



*SYMULACJE NUMERYCZNE  
KONWEKCYI  
na ZIEMI i MARSIE*

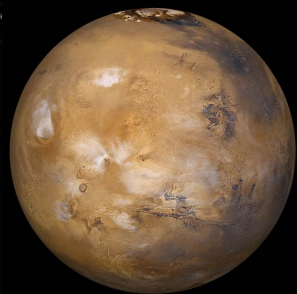
*prof.dr.hab.inż. Zbigniew Sorbjan*

## Tezy:

(1) Mars jest pierwszą planetą, na której dokonano pomiarów w meteorologicznych. Dlatego badania atmosfery na Marsie mają niezwykłą wagę. Mogą one bowiem być wykorzystane do testowania modeli i teorii powstania Ziemi.

(2) Należy oczekiwać, że prawa dynamiki atmosfery sformułowane dla warunków w ziemskiej powinny również obowiązywać w atmosferach innych planet.

(3) Należy się również spodziewać, że na tych planetach powinny występować struktury konwekcyjne podobne do tych, które są obserwowane na Ziemi.



Mars

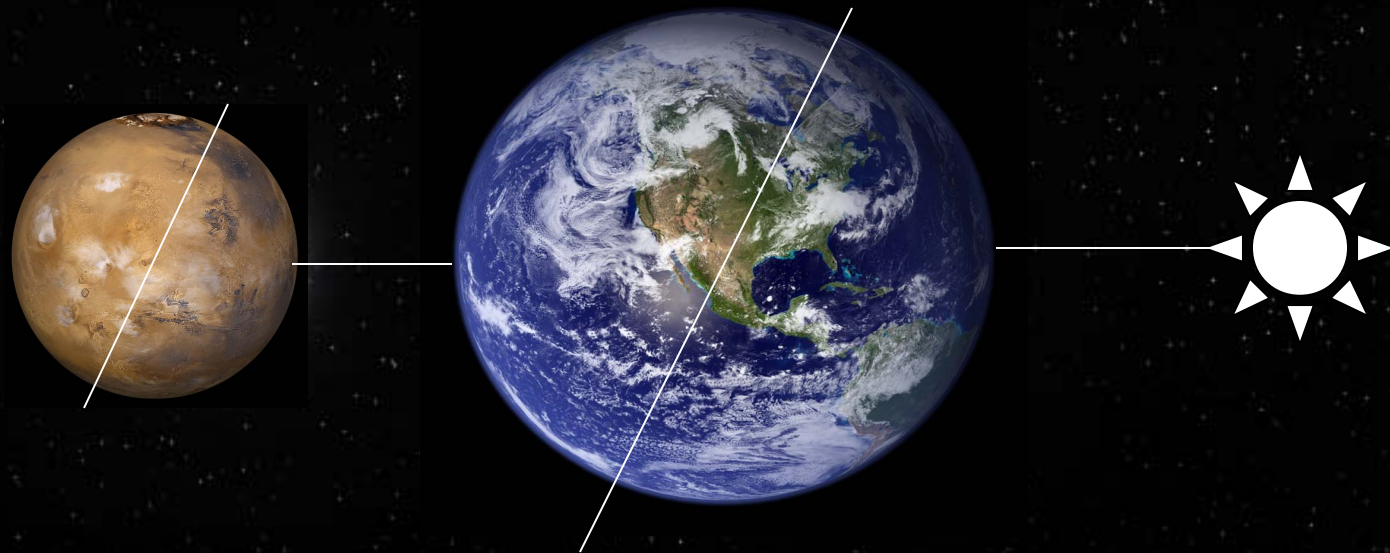


Ziemia



Słońce





Pytanie:

Czym różnią się warunki na Marsie i Ziemi?

## Basic characteristics of Mars and the Earth

Parameter	Earth	Mars
Orbital radius ( $10^6$ km)	150	228
Year length (days/sols)	365.24	668.6
Orbital inclination ( $^\circ$ )	23.5	25.2
Planetary radius (km)	6378	3394
Solar day/sol (s)	86,400	88,775
Surface gravity $g$ ( $\text{m s}^{-2}$ )	9.81	3.72
Surface pressure (hPa)	1013	6 - 8
Surface air density ( $\text{kg m}^{-3}$ )	1.225	0.015
Gas constant $R$ ( $\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$ )	287	188
Specific heat $c_p$ ( $\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$ )	1004	730
Dry-adiabatic gradient $\gamma_a$ ( $\text{K km}^{-1}$ )	9.8	45
Viscosity $\nu$ ( $10^{-3} \text{m}^2 \text{s}^{-1}$ )	0.02	1



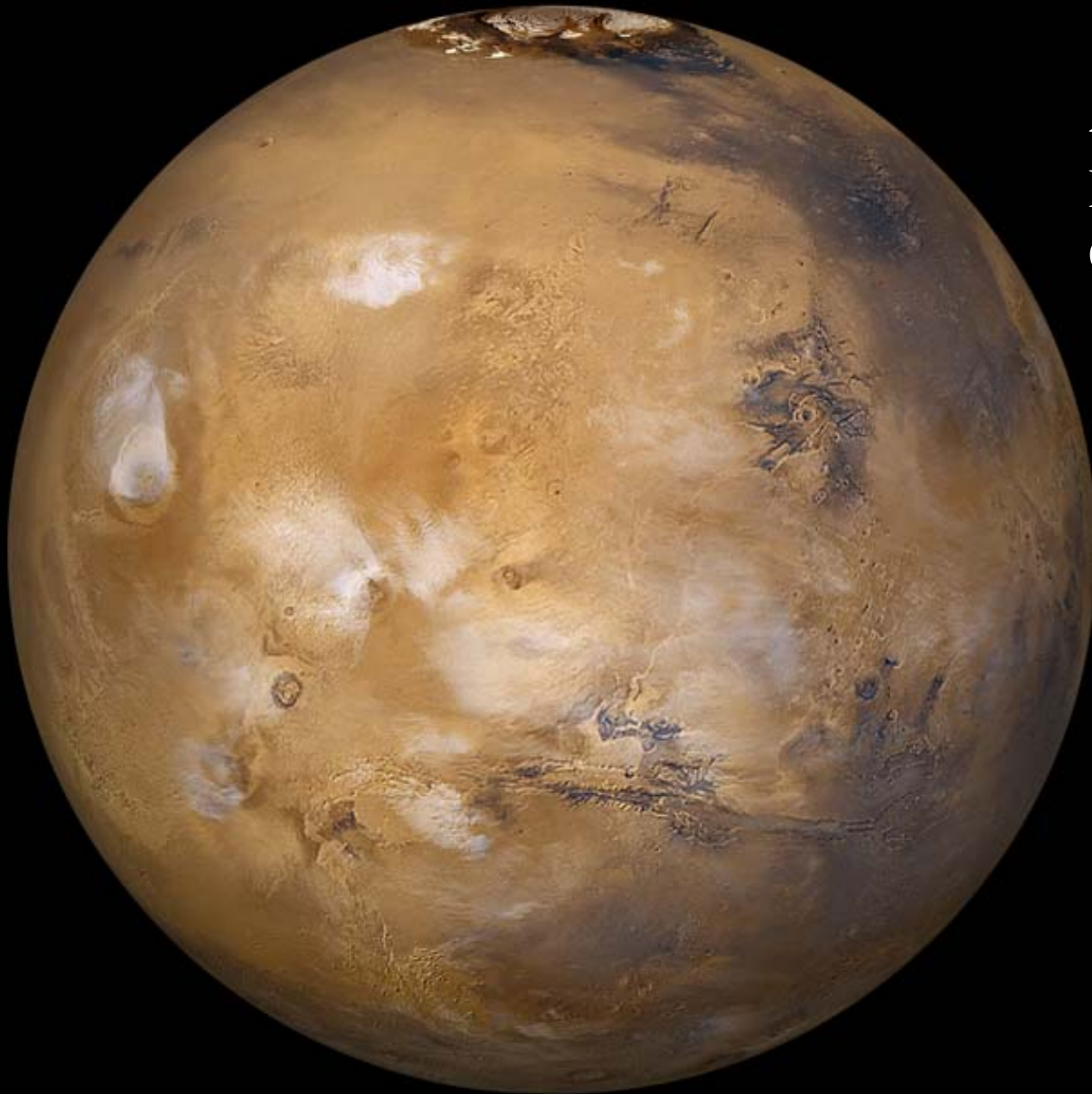




Atmosfera:  $\text{N}_2 + \text{O}_2$  (99%)

Powierzchnia: woda/ląd

Chmury: woda (3stany)



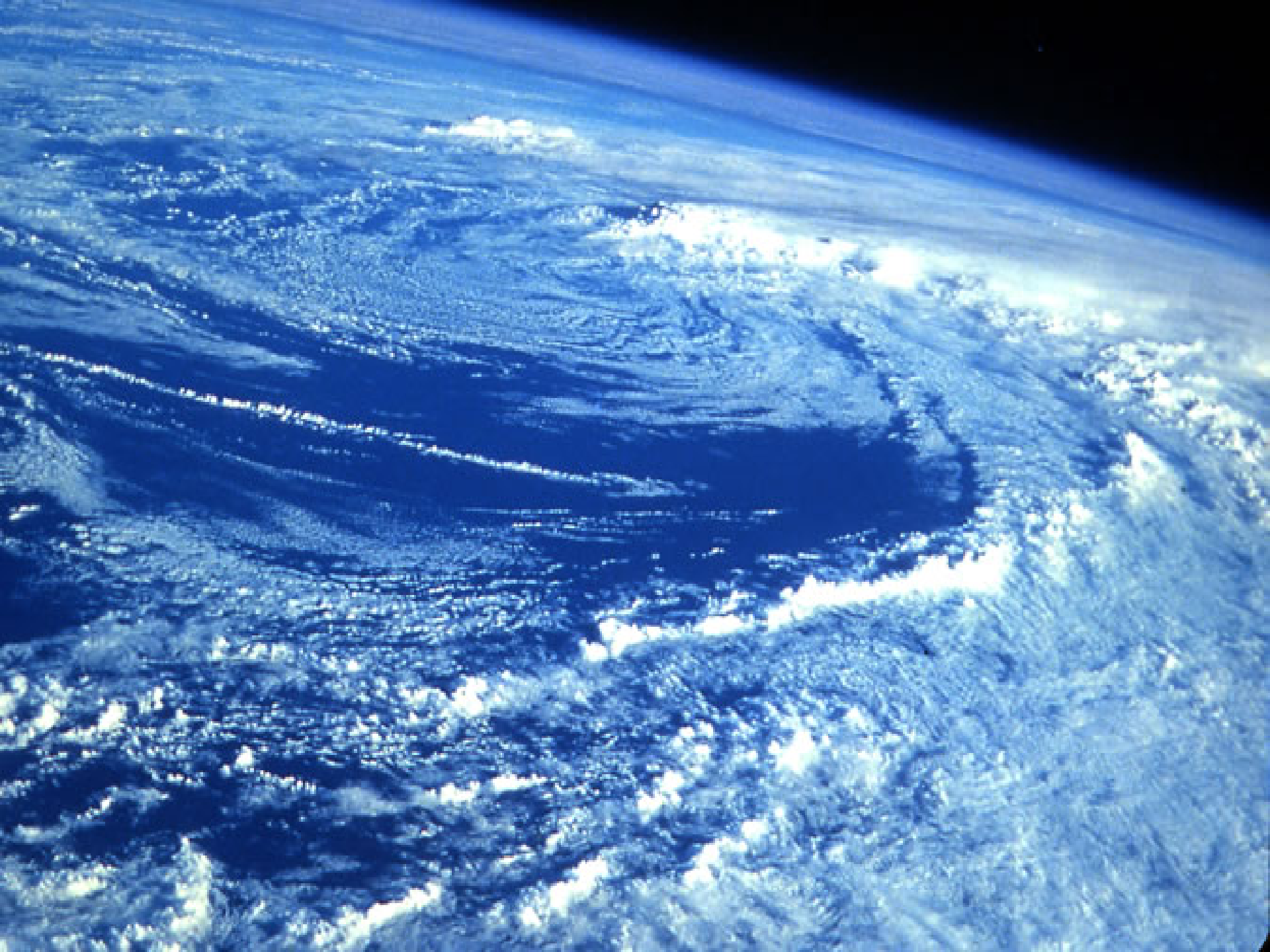
Atmosfera: CO<sub>2</sub> (95%)

Powierzchnia: pył

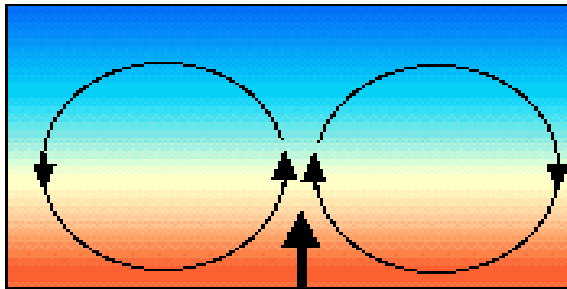
Chmury: woda (lód)





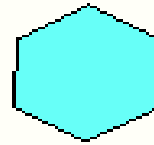


# Komórki czyste lub rolki czyste



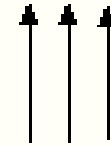
Heating

no wind



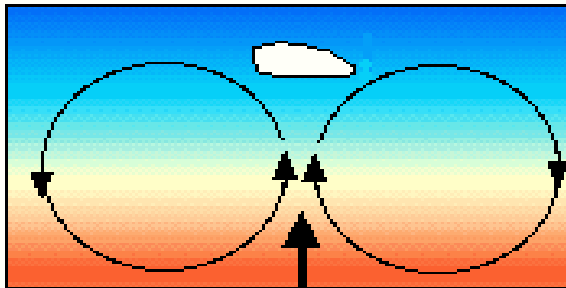
clear cells

wind present

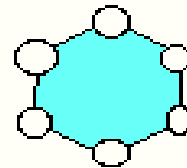


clear rows

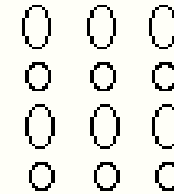
# Komórki otwarte lub rolki otwarte



Heating

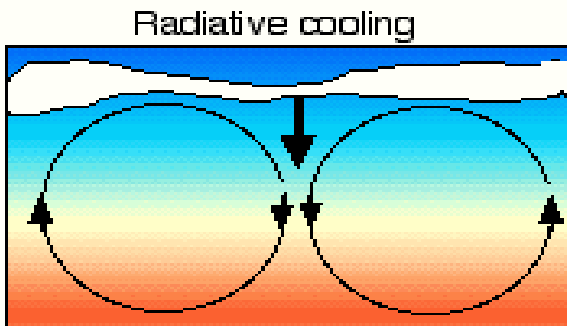


open cells

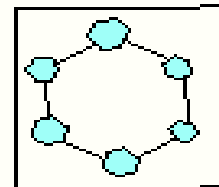


open rows

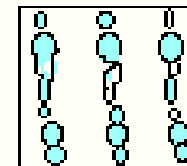
# Komórki wypełnione lub rolki wypełnione



