



Fizyka Pogody i Klimatu

Stabilność i kondensacja

Szymon Malinowski, Krzysztof Markowicz. Hanna Pawlowska
Instytut Geofizyki
Uniwersytet Warszawski

Atmosfera jest mieszaniną suchego powietrza i wody; proporcje są zmienne.

Zawartość wody nigdy nie przekracza paru procent masy suchego powietrza.

Będziemy rozważać układ składający się z suchego powietrza i wody, przy czym woda może występować także w co najmniej jednej ze skondensowanych faz.

Para wodna będąca w równowadze z wodą i znajdująca się w powietrzu zachowuje się tak jakby była wyizolowana.

W stanie lotnym parę wodną można uważać za gaz doskonały.

Równanie stanu dla pary wodnej: $e = \rho_v R_v T$, $\rho_v = \frac{1}{v_v}$

e - ciśnienie pary wodnej, ρ_v - gęstość pary wodnej, R_v - stała gazowa dla pary wodnej

$$R_v = \frac{R^*}{M_v} = \frac{M_d \cdot R}{M_v} = \frac{R}{\varepsilon}$$

$$M_d = 28.96 \text{ g/mol}, \quad M_v = 18 \text{ g/mol}, \quad \varepsilon = \frac{M_v}{M_d} = 0.622$$

$$R = R^* / M$$

R^* uniwersalna stała gazowa

M masa molowa

R indywidualna stała gazowa

$$R^* = 8.314 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}, \quad R = 287 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}, \quad R_v = 461.5 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$$

$$e = \rho_v \frac{R}{\varepsilon} T$$

- Ciśnienie pary e – cząstkowe ciśnienie pary wodnej [mb, hPa]

- Gęstość pary ρ_v – wilgotność bezwzględna (*absolute humidity*)[kg/m^3]

- Wilgotność właściwa, q , (*specific humidity*) masa pary wodnej w jednostce masy powietrza wilgotnego. [q]= $kg/kg, g/kg$

$$q = \frac{m_v}{m} = \frac{\rho_v}{\rho} = \frac{\rho_v}{\rho_d + \rho_v} = \varepsilon \frac{e}{p - e + \varepsilon \cdot e} = \varepsilon \frac{e}{p - (1 - \varepsilon)e} \approx \varepsilon \frac{e}{p}$$

$$\rho_v = \frac{e}{R_v T} = \varepsilon \frac{e}{RT}$$

$$\rho_d = \frac{p_d}{RT} = \frac{p - e}{RT}$$

- Stosunek zmieszania r (*mixing ratio*) – stosunek masy pary wodnej w jednostce masy suchego powietrza. [r]= $kg/kg, g/kg$

$$r = \frac{m_v}{m_d} = \frac{\rho_v}{\rho_d} = \frac{\varepsilon \cdot e}{p - e} \approx \varepsilon \frac{e}{p} = q$$

$$r = \frac{m_v}{m_d} = \frac{m_v}{m - m_v} = \frac{q}{1 - q} \cong q$$

Wilgotność względna (*relative humidity*) f , stosunek aktualnego ciśnienia pary do ciśnienia pary w stanie nasycenia (lub w przybliżeniu stosunek aktualnego stosunku zmieszania pary do stosunku zmieszania w stanie nasycenia w tej samej temperaturze i ciśnieniu).

$$f = \frac{e}{e_s} \cong \frac{r}{r_s(p, T)}$$

$$r = \frac{\varepsilon \cdot e}{p - e} = \frac{\varepsilon \cdot f e_s}{p - f e_s} = \frac{\varepsilon \cdot f \frac{p r_s}{\varepsilon + r_s}}{p - f \frac{p r_s}{\varepsilon + r_s}} = \frac{\varepsilon f r_s}{\varepsilon + r_s - f r_s} = \frac{f r_s}{1 + \frac{r_s}{\varepsilon} (1 - f)} \cong f r_s$$

$f = \frac{e}{e_s} \quad r = \frac{\varepsilon \cdot e}{p - e} \Rightarrow e = \frac{p r}{\varepsilon + r}$

Weźmy próbkę powietrza o objętości V , mającą całkowite ciśnienie p . Zgodnie z prawem Gibbsa dla gazu doskonałego ciśnienie p jest sumą ciśnień cząstkowych mieszaniny, czyli suchego powietrza (p_d) i pary wodnej (e).

