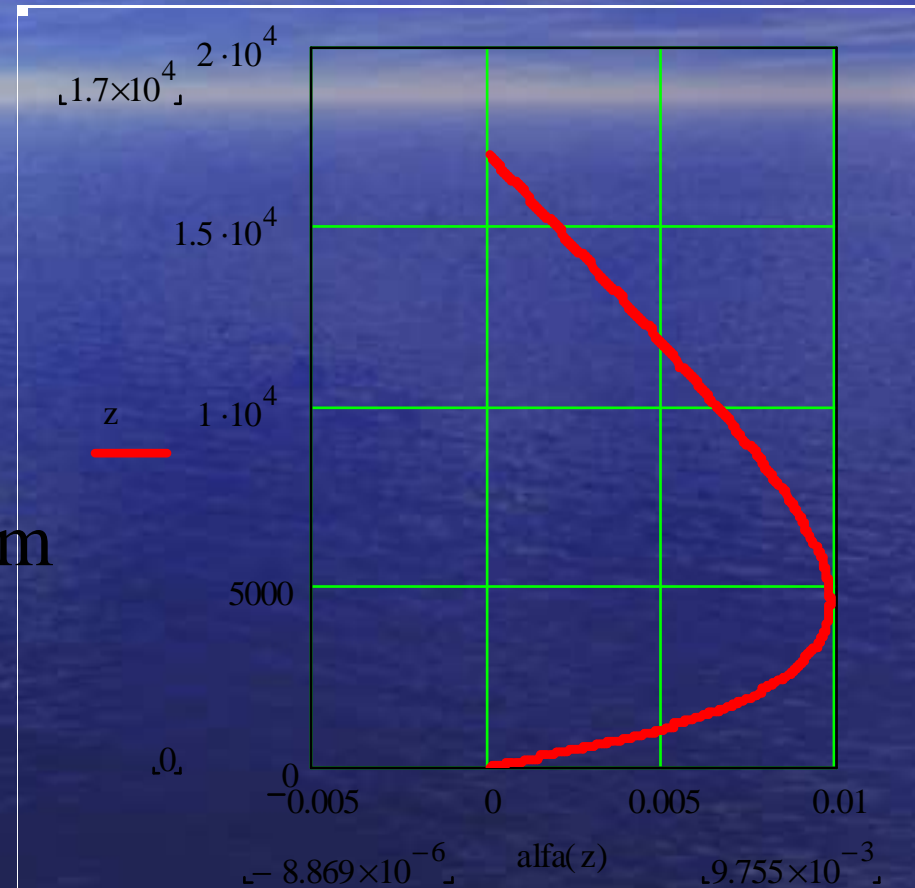
$$H_0 = 17000 \text{ m}$$

$$T_0 = 292^{\circ} \text{ K}, \quad L = 2.256 \cdot 10^6$$

$$P_a = 1.013 \cdot 10^5 \text{ Pa}, \quad \rho_a = 1.177 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}, \quad T_c = 19^{\circ} \text{ C}.$$

$$R_w = 461.5, \quad R = 287$$

$$q_0 = 0.016 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}, \quad E_0 = 2.196 \cdot 10^3 \text{ Pa}$$



Уравнение переноса принимает вид:

$$\int_a^H \frac{\partial q'}{\partial t} dz = \int_a^H \frac{\partial}{\partial z} D(z) \frac{\partial q'}{\partial z} dz.$$

$$q'(H) \frac{\partial H}{\partial t} = -j(z) \Big|_{z=H} = -k(H) (n(H) - q'(H)),$$

В результате интегрирования получаем время роста облака, как функцию высоты облака

$$t = \int_a^H \frac{q'(H) dH}{k(H) \cdot (q'(H) - n(H))}.$$

Конвекция на верхней границе облака

$$Ra = g \cdot \gamma \cdot h^4 / \nu_T^2 \quad \beta = 300^{-1} \text{ K}^{-1} \quad Ra = 10^3$$
$$\gamma = \beta \cdot \Delta T / h \quad g = 9.8 \text{ m/s}^2 \quad \nu_T = \chi_T = 1000 \text{ m}^2/\text{s}$$

Толщина верхней (конвективной) границы (области) облака оценивается как

$$h = \sqrt[3]{\frac{Ra \cdot \nu_T^2}{g \cdot \beta \cdot \Delta T}}$$

Параметр $k(z)$, входящий в соотношение для времени роста облака, оценивается как

$$k(z) = v_T / h(z)$$

Таким образом, получаем

$$k(z) = \sqrt[3]{\frac{g \cdot \beta \cdot \Delta T(z) \cdot v_T}{Ra}},$$

где

$$\Delta T(z) = T_n(z) - T_q(z).$$

Зависимость $k(z)$ с учётом распределений температуры влажного и сухого воздуха имеет вид:

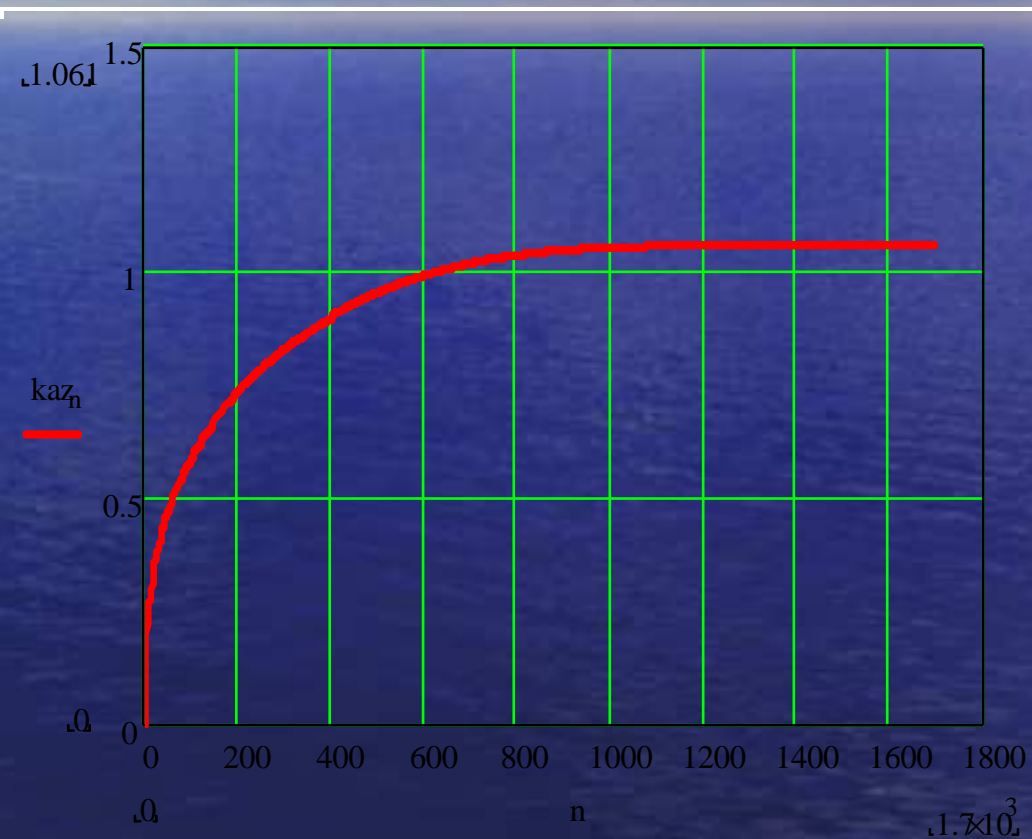
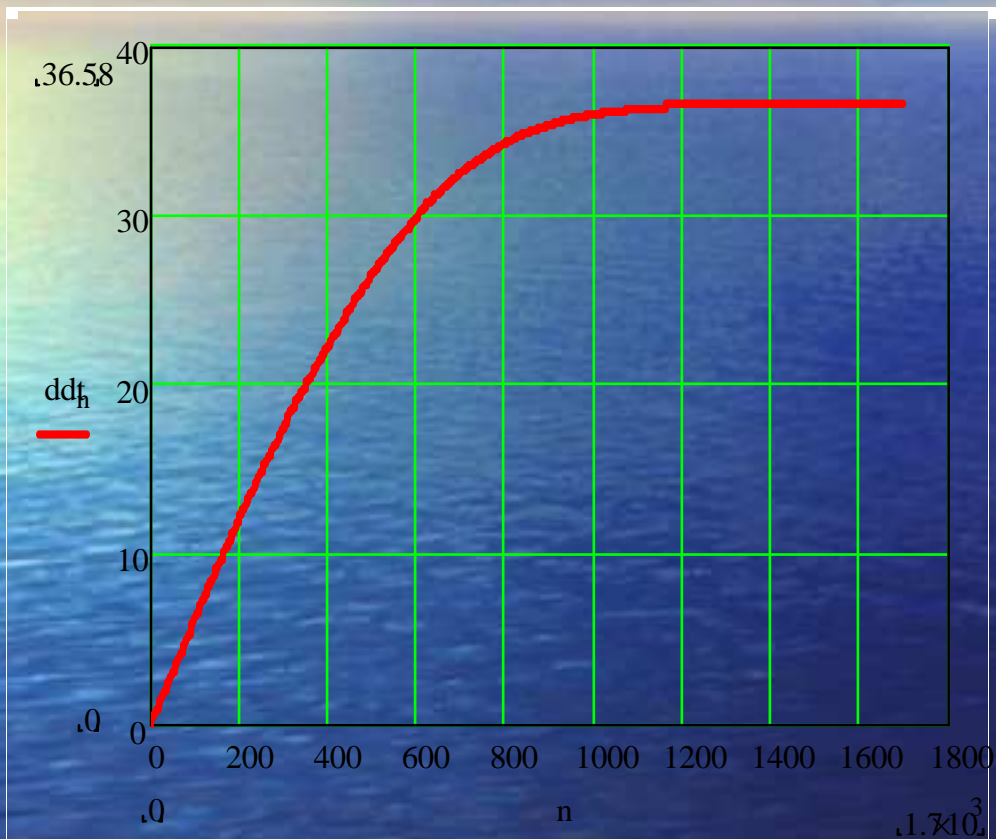


График времени развития облака от высоты облака, сплошная кривая для случая отсутствия капель в облаке, пунктирная кривая с учётом процесса конденсации в облаке