Radiative cooling

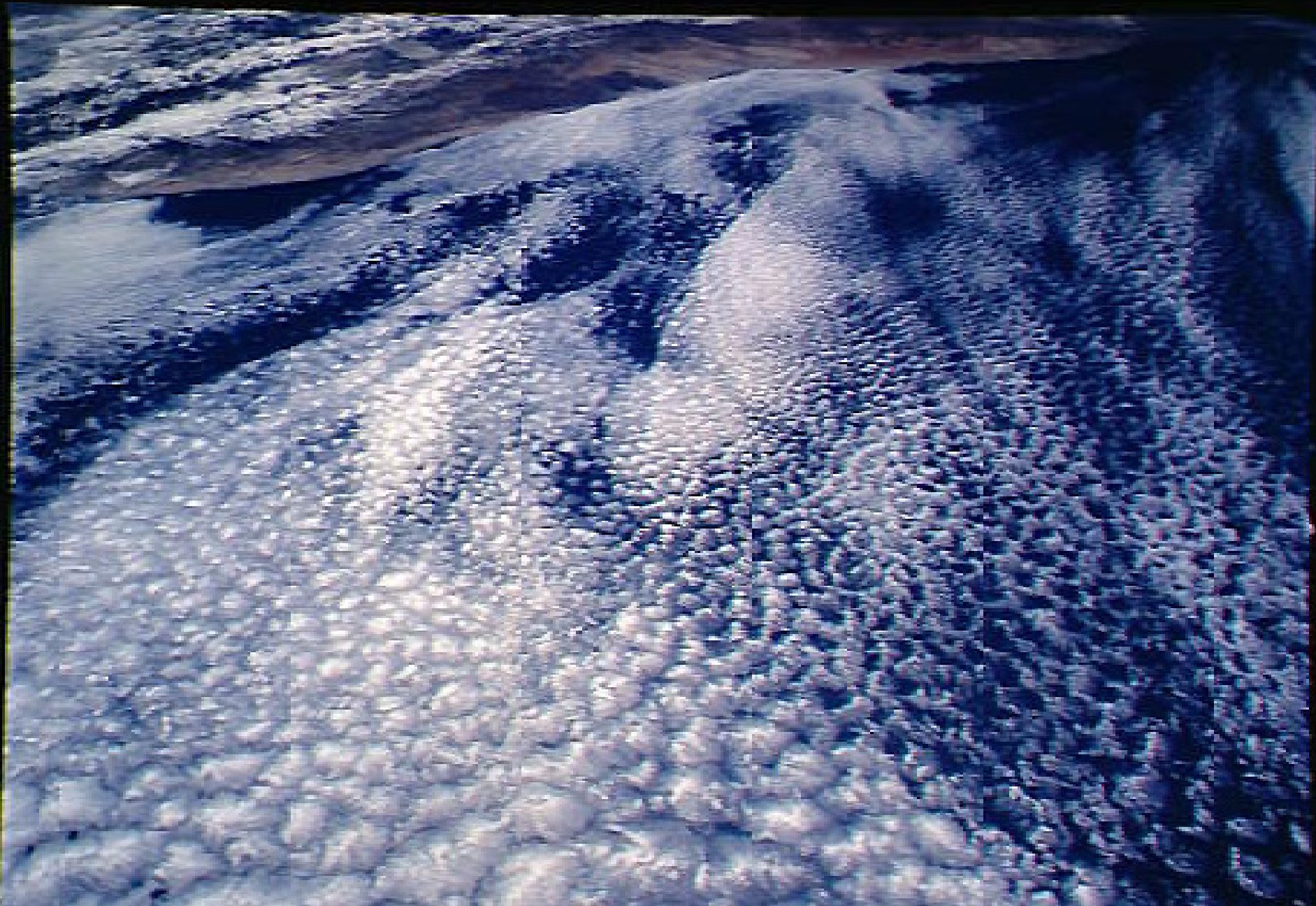


closed cells

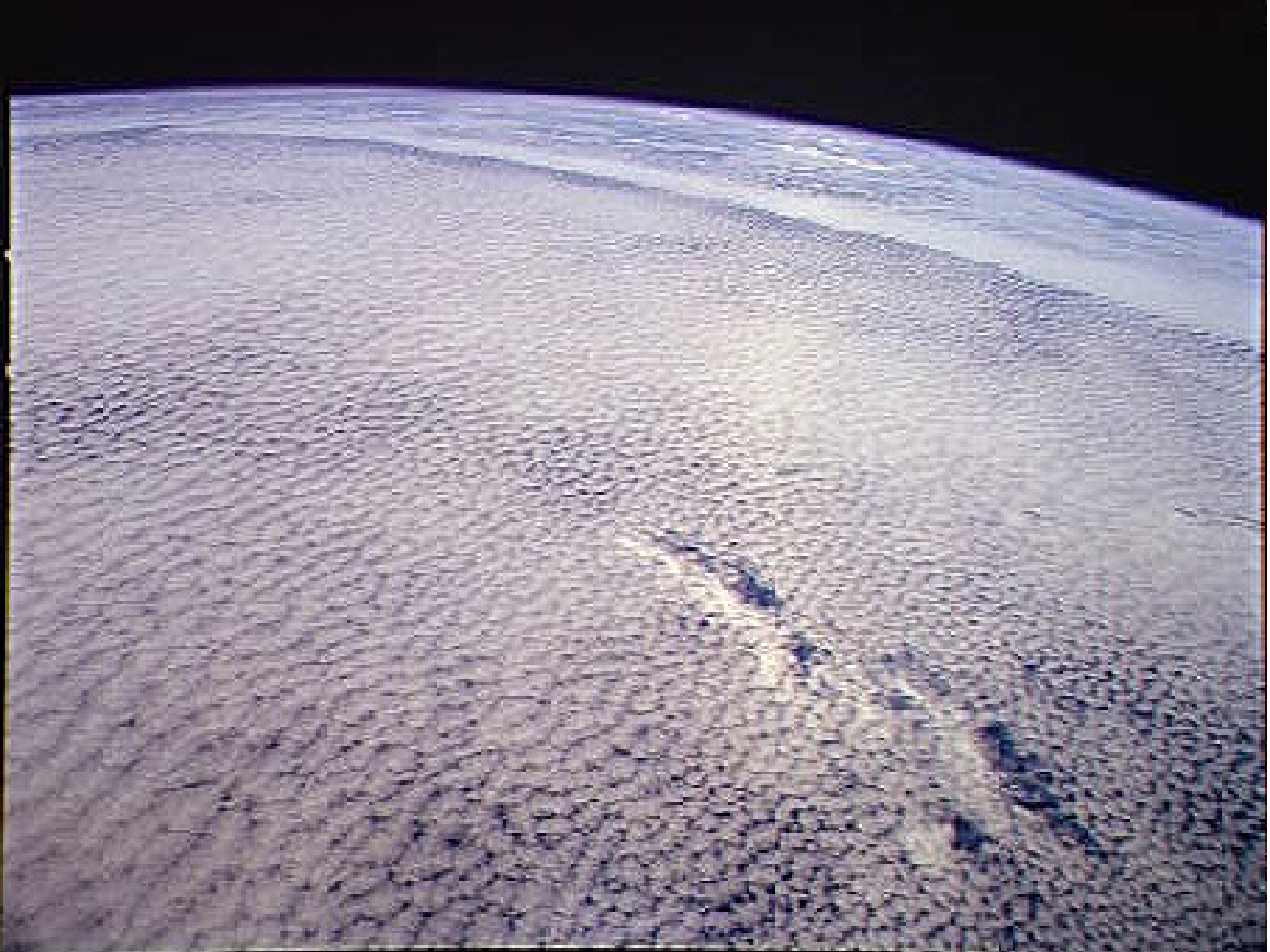


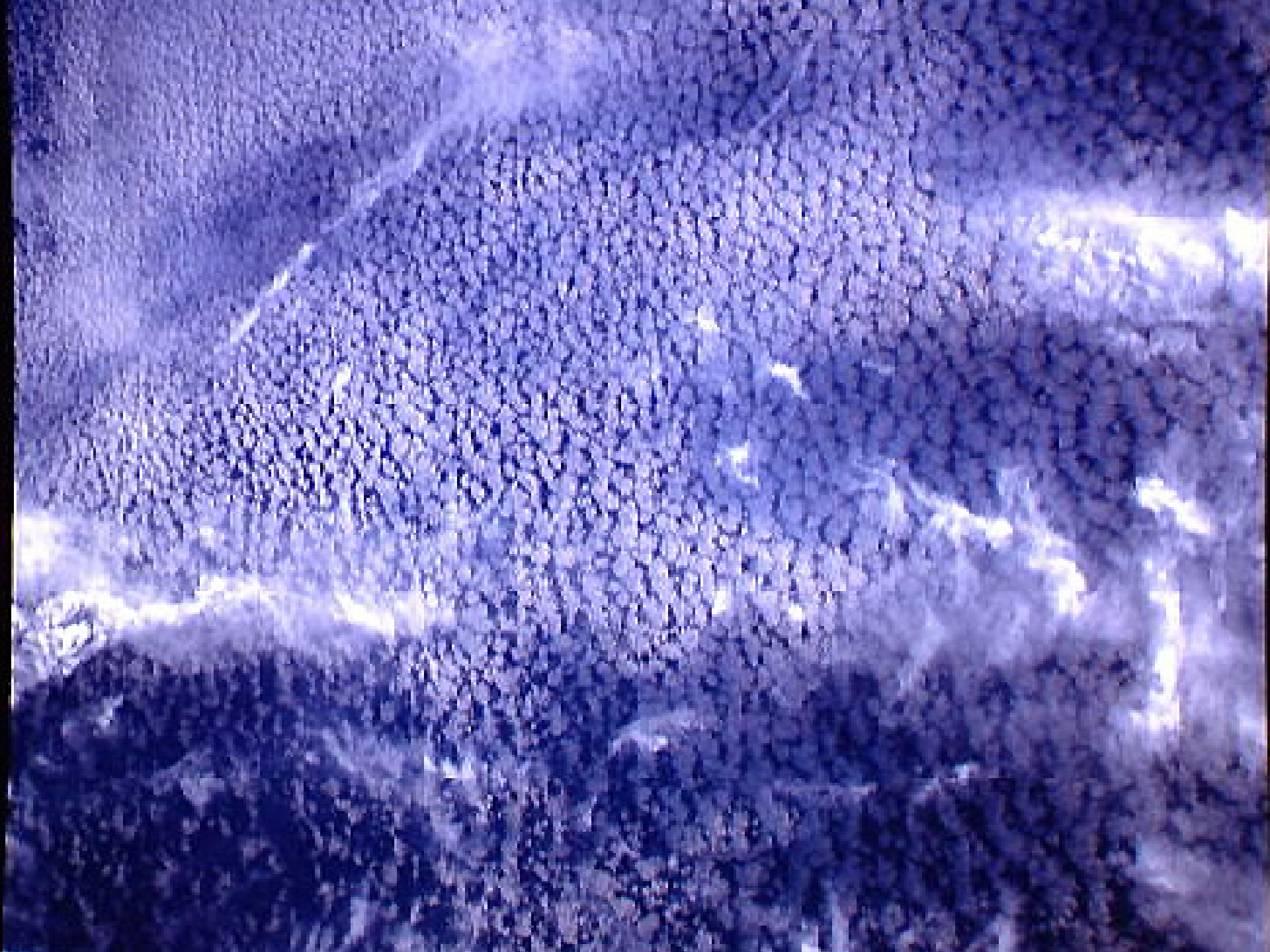
closed rows



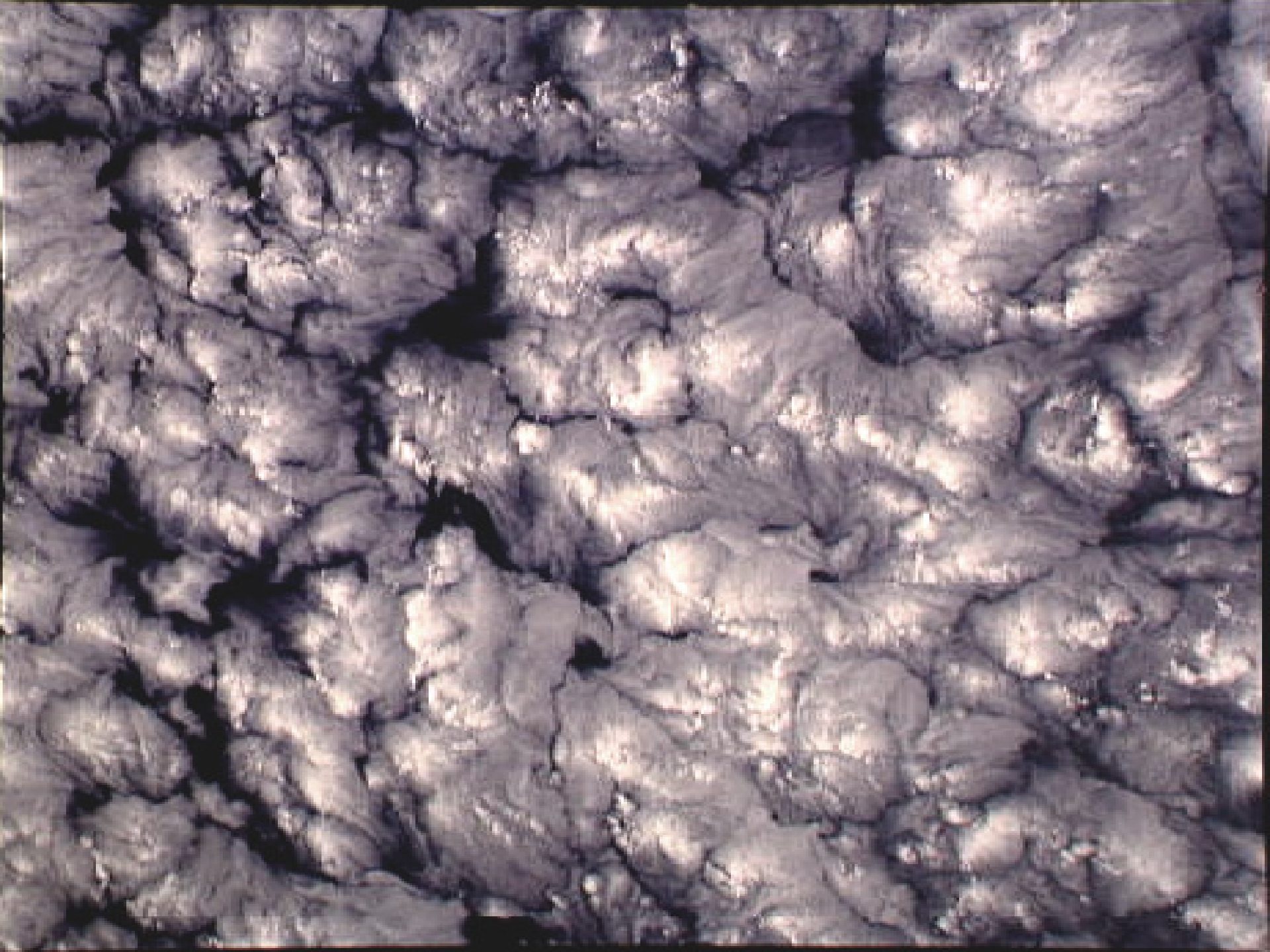


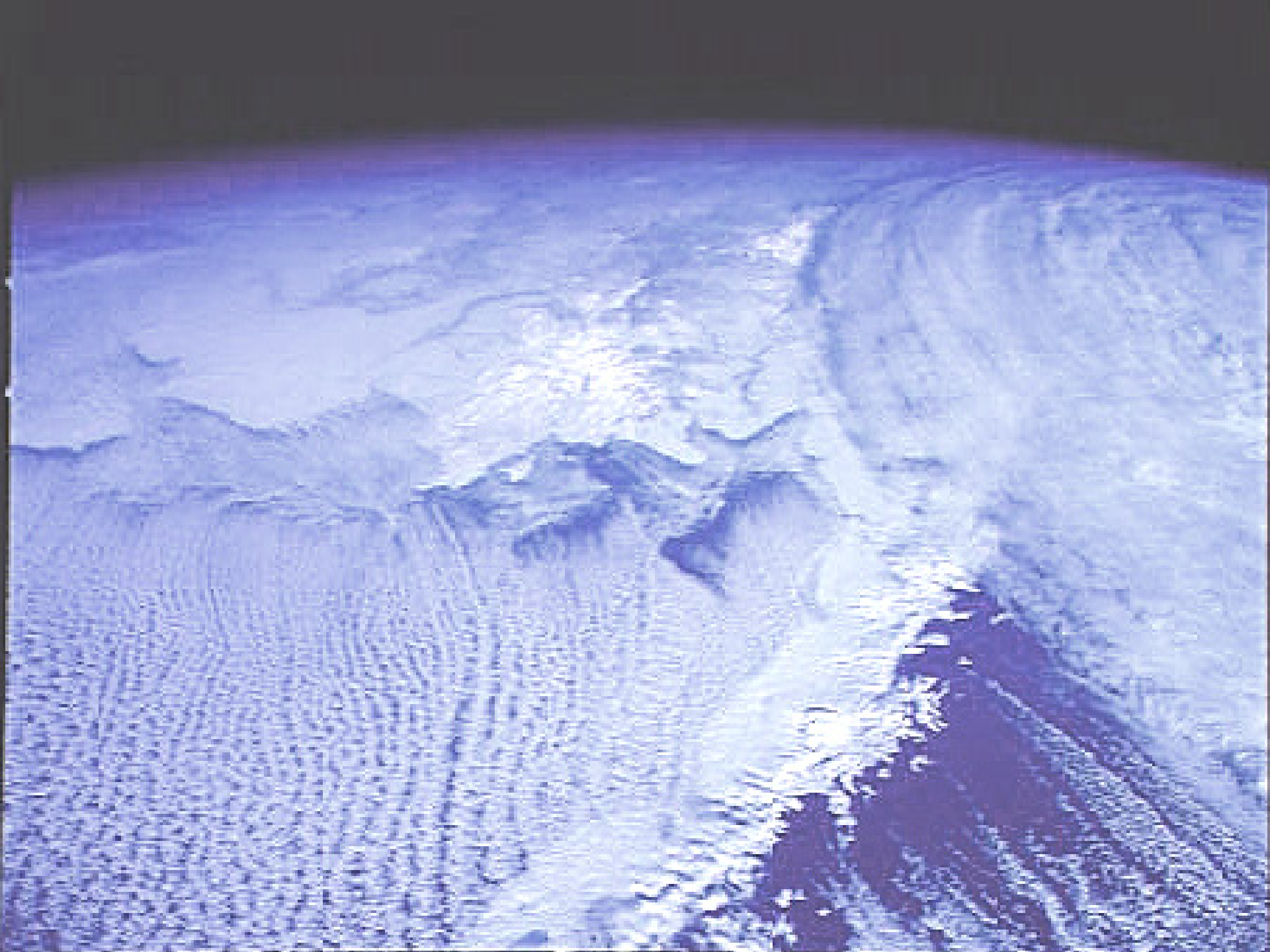




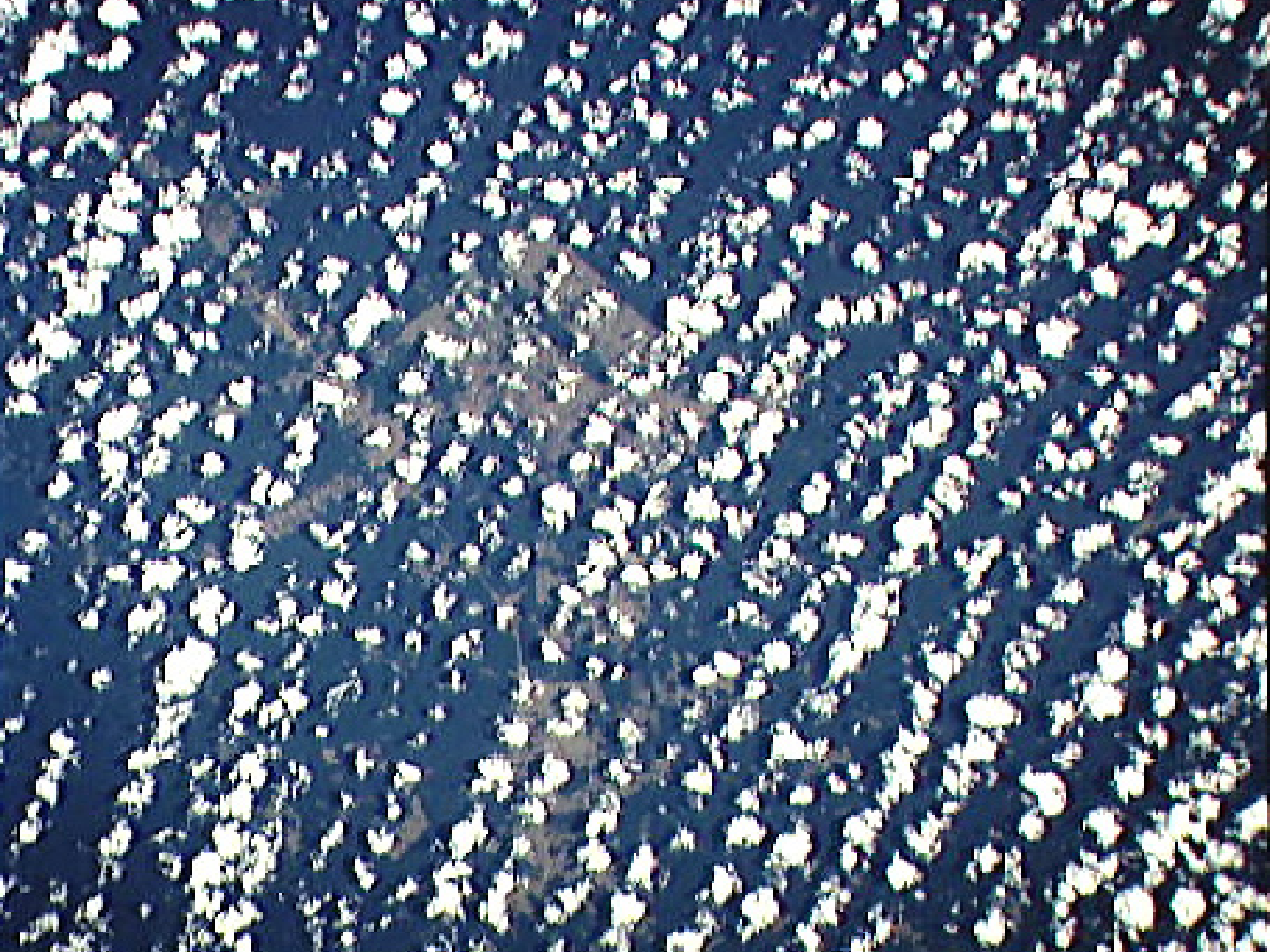


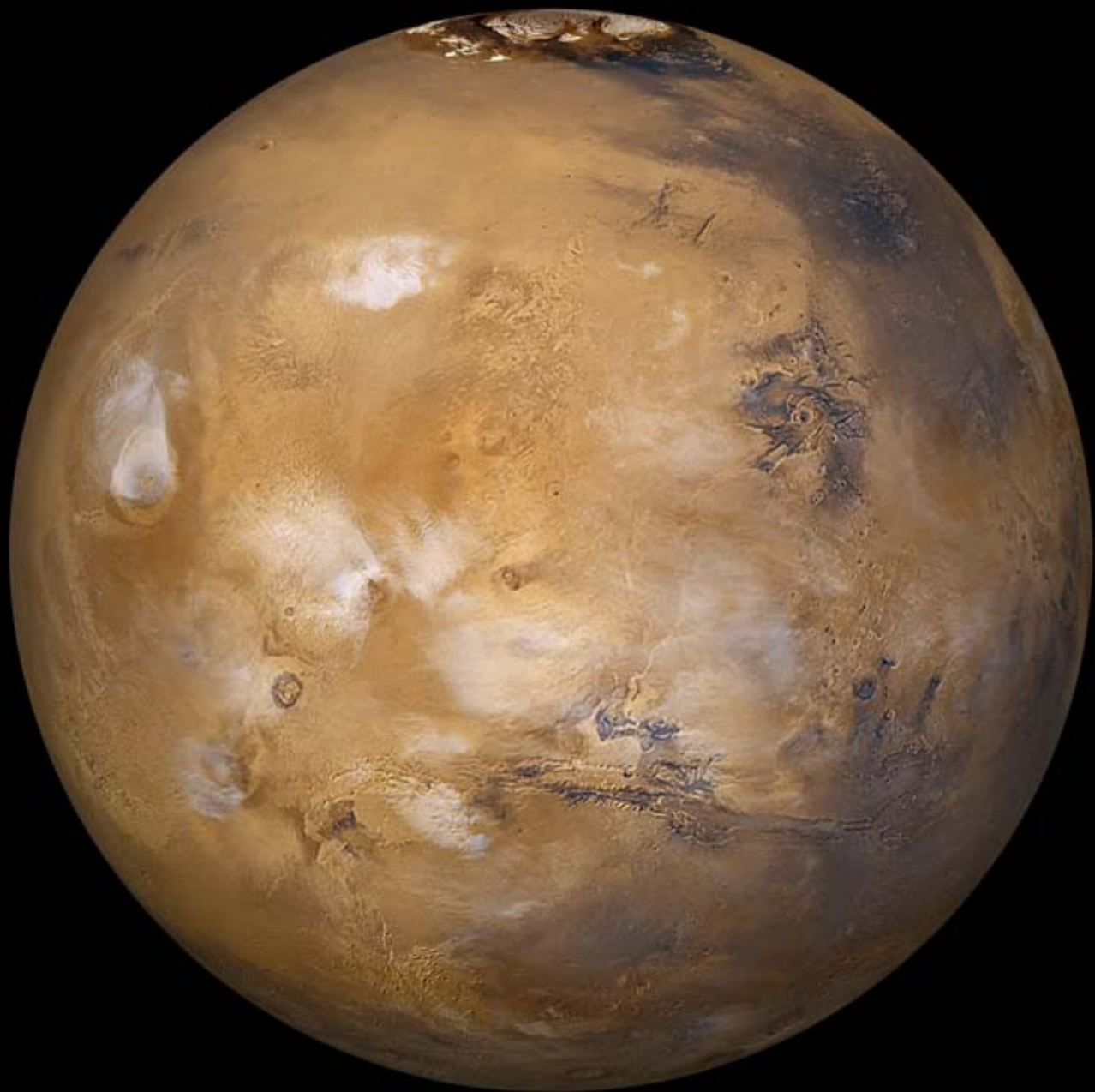


























Large-eddy simulation (LES) models are presently considered useful and reliable research tools for investigating turbulence in the atmospheric boundary layer. The advantage of applying large-eddy simulation models is based on the fact that the LES use equations which remain faithful to the essential physics of the flow. LES models directly resolve most of the turbulence from the Navier-Stokes equations, and only the small scale turbulence is modeled.