$$p = p_d + e$$

$$p_d = \rho_d RT = \rho_d \frac{R^*}{M_d} T =$$

$$\frac{m_d}{V} \frac{R^*}{M_d} T = \frac{m_d}{M_d} \frac{R^* T}{V}$$

$$e = \rho_v R_v T = \rho_v \frac{R^*}{M_v} T =$$

$$\frac{m_v}{V} \frac{R^*}{M_v} T = \frac{m_v}{M_v} \frac{R^* T}{V}$$

$$R = \frac{R^*}{M_d} \quad M_d \text{ masa molowa suchego powietrza}$$

$$R_v = \frac{R^*}{M_v} \quad M_v \text{ masa molowa pary wodnej}$$

m_d masa suchego powietrza w objętości V

m_v masa pary wodnej w objętości V

$$p = p_d + e =$$

$$= \frac{R^* T}{V} \left[\frac{m_d}{M_d} + \frac{m_v}{M_v} \right] = \rho R^* T \left[\frac{m_d}{M_d} + \frac{m_v}{M_v} \right] \frac{1}{m_d + m_v}$$

$$\rho = \frac{m_d + m_v}{V} \quad \text{gęstość wilgotnego powietrza}$$

$$p = p_d + e = \rho R^* T \left[\frac{m_d}{M_d} + \frac{m_v}{M_v} \right] \frac{1}{m_d + m_v} = \rho T \frac{R^*}{\bar{M}}$$

$$\bar{M} = \frac{n_d M_d + n_v M_v}{n_d + n_v} = \frac{m_d + m_v}{\frac{m_d}{M_d} + \frac{m_v}{M_v}} = \frac{m_d + r m_d}{\frac{m_d}{M_d} + \frac{r m_d}{\varepsilon M_d}} = M_d \left[\frac{1+r}{1+r/\varepsilon} \right]$$

Proporcje zmieszania pary wodnej i powietrza (r) zmieniają się w atmosferze, zatem indywidualna stała gazowa opisująca tę mieszaninę (R_m) będzie się zmieniać

$$R_m = \frac{R^*}{\bar{M}} = \frac{R^*}{M_d} \left[\frac{1+r/\varepsilon}{1+r} \right] = R \left[\frac{1+r/\varepsilon}{1+r} \right]$$

$$R_m = R \left[1 + q \left(\frac{1}{\varepsilon} - 1 \right) \right] = R(1 + 0,608q)$$

$$\varepsilon = \frac{M_v}{M_d} \Rightarrow M_v = \varepsilon M_d$$

$$r = \frac{m_v}{m_d} \Rightarrow m_v = r m_d$$

$$R = \frac{R^*}{M_d}$$

$$r = \frac{q}{1-q}$$

$$\frac{1+r/\varepsilon}{1+r} = \frac{1 + \frac{1}{\varepsilon} \frac{q}{1-q}}{1 + \frac{q}{1-q}} =$$

$$\frac{1-q + \frac{q}{\varepsilon}}{1-q+q} =$$

$$1 + q \left(\frac{1}{\varepsilon} - 1 \right)$$

$$\varepsilon = 0.622$$

$$p = \rho RT \left[\frac{1 + r/\varepsilon}{1 + r} \right]$$

$$p = \rho RT \left[1 + q \left(\frac{1}{\varepsilon} - 1 \right) \right]$$

$$\begin{aligned} T_v &= T \left[\frac{1 + r/\varepsilon}{1 + r} \right] \\ &\approx T \left(1 + \frac{r}{\varepsilon} \right) \cdot (1 - r) \\ &\approx T \left[1 + r \left(\frac{1}{\varepsilon} - 1 \right) \right] \end{aligned}$$

$$T_v = T \left[1 + q \left(\frac{1}{\varepsilon} - 1 \right) \right]$$

$$T_v = T(1 + 0.608q) \cong T(1 + 0.608r)$$

$$p = \rho RT_v$$

p ciśnienie wilgotnego powietrza ; $p = p_d + e$

R stała gazowa dla suchego powietrza

ρ gęstość wilgotnego powietrza

Temperatura wirtualna (T_v) jest to temperatura suchego powietrza, które miałyby taką samą gęstość jak powietrze wilgotne przy danym ciśnieniu

Równanie stanu gazu dla suchego powietrza może być zastosowane do powietrza wilgotnego, jeśli temperaturę zastąpimy przez *temperaturę wirtualną*

$$pv = RT_v$$

Różnica pomiędzy temperaturą T i temperaturą wirtualną jest mała i często może być zaniedbana.