the Navier-Stokes equations:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_i \bar{u}_j}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{d\bar{p}''}{dx_i} - 2 \varepsilon_{ijk} \Omega_j (\bar{u}_k - G_k) + \frac{g}{\Theta_0} (\bar{\Theta} - \Theta_0) \delta_{i3} - \frac{d\tau_{ij}}{dx_j}$$

$$\frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_j} = 0$$

$$\frac{\partial \Theta_L}{\partial t} + \frac{\partial \Theta_L u_j}{\partial x_j} = \frac{\partial H_{Lj}}{\partial x_j} + R$$

$$\frac{\partial q_T}{\partial t} + \frac{\partial q_T u_j}{\partial x_j} = \frac{\partial Q_{Tj}}{\partial x_j}$$

modeling the small scale turbulence:

$$T_{ij} = \tau_{ij} - \frac{1}{3} \tau_{kk} \delta_{ij} = -2K_m [S_{ij} - \frac{1}{3} S_{kk} \delta_{ij}]$$

$$K_m = c_m I \sqrt{E}$$

$$\frac{\partial E}{\partial t} + \frac{\partial E U_j}{\partial x_j} = -\tau_{ij} S_{ij} + \beta H_v - \frac{\overline{\partial u'_j (u'_k u'_k / 2 + \pi')}}{\partial x_j} - \varepsilon$$

simulation:

Large-eddy simulation (LES) models are presently considered useful and reliable research tools for investigating turbulence in the atmospheric boundary layer. The advantage of applying large-eddy simulation models is based on the fact that the LES use equations which remain faithful to the essential physics of the flow. LES models directly resolve most of the turbulence from the Navier-Stokes equations, and only the small scale turbulence is modeled.

the Navier-Stokes equations:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_i \bar{u}_j}{\partial x_j} = - \frac{1}{\rho_0} \frac{d\bar{p}''}{dx_i} - 2 \varepsilon_{ijk} \Omega_j (\bar{u}_k - G_k) + \frac{g}{\Theta_0} (\bar{\Theta} - \Theta_0) \delta_{i3} - \frac{d\tau_{ij}}{dx_j}$$

$$\frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_j} = 0$$

$$\frac{\partial \Theta_L}{\partial t} + \frac{\partial \Theta_L u_j}{\partial x_j} = \frac{\partial H_{Lj}}{\partial x_j} + R$$

$$\frac{\partial q_T}{\partial t} + \frac{\partial q_T u_j}{\partial x_j} = \frac{\partial Q_{Tj}}{\partial x_j}$$

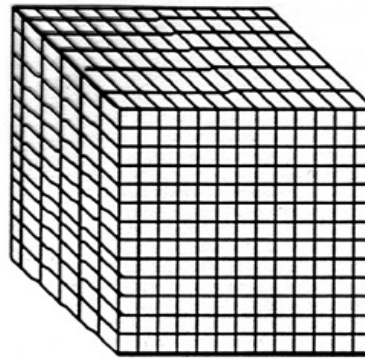
modeling the small scale turbulence:

$$T_{ij} = \tau_{ij} - \frac{1}{3} \tau_{kk} \delta_{ij} = - 2K_m [ S_{ij} - \frac{1}{3} S_{kk} \delta_{ij} ]$$

$$K_m = c_m l \sqrt{E}$$

$$\frac{\partial E}{\partial t} + \frac{\partial E U_j}{\partial x_j} = - \tau_{ij} S_{ij} + \beta H_v - \frac{\partial \overline{u'_j (u'_k u'_k / 2 + \pi')}}{\partial x_j} - \varepsilon$$

simulation:



Δ

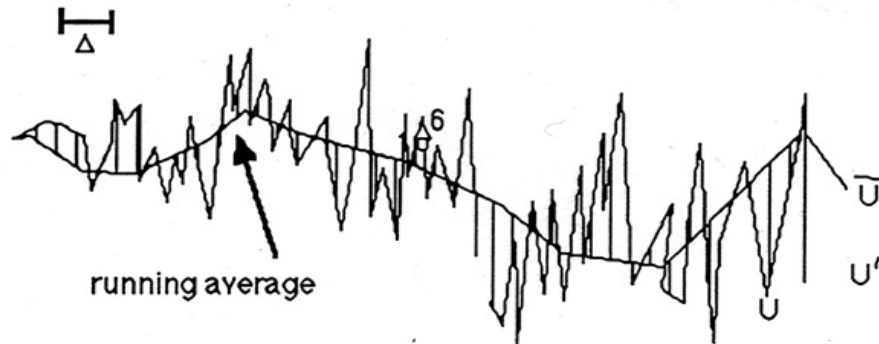
Domain  $10 \text{ km} = 10^6 \text{ mm}$

$\Delta = 1 \text{ mm} \longrightarrow 10^6 \times 10^6 \times 10^6 = 10^{18} \longrightarrow$  dissipation resolved

$\Delta = 100 \text{ m} \longrightarrow 10^2 \times 10^2 \times 10^2 = 10^6 \longrightarrow$  dissipation not resolved

resolvable eddies  $> 100 \text{ m}$

subgrid eddies  $< 100 \text{ m} \longrightarrow$  need to be modeled

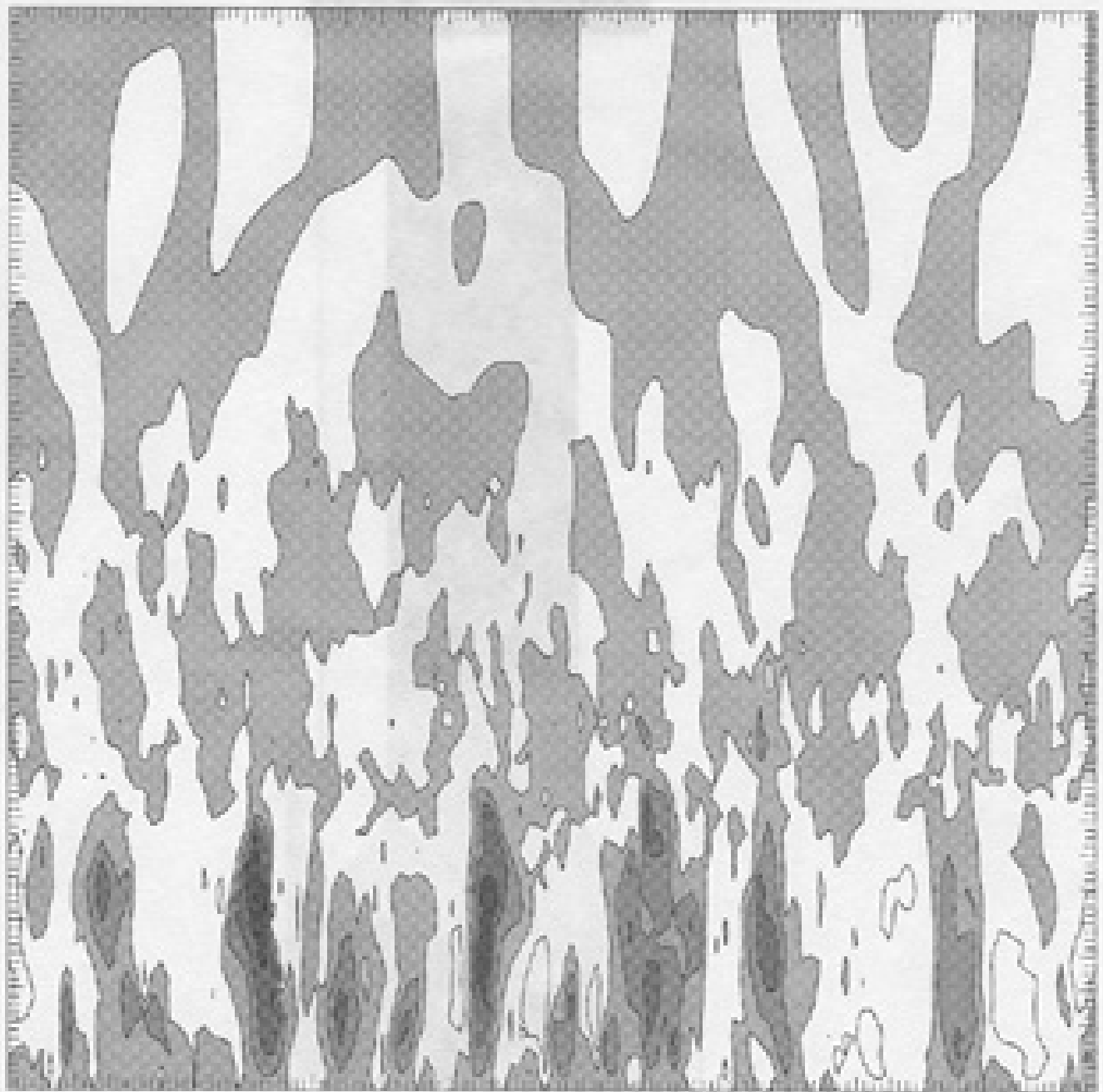


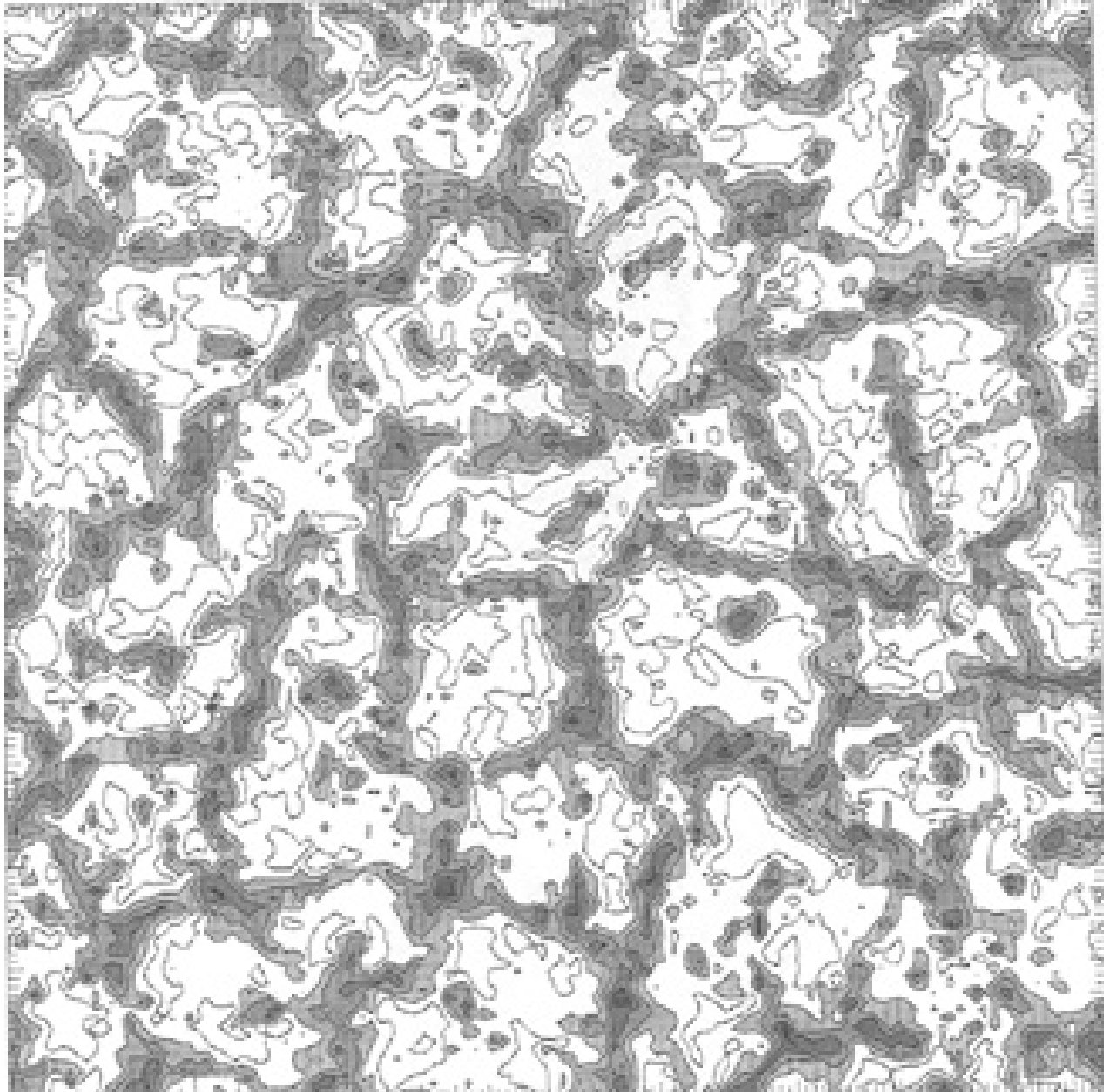


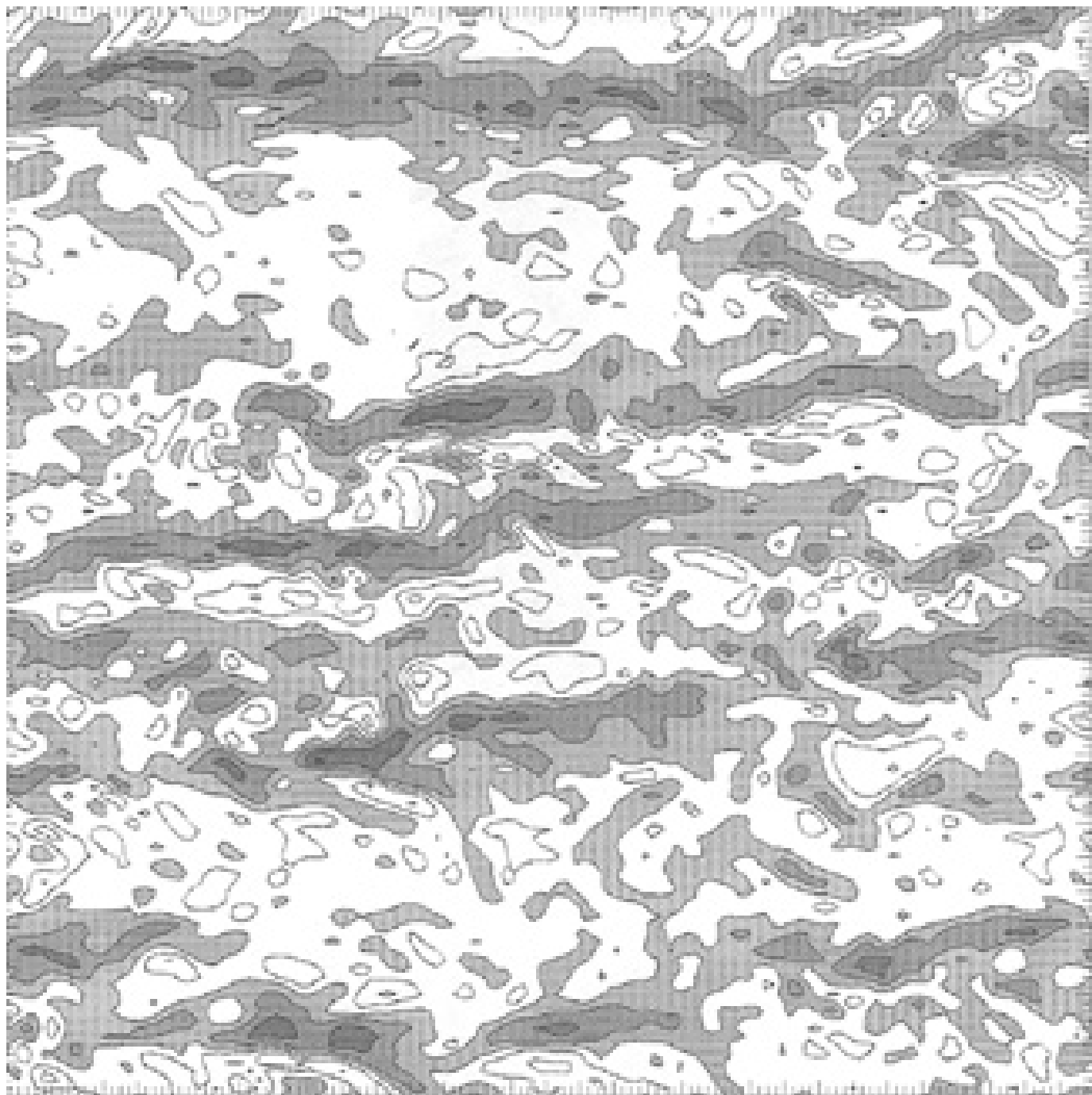


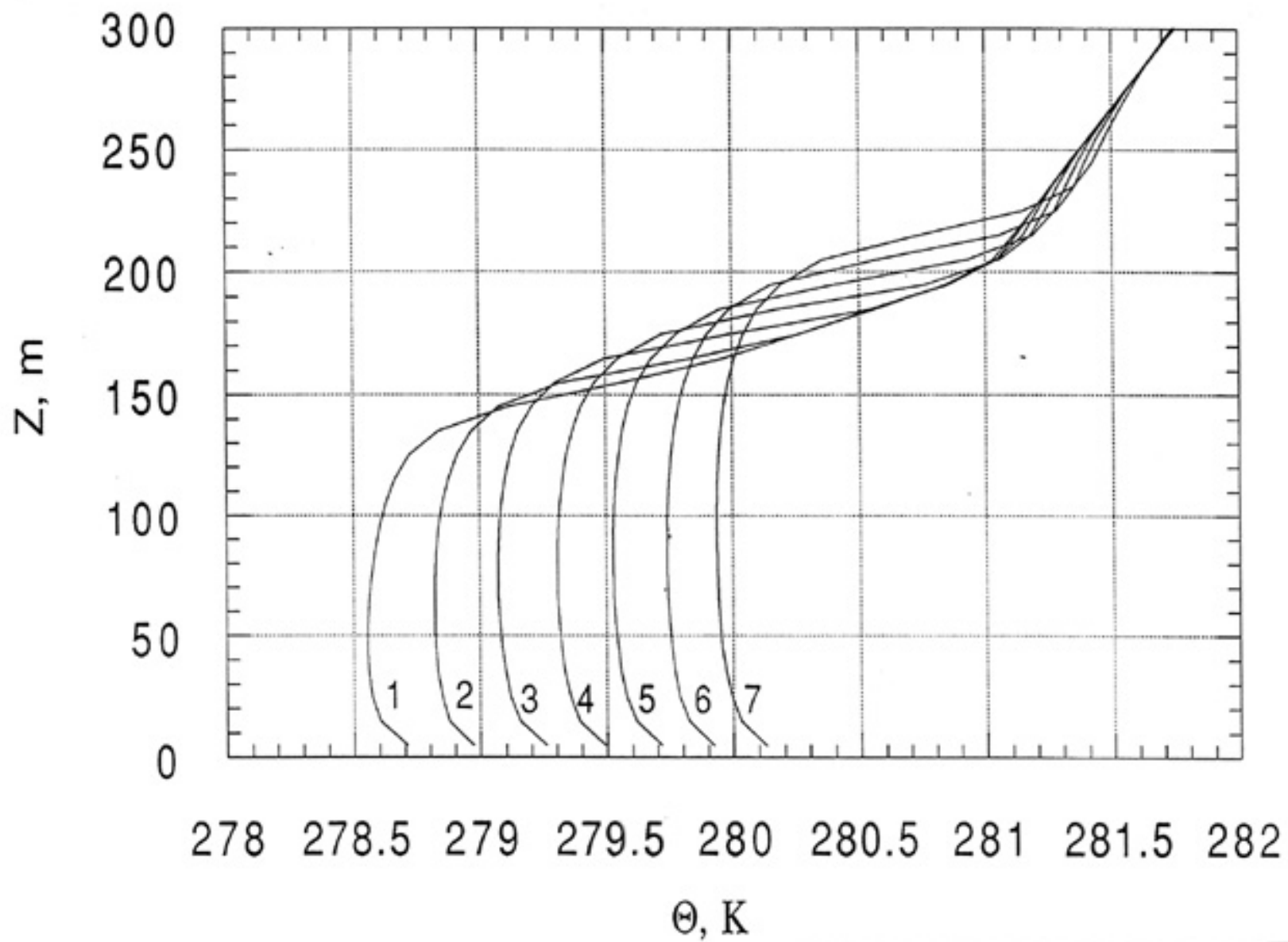