Alternatywną metodą jest opis powietrza przy użyciu równania stanu dla powietrza wilgotnego (stała gazowa R_m)

$$pv = R_m T$$

$$R_m = R[1 + 0,698q] \cong R[1 + 0.608r]$$

The **potential temperature**, Θ is the temperature that a fluid would have if moved adiabatically to some reference pressure (often 1000 hPa, close to the pressure at the earth's surface). In adiabatic flow the potential temperature of a fluid parcel is conserved, by definition:

$$\frac{D\theta}{Dt} = 0$$

For an ideal gas:


$$d\eta = c_p d \ln T - R d \ln p$$

$$c_p d \ln \theta = c_p d \ln T - R d \ln p$$

Consequently:

$$\theta = T \left(\frac{p_R}{p} \right)^{\kappa}$$

reference pressure $\kappa = R/c_p$



Gradient adiabacyjny dla gazu doskonałego [edytuj | edytuj kod]

Dla przemiany adiabaticznej dla gazu doskonałego zachodzi związek:

$$PdV = -VdP/\gamma.$$

Z pierwszej zasady termodynamiki wynika:

$$mc_v dT - Vdp/\gamma = 0,$$

$$\alpha = V/m,$$

$$\gamma = c_p/c_v.$$

Z powyższych zależności można uzyskać:

$$c_p dT - \alpha dP = 0,$$

gdzie:

c_p - ciepło właściwe przy stałym ciśnieniu,

α - objętość właściwa.

Stosując powyższe zależności do równowagi hydrostatycznej gazu w polu grawitacyjnym^[1]:

$$dP = -\rho g dz,$$

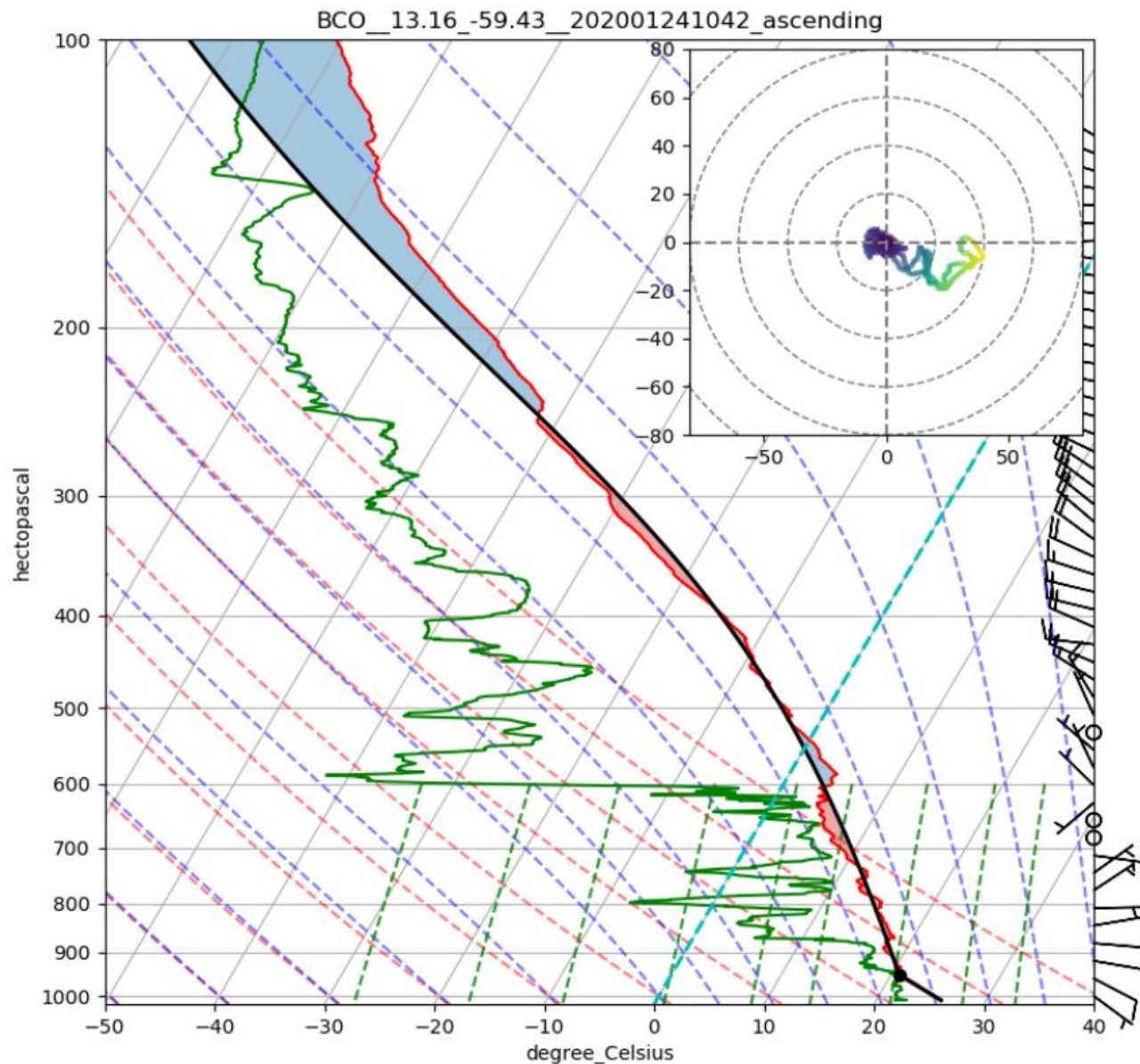
gdzie:

g - przyspieszenie grawitacyjne, dla Ziemi przyspieszenie ziemskie,

ρ - gęstość.

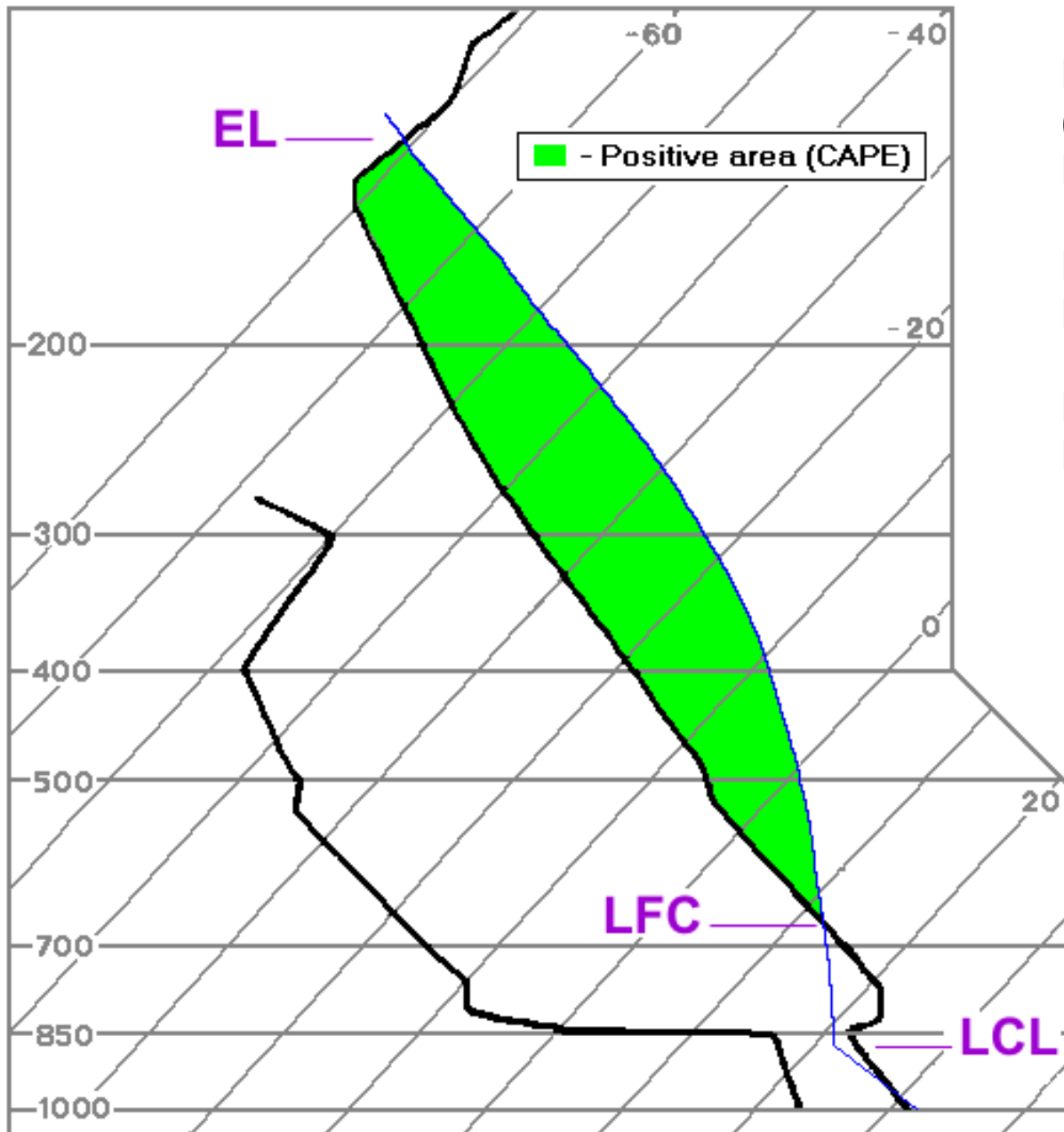
Powyższa zmiana wyrażona jako zależność zmiany temperatury od wysokości w gazie^[2]:

$$\Gamma_d = -\frac{dT}{dz} = \frac{g}{c_p}.$$



Przykładowy wykres zależności elementów meteorologicznych takich jak: temperatura punktu rosy, temperatura, wilgotność, ciśnienie, kierunek i siła wiatru w zależności od temperatury [$^{\circ}$ C] i ciśnienia [hPa] z danych zebranych 24.01.2020 o 10:42 w BCA.



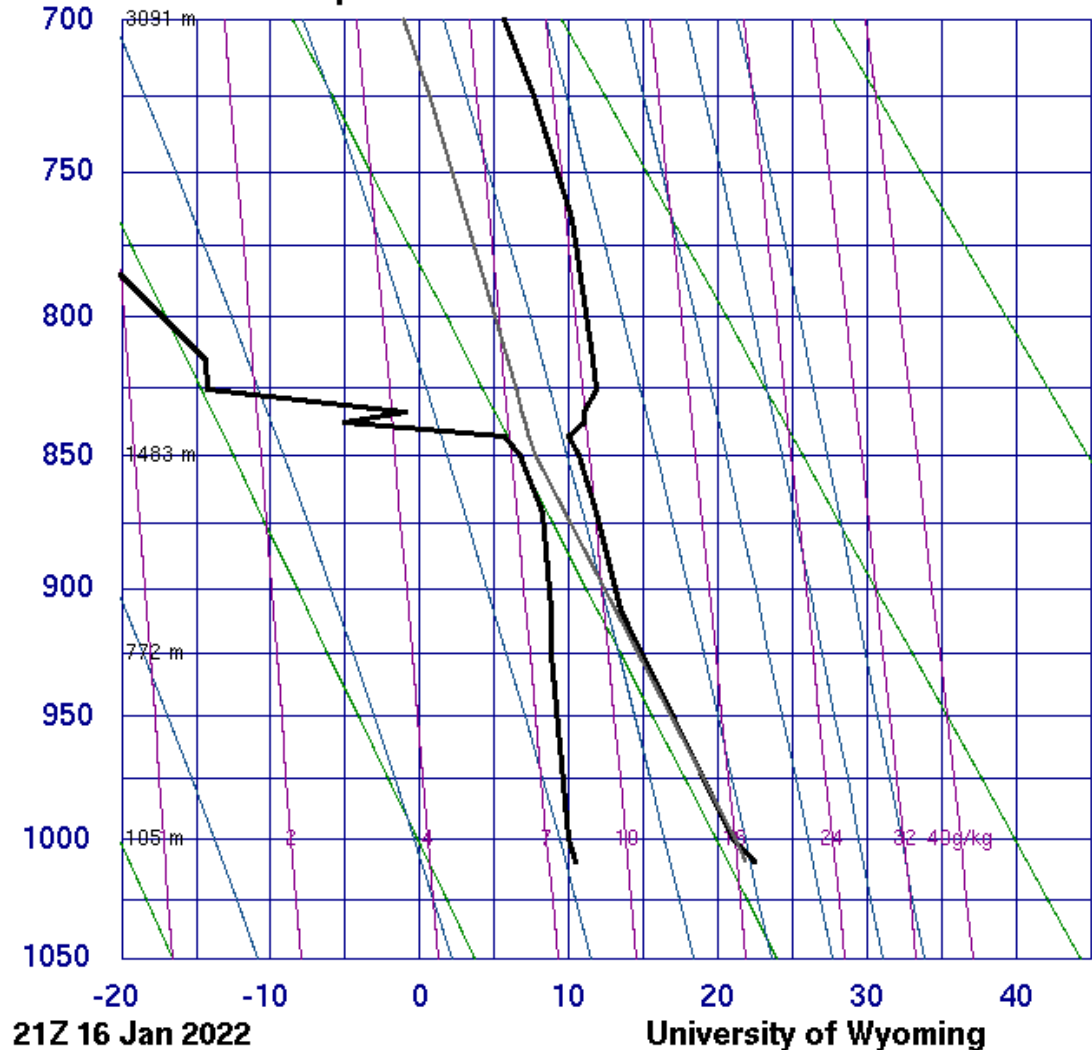


LCL – Lifting Condensation Level –
(wymuszony) Poziom Kondensacji -
PK

LFC – Level of Free Convection –