*konwekcja swobodna  
na Ziemi*

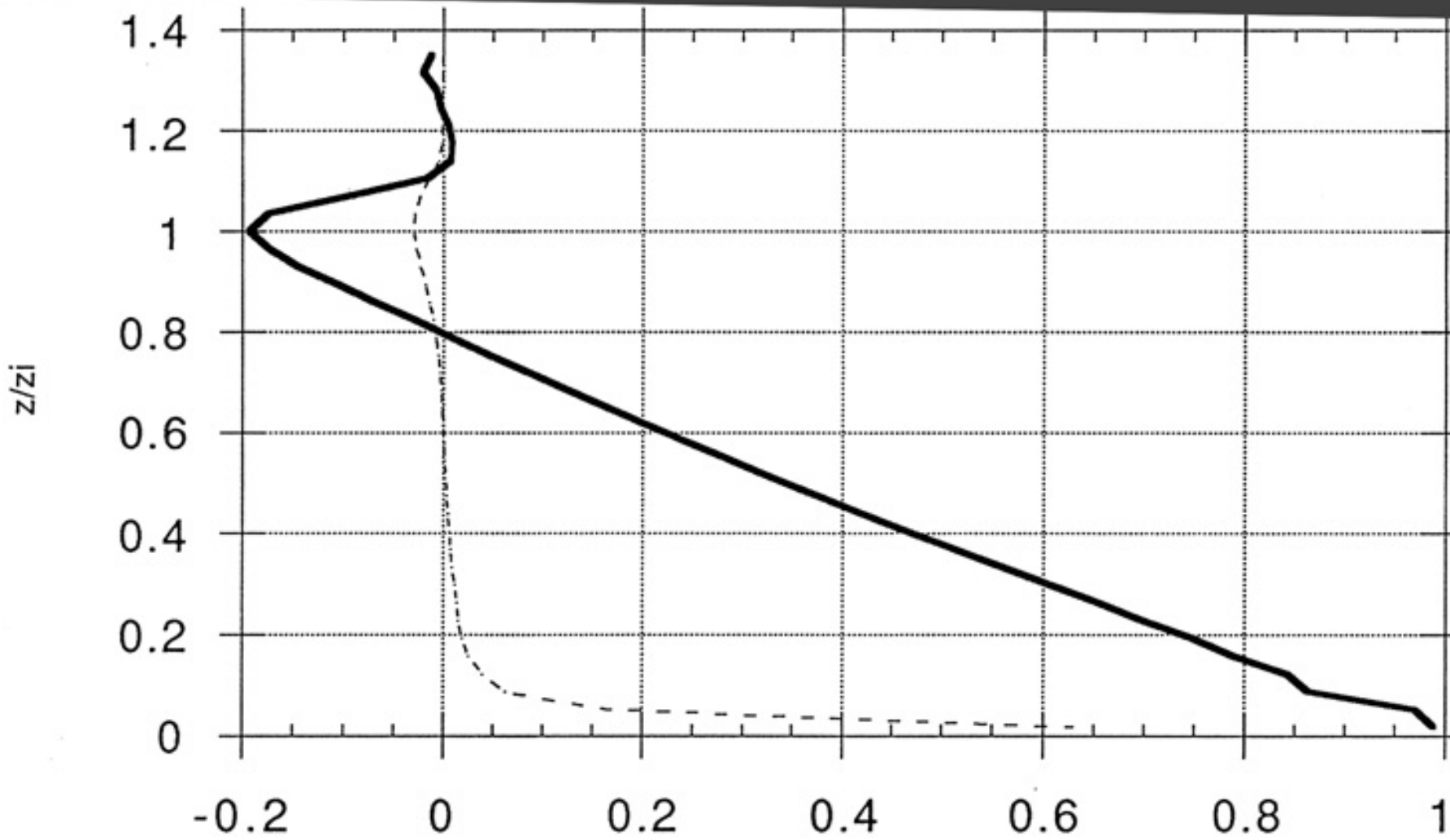














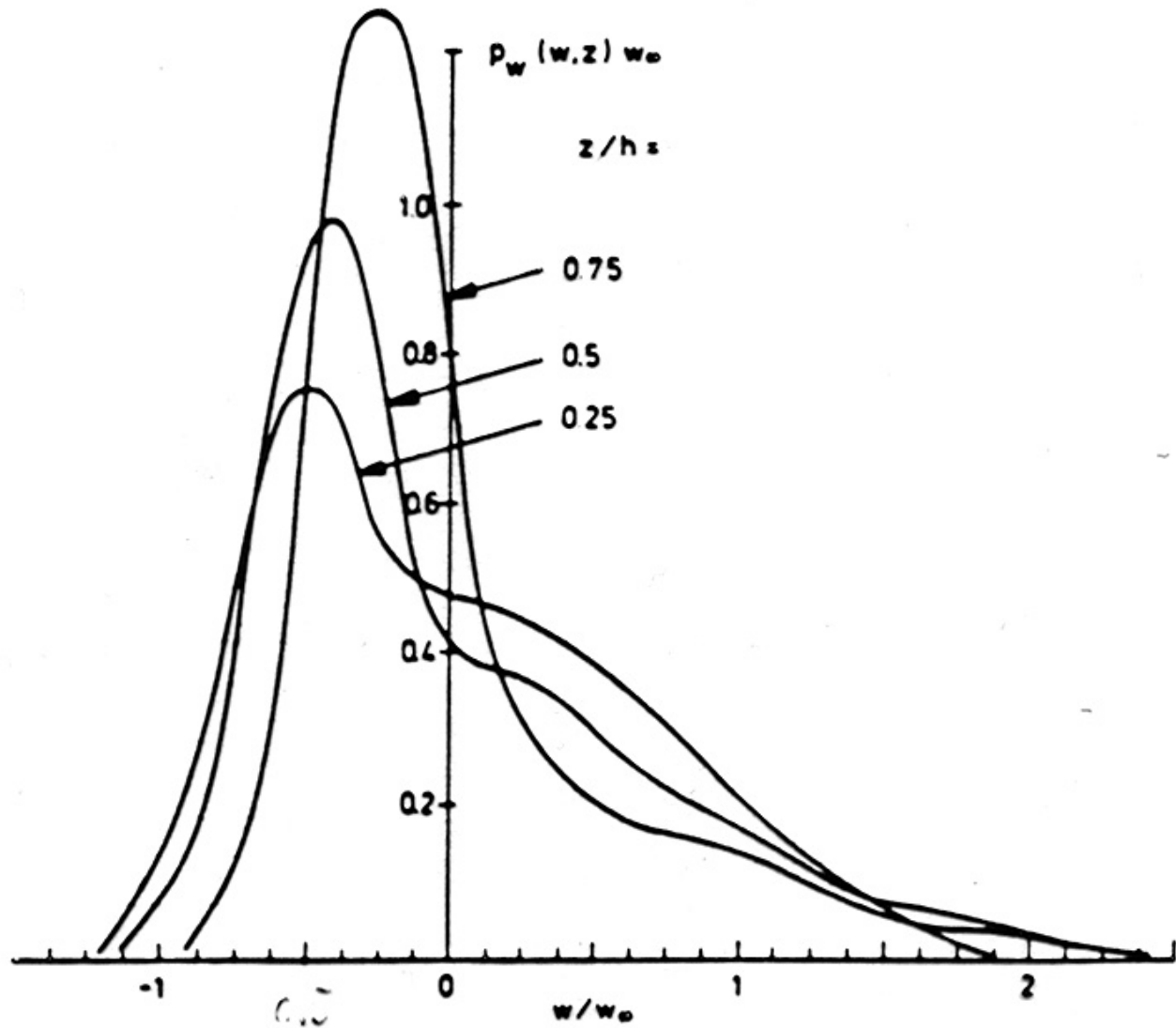
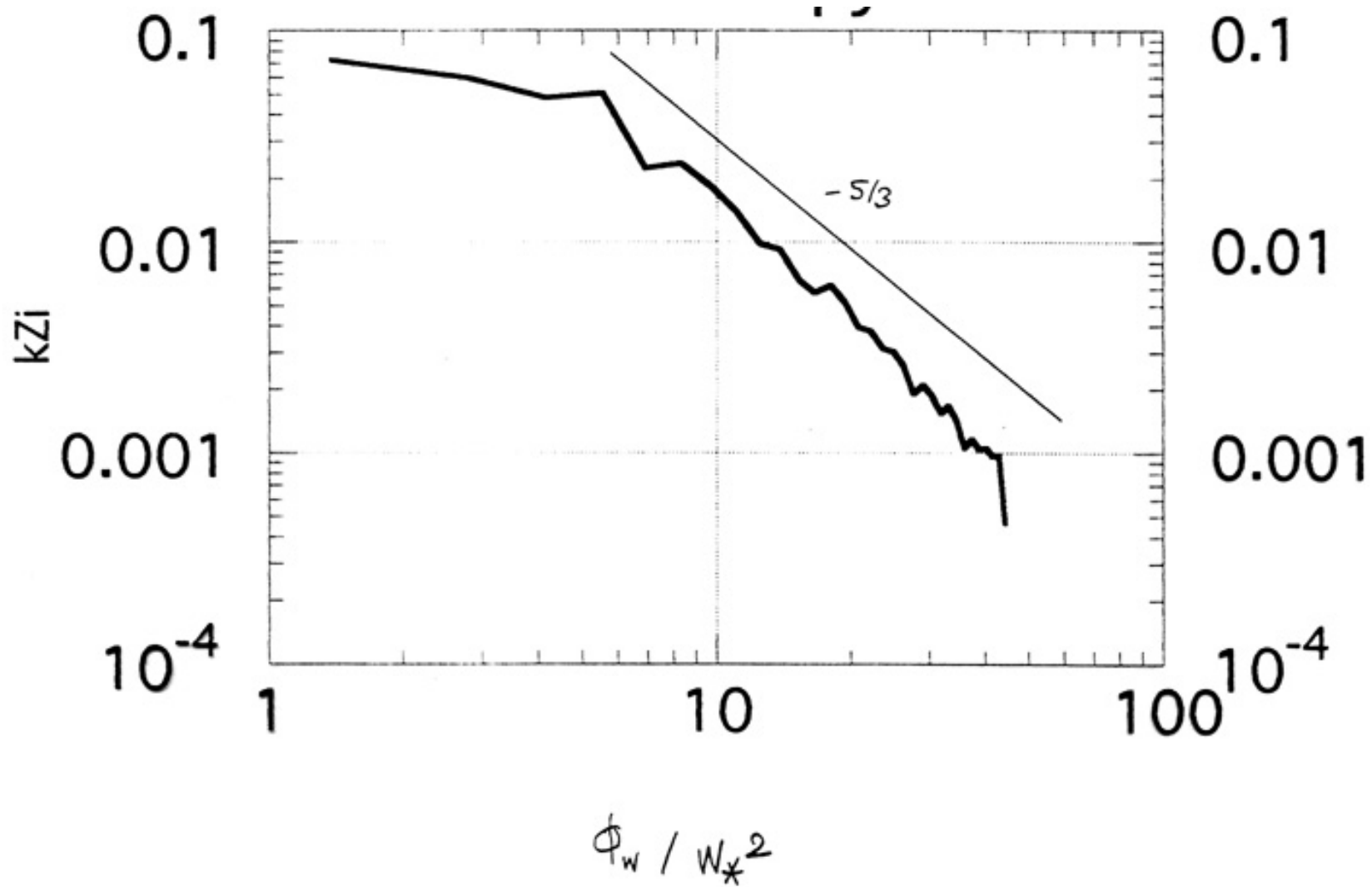
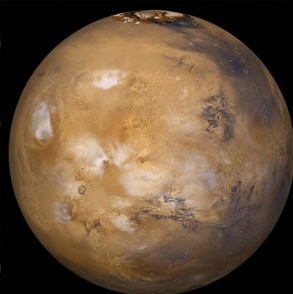
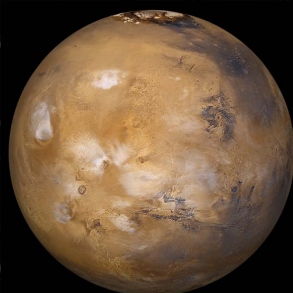


Figure 5.13. Probability density of vertical velocity at three levels of a convective mixed layer.

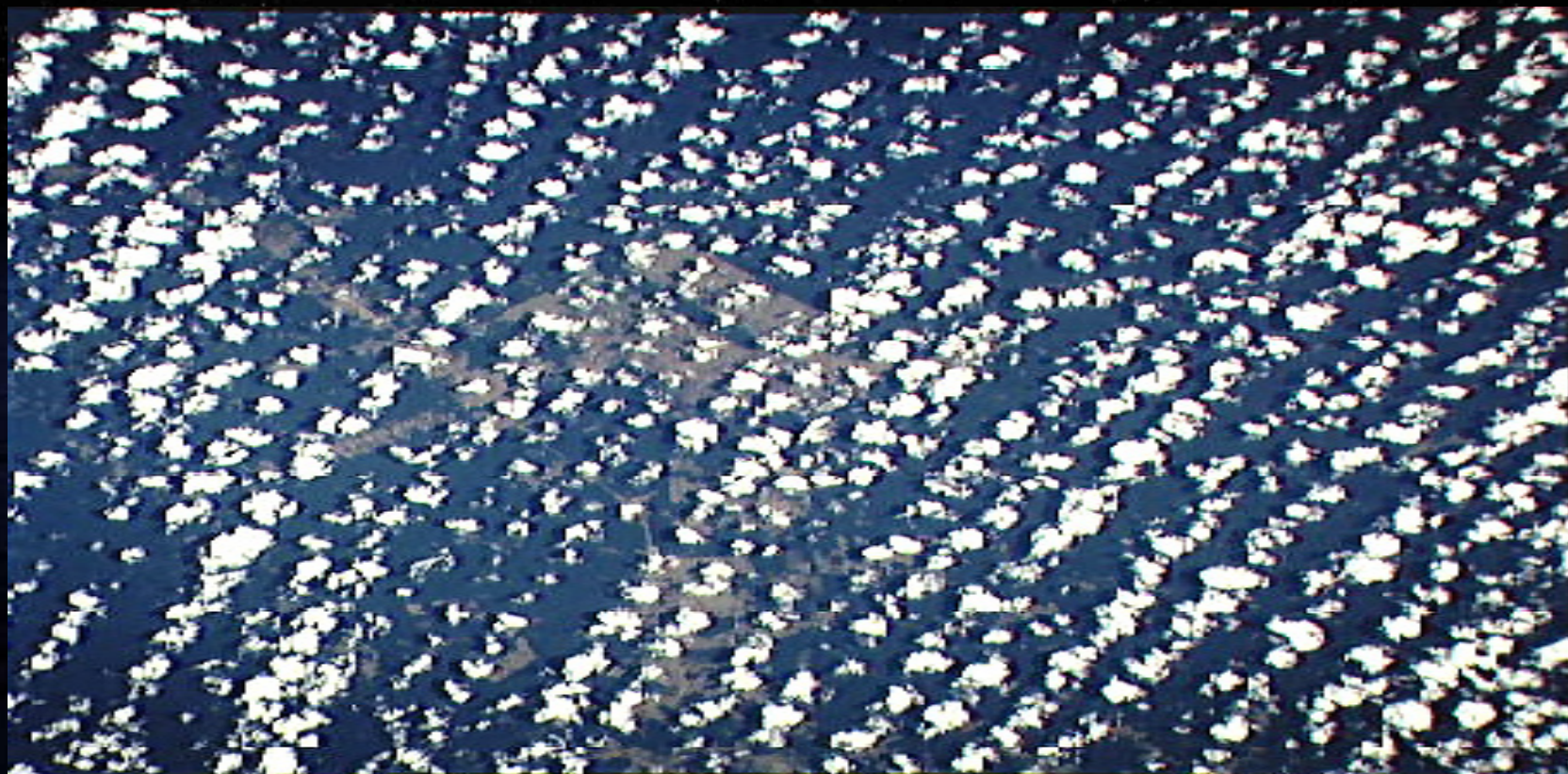




Pytanie:  
Czy na Marsie powstają  
struktury cyrkulacyjne



Pytanie:  
Czy na Marsie powstają  
struktury cyrkulacyjne  
podobne do tych na Ziemi?



**Przybliżenie Boussinesq (dla porannej konwekcji)  
model anelastyczny niezbieżny dla g, (bokiej konwekcji)**

$$f = 0.7 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$$

$$z_o = 0.01 \text{ m}$$

$$\beta = g/T_o = 0.0177 \text{ m s}^{-2}\text{K}^{-1}$$

$$G = 0 \text{ lub } 30 \text{ m/s}$$

$$\Theta = 210\text{K} \quad \omega \text{ w } \alpha\rho\omega\omega\epsilon \quad 0 < \zeta < 300 \text{ } \mu, \quad \Gamma = 3 \text{ K } \kappa\mu^{-1} \text{ } \rho\omega\psi\zeta\epsilon\phi$$

$$H_o = 1 \text{ K } \mu \text{ } \sigma^{-1} \quad (=10.95 \text{ } \Omega \text{ } \mu^{-1})$$

$$(1) \dot{\Theta}/\partial\tau/\rho\alpha\delta = 0 \text{ K } \eta^{-1}, \quad (2) \dot{\Theta}/\partial\tau/\rho\alpha\delta = 10 \text{ K } \eta^{-1}, \quad (3) \dot{\Theta}/\partial\tau/\rho\alpha\delta = 30 \text{ K } \eta^{-1}$$

$$128 \text{ } \xi \quad 128 \text{ } \xi \quad 70$$

$$\Delta\xi = \Delta\psi = \Delta\zeta = 75 \text{ } \mu$$

$$2500 \text{ } \kappa\rho\kappa\omega \text{ } \chi\zeta\alpha\sigma\omega\psi\chi\eta \quad (\Gamma = 0)$$

$$5000 \text{ } \kappa\rho\kappa\omega \text{ } \chi\zeta\alpha\sigma\omega\psi\chi\eta \quad (\Gamma = 30)$$



## Przybliżenie Boussinesq (dla porannej konwekcji)

model anelastyczny niezbieżny dla g, (bokiej konwekcji)

$$f = 0.7 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$$

$$z_o = 0.01 \text{ m}$$

$$\beta = g/T_o = 0.0177 \text{ m s}^{-2}\text{K}^{-1}$$

$$G = 0 \text{ lub } 30 \text{ m/s}$$

$$\Theta = 210\text{K} \quad \omega \text{ ωαρωιε } 0 < \zeta < 300 \text{ } \mu, \quad \Gamma = 3 \text{ K } \kappa\mu^{-1} \text{ ποωψζεφ}$$

$$H_o = 1 \text{ K } \mu \text{ } \sigma^{-1} \quad (=10.95 \text{ } \Omega \text{ } \mu^{-1})$$

$$(1) \dot{\Theta}/\partial\tau_{\rho\alpha\delta} = 0 \text{ K } \eta^{-1}, \quad (2) \dot{\Theta}/\partial\tau_{\rho\alpha\delta} = 10 \text{ K } \eta^{-1}, \quad (3) \dot{\Theta}/\partial\tau_{\rho\alpha\delta} = 30 \text{ K } \eta^{-1}$$

$$128 \xi \quad 128 \xi \quad 70$$

$$\Delta\xi = \Delta\psi = \Delta\zeta = 75 \text{ } \mu$$

$$2500 \text{ κρωκω } \chi\zeta\alpha\sigma\omega\psi\chi\eta \quad (\Gamma = 0)$$

$$5000 \text{ κρωκω } \chi\zeta\alpha\sigma\omega\psi\chi\eta \quad (\Gamma = 30)$$



**Przybliżenie Boussinesq (dla porannej konwekcji)**

**model anelastyczny niezbieżny dla g, (bokiej konwekcji)**

$$f = 0.7 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$$

$$z_o = 0.01 \text{ m}$$

$$\beta = g/T_o = 0.0177 \text{ m s}^{-2}\text{K}^{-1}$$

$$G = 0 \text{ lub } 30 \text{ m/s}$$

$$\Theta = 210\text{K} \quad \omega \text{ ω α ρ ω ι ε } \quad 0 < \zeta < 300 \text{ } \mu, \quad \Gamma = 3 \text{ K } \kappa \mu^{-1} \text{ π ο ω ψ ζ ε ρ}$$

$$H_o = 1 \text{ K } \mu \text{ } \sigma^{-1} \quad (=10.95 \text{ } \Omega \text{ } \mu^{-1})$$

$$(1) \dot{\epsilon} \Theta / \partial \tau / \rho \alpha \delta = 0 \text{ K } \eta^{-1}, \quad (2) \dot{\epsilon} \Theta / \partial \tau / \rho \alpha \delta = 10 \text{ K } \eta^{-1}, \quad (3) \dot{\epsilon} \Theta / \partial \tau / \rho \alpha \delta = 30 \text{ K } \eta^{-1}$$

$$128 \xi \quad 128 \xi \quad 70$$

$$\Delta \xi = \Delta \psi = \Delta \zeta = 75 \text{ } \mu$$

$$2500 \text{ κ ρ κ ο ω } \chi \zeta \alpha \sigma \omega \psi \chi \eta \quad (\Gamma = 0)$$

$$5000 \text{ κ ρ κ ο ω } \chi \zeta \alpha \sigma \omega \psi \chi \eta \quad (\Gamma = 30)$$

**Przybliżenie Boussinesq (dla porannej konwekcji)**

**model anelastyczny niezbieżny dla g, (bokiej konwekcji)**

$$f = 0.7 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$$

$$z_o = 0.01 \text{ m}$$

$$\beta = g/T_o = 0.0177 \text{ m s}^{-2}\text{K}^{-1}$$

$$G = 0 \text{ lub } 30 \text{ m/s}$$

$$\Theta = 210\text{K} \quad \omega \text{ ωαρωωε } 0 < \zeta < 300 \text{ } \mu, \quad \Gamma = 3 \text{ K } \kappa\mu^{-1} \text{ ποωψζεφ}$$

$$H_o = 1 \text{ K } \mu \text{ } \sigma^{-1} \quad (=10.95 \text{ } \Omega \text{ } \mu^{-1})$$