Poziom Konwekcji Swobodnej

EL – Equilibrium Level – Poziom
Równowagi

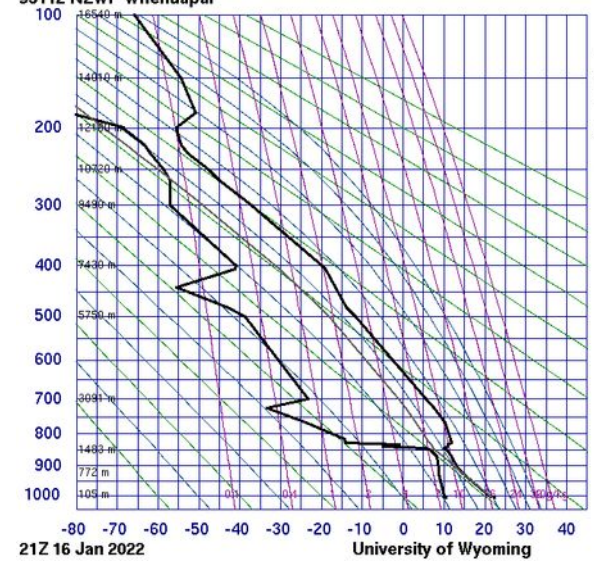
93112 NZWP Whenuapai



SLAT	-36.78
SLON	174.63
SELV	27.00
SHOW	5.44
LIFT	6.51
LFTV	6.27
SWET	247.1
KINX	0.00
CTOT	18.40
VTOT	22.30
TOTL	40.70
CAPE	0.00
CAPV	0.00
CINS	0.00
CINV	0.00
EQLV	-9999
EQTV	-9999
LFCT	-9999
LFCV	-9999
BRCH	0.00
BRCV	0.00
LCLT	280.7
LCLP	847.7
LCLE	316.8
MLTH	294.2
MLMR	7.77
THCK	5645.
PWAT	16.28