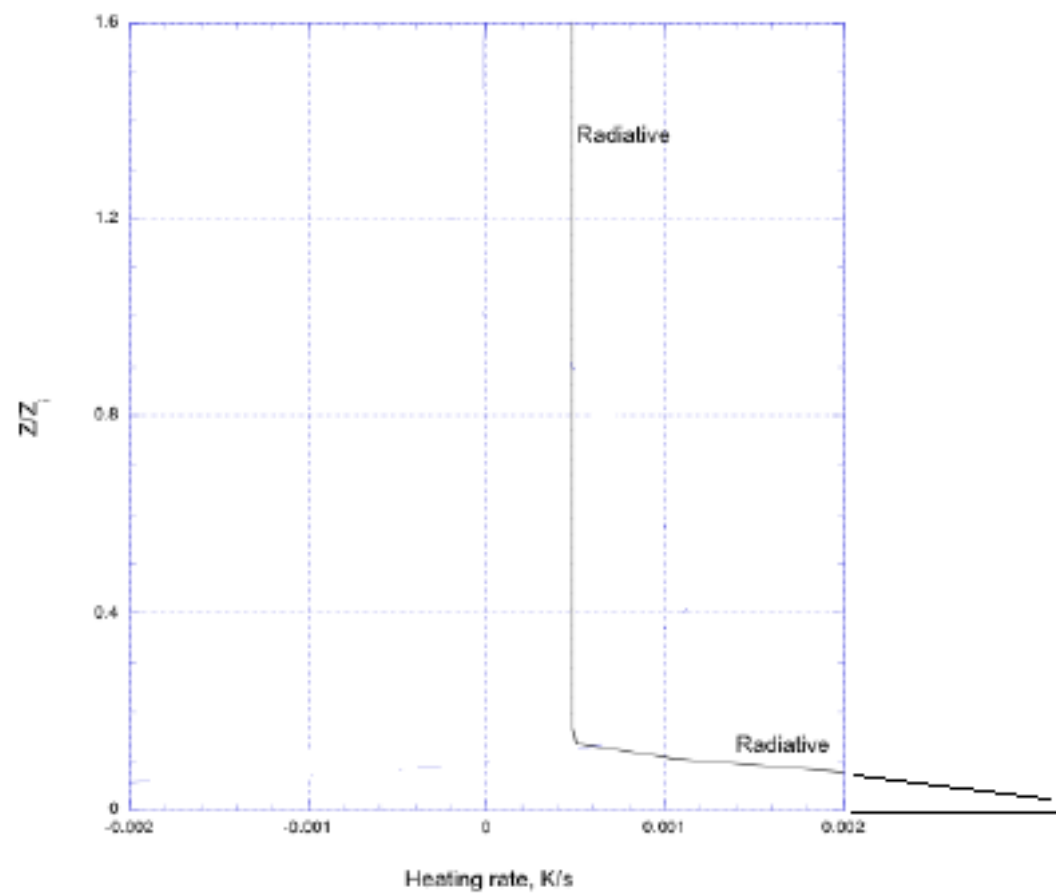
$$(1) \dot{\epsilon} \Theta / \partial \tau / \rho \alpha \delta = 0 \text{ K } \eta^{-1}, \quad (2) \dot{\epsilon} \Theta / \partial \tau / \rho \alpha \delta = 10 \text{ K } \eta^{-1}, \quad (3) \dot{\epsilon} \Theta / \partial \tau / \rho \alpha \delta = 30 \text{ K } \eta^{-1}$$

$$128 \xi \text{ } 128 \xi \text{ } 70$$

$$\Delta \xi = \Delta \psi = \Delta \zeta = 75 \text{ } \mu$$

$$2500 \text{ κρωκωω } \chi \zeta \alpha \sigma \omega \psi \chi \eta (\Gamma = 0)$$

$$5000 \text{ κρωκωω } \chi \zeta \alpha \sigma \omega \psi \chi \eta (\Gamma = 30)$$



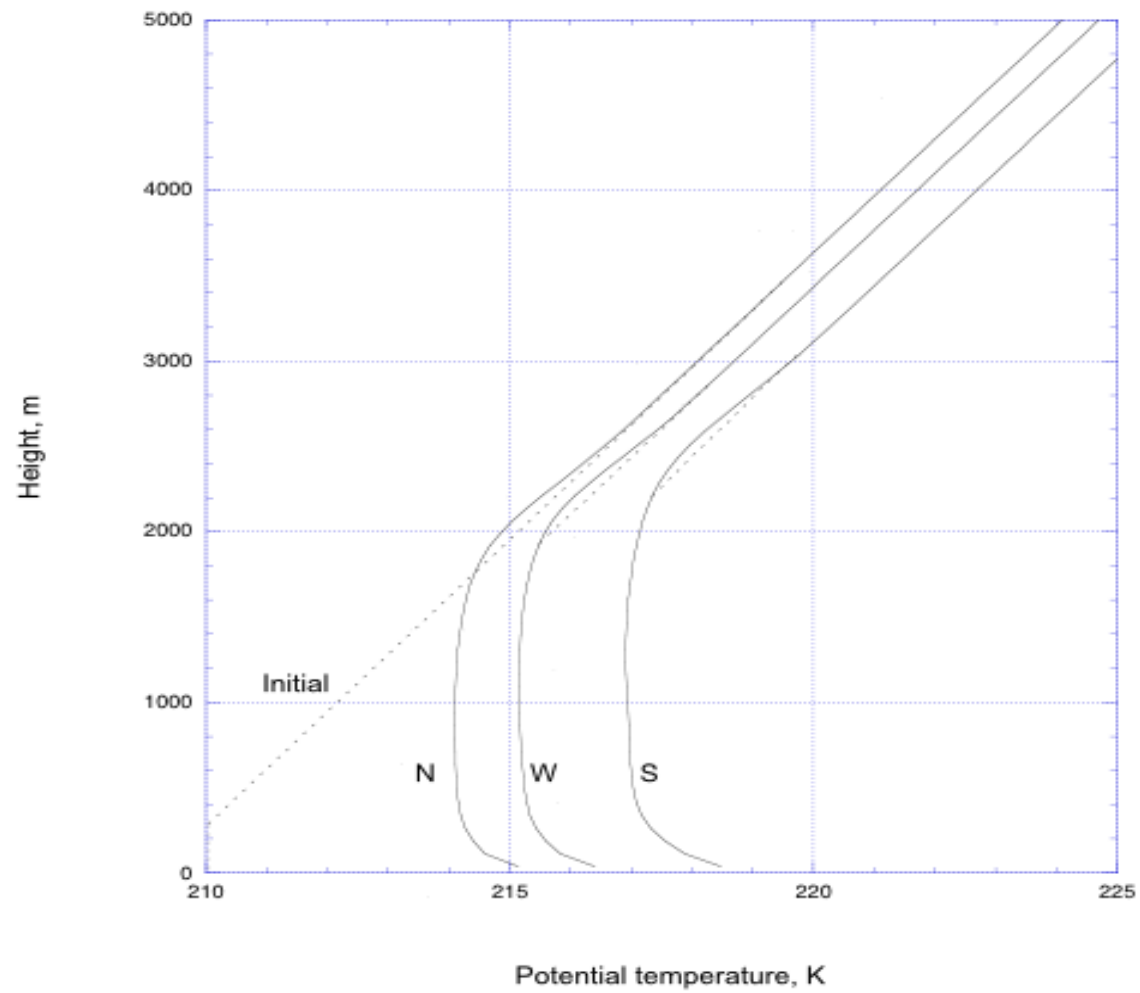
$$F = \frac{\int_0^{z_i} \overline{Q}_{turb} dz}{\int_0^{z_i} \overline{Q}_{rad} dz} = 1 + \frac{1}{H_0} \frac{\int_0^{z_i} \overline{Q}_{turb} dz}{\int_0^{z_i} \overline{Q}_{rad} dz} \quad (1)$$

$$w_* = (\beta z_i H_0)^{1/3}$$

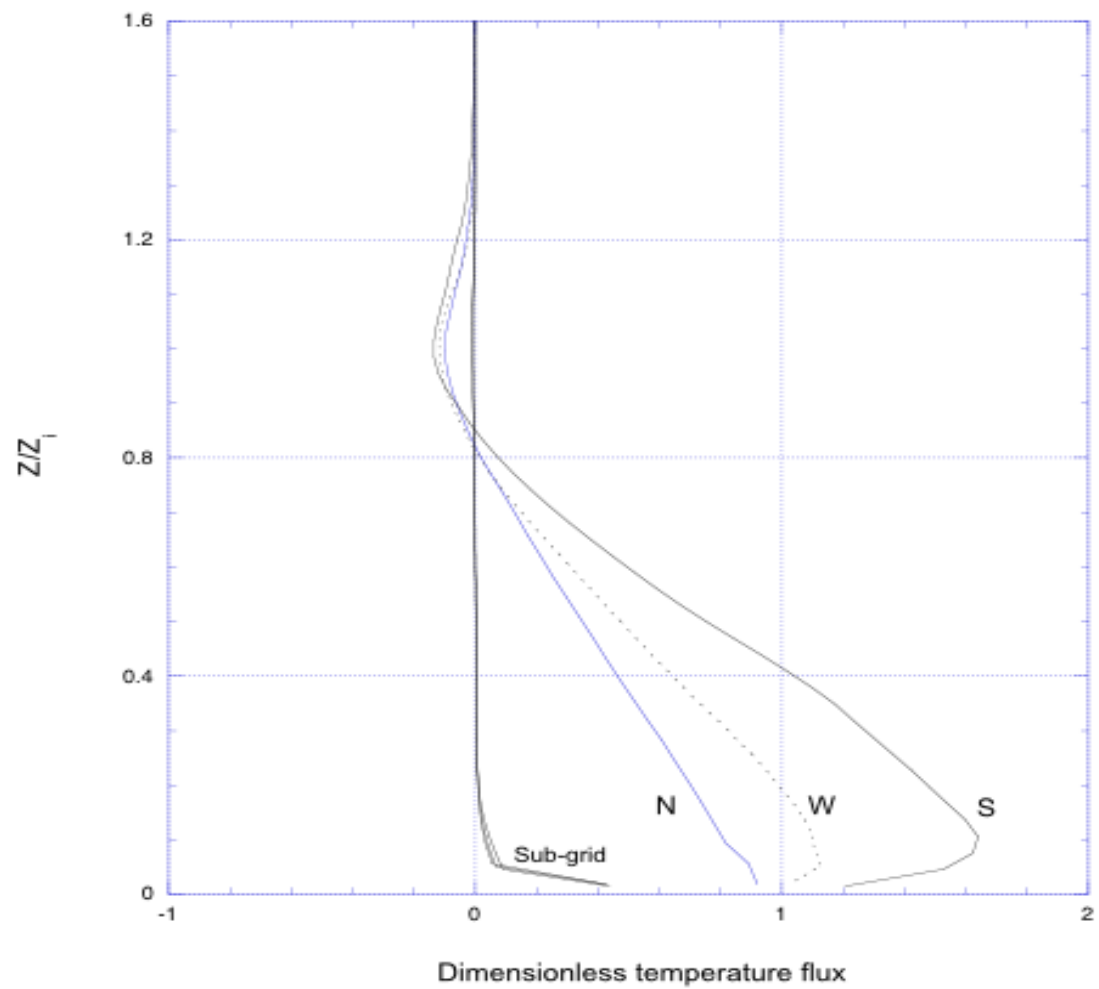
$$\Theta_* = H_0 / w_*$$

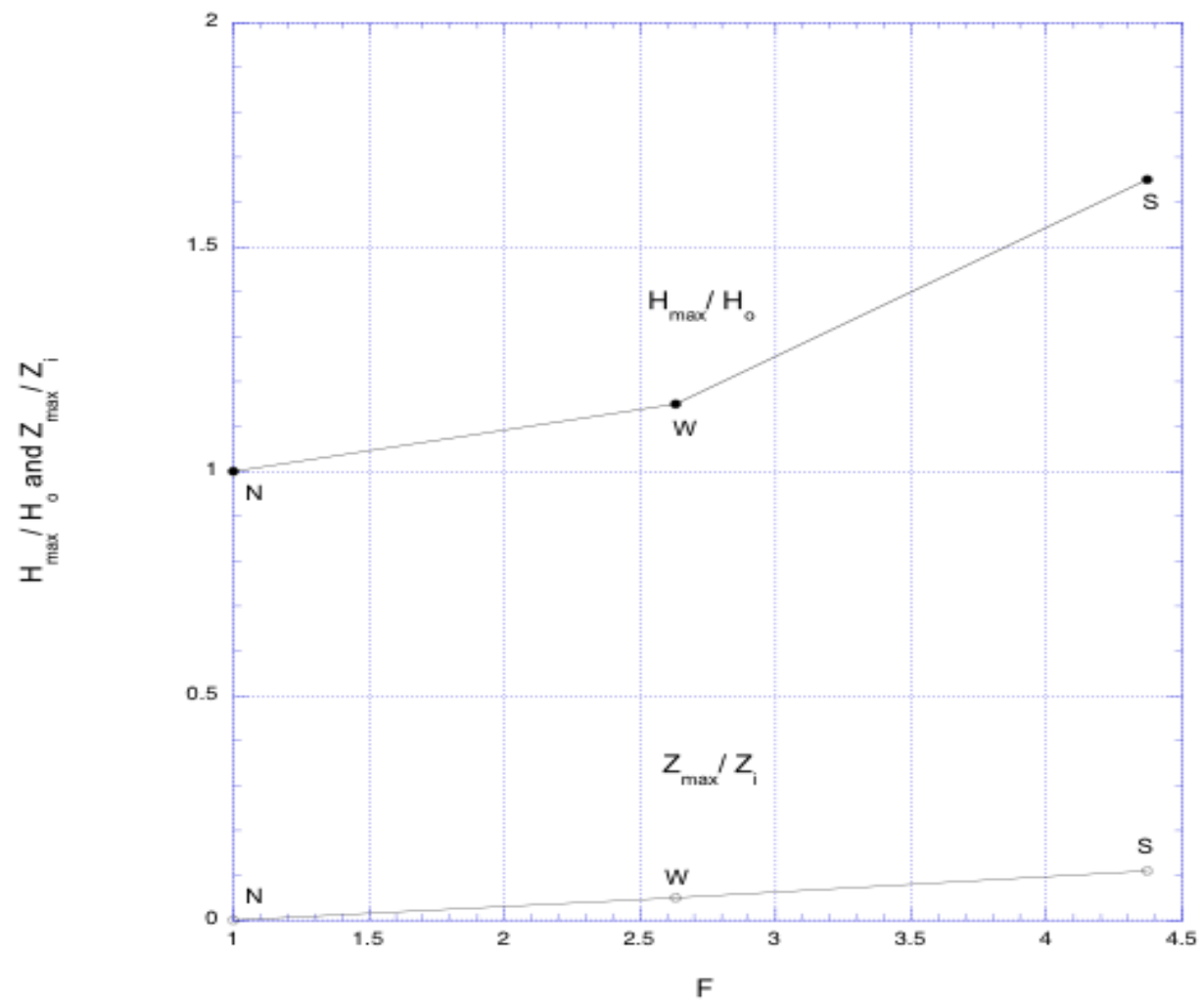
TABLE 2. Parameters of the simulated cases averaged over the last 100 time steps.