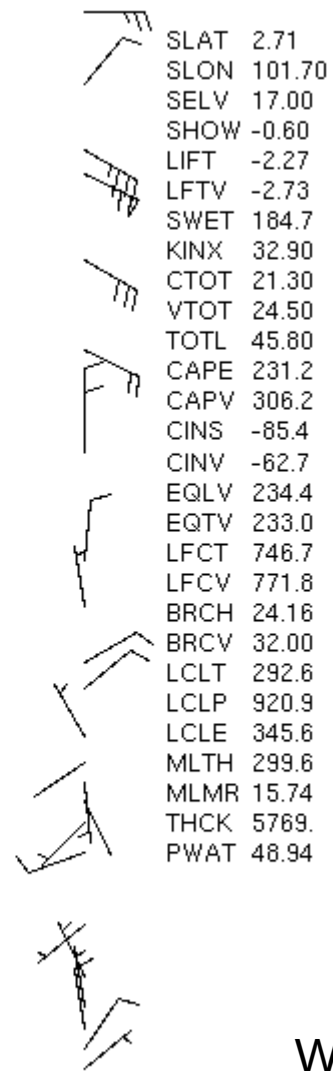
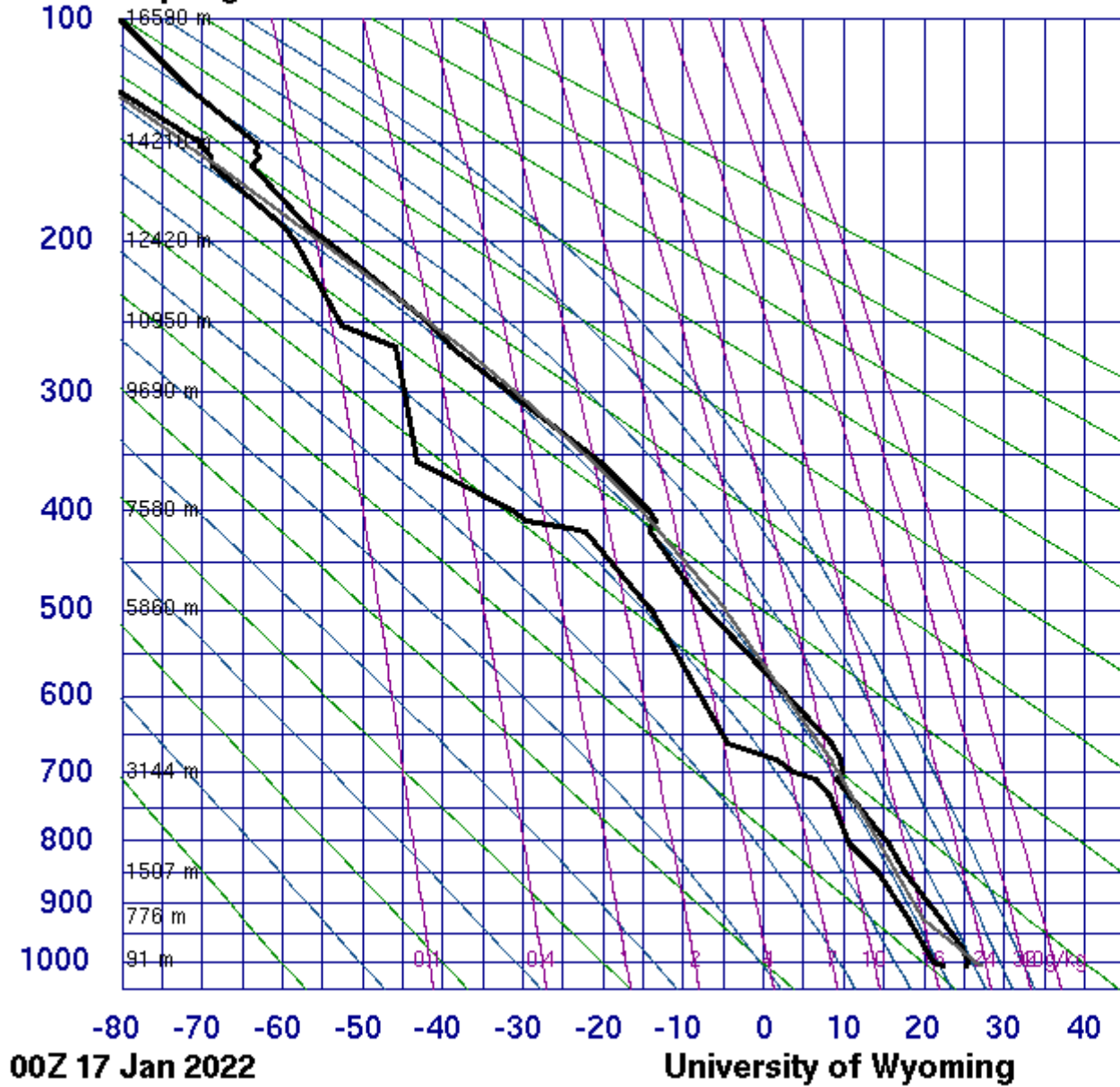
Płytki konwekcja

93112 NZWP Whenuapai



SLAT	-36.78
SLON	174.63
SELV	27.00
SHOW	5.44
LIFT	6.51
LFTV	6.27
SWET	247.1
KINX	0.00
CTOT	18.40
VTOT	22.30
TOTL	40.70
CAPE	0.00
CAPV	0.00
CINS	0.00
CINV	0.00
EQLV	-9999
EQTV	-9999
LFCT	-9999
LFCV	-9999
BRCH	0.00
BRCV	0.00
LCLT	280.7
LCLP	847.7
LCLE	316.8
MLTH	294.2
MLMR	7.77
THCK	5645.
PWAT	16.28

48650 Sepang



Warunki do
głębokiej
konwekcji