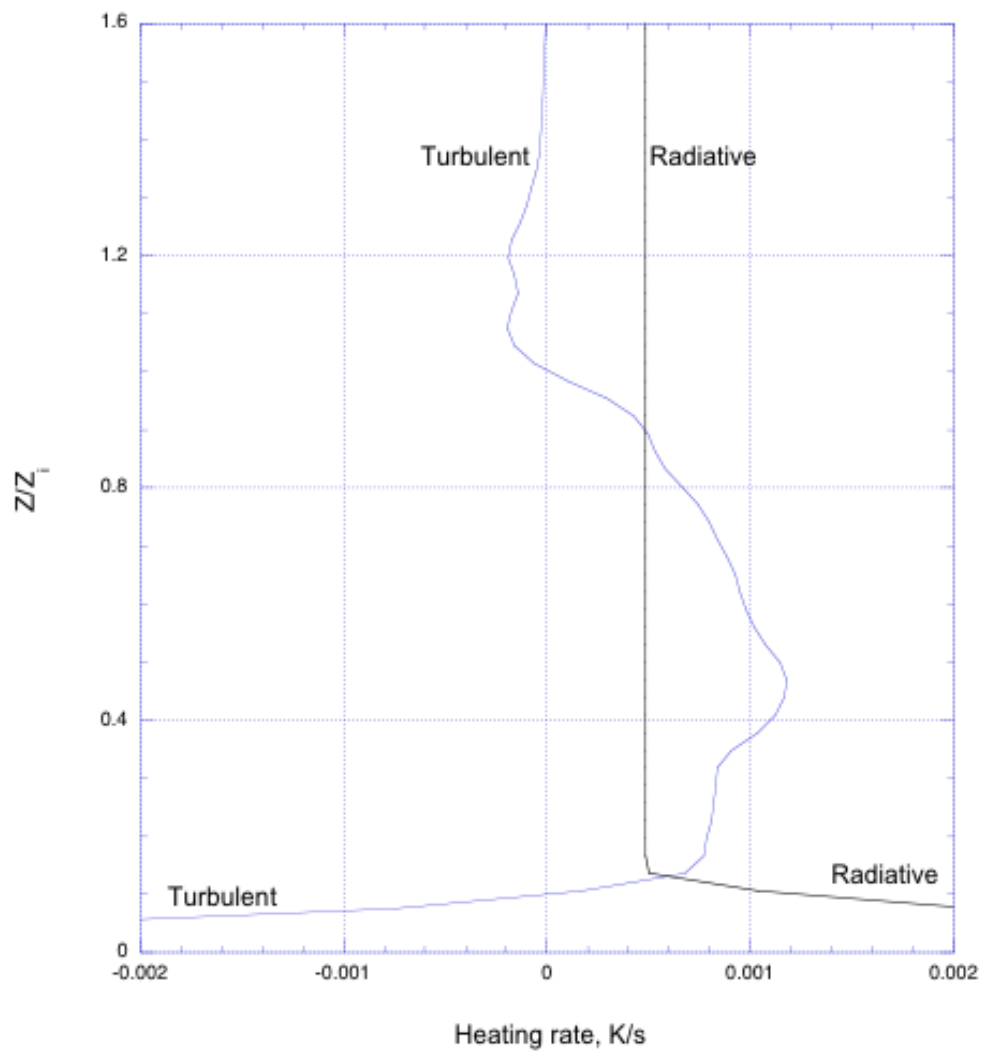
Runs	$F$	$\Theta_*$ [K]	$w_*$ [ $\mu \sigma^{-1}$ ]	$\zeta$ [ $\mu$ ]	$\zeta_\mu$ [ $\mu$ ]	$\zeta_\tau$ [ $\mu$ ]	$T_\varepsilon$ [ $\sigma$ ]	$T_\sigma$ [ $\sigma$ ]
N	1.00	0.305	3.28	1996.4	2287.5	2515.5	608.7	12598.5
$\Omega$	2.63	0.296	3.38	2185.3	2437.5	2662.5	646.5	11344.2
$\Sigma$	4.37	0.284	3.52	2476.9	2812.5	3412.5	703.7	9955.0

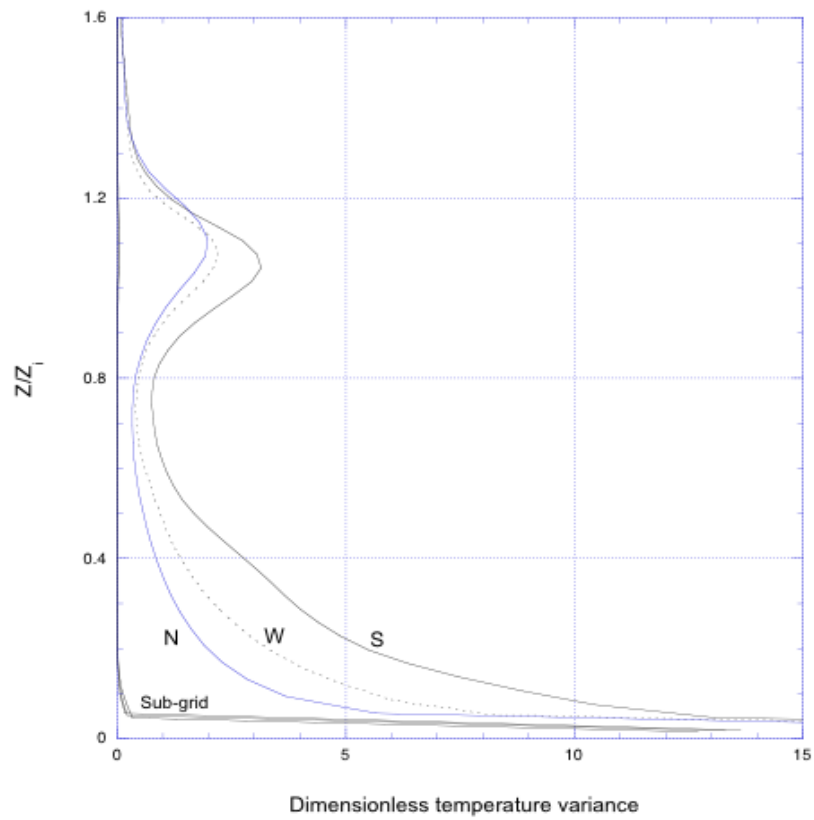


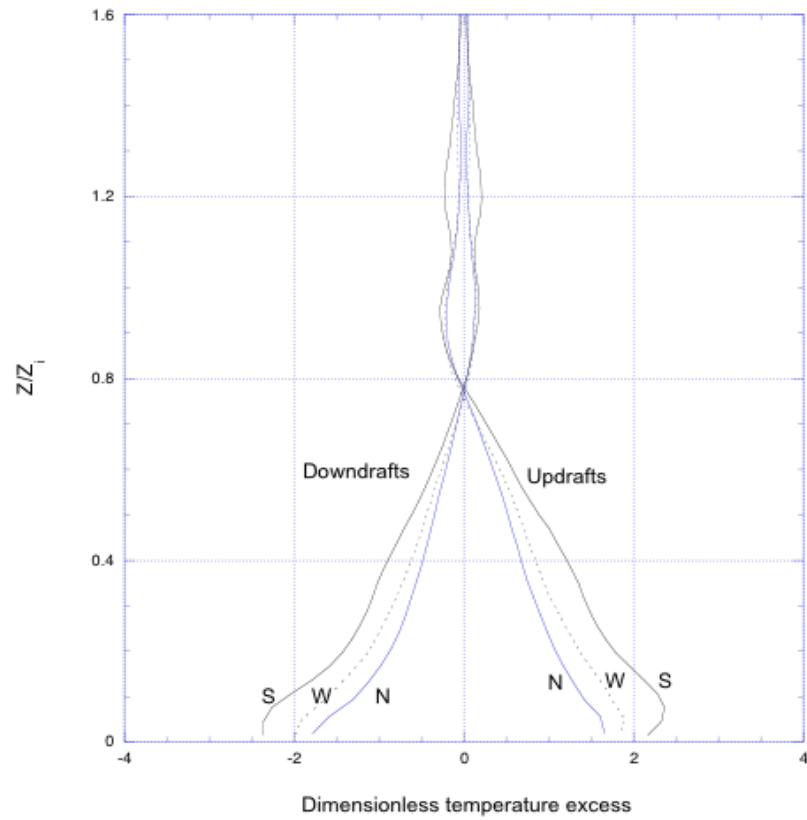


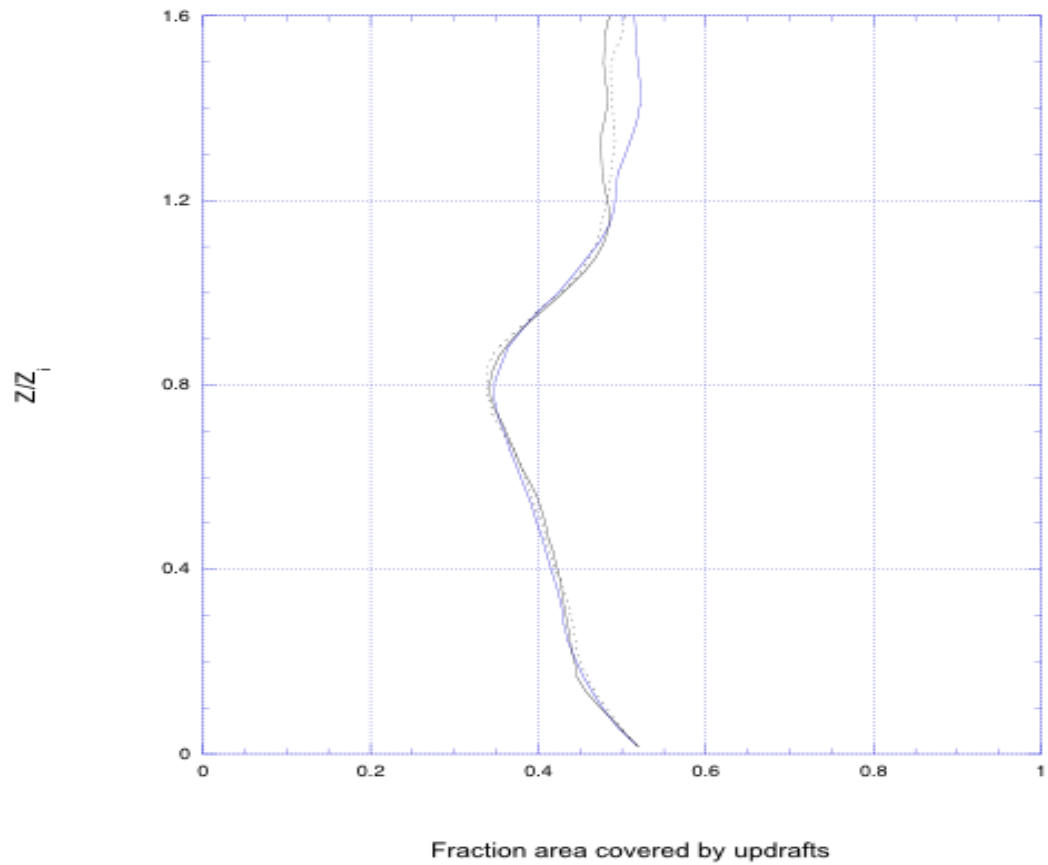


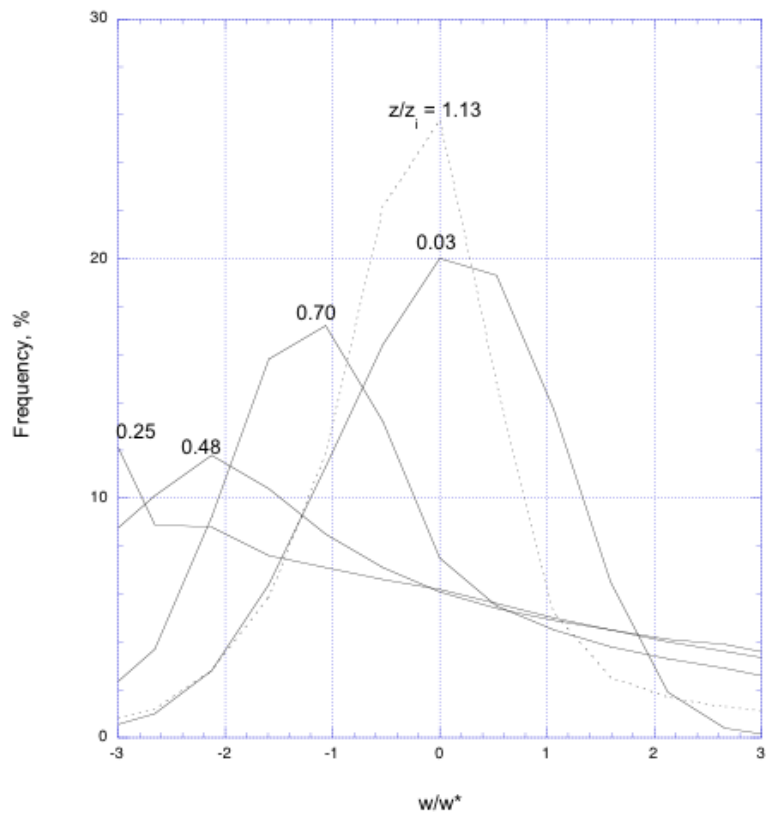


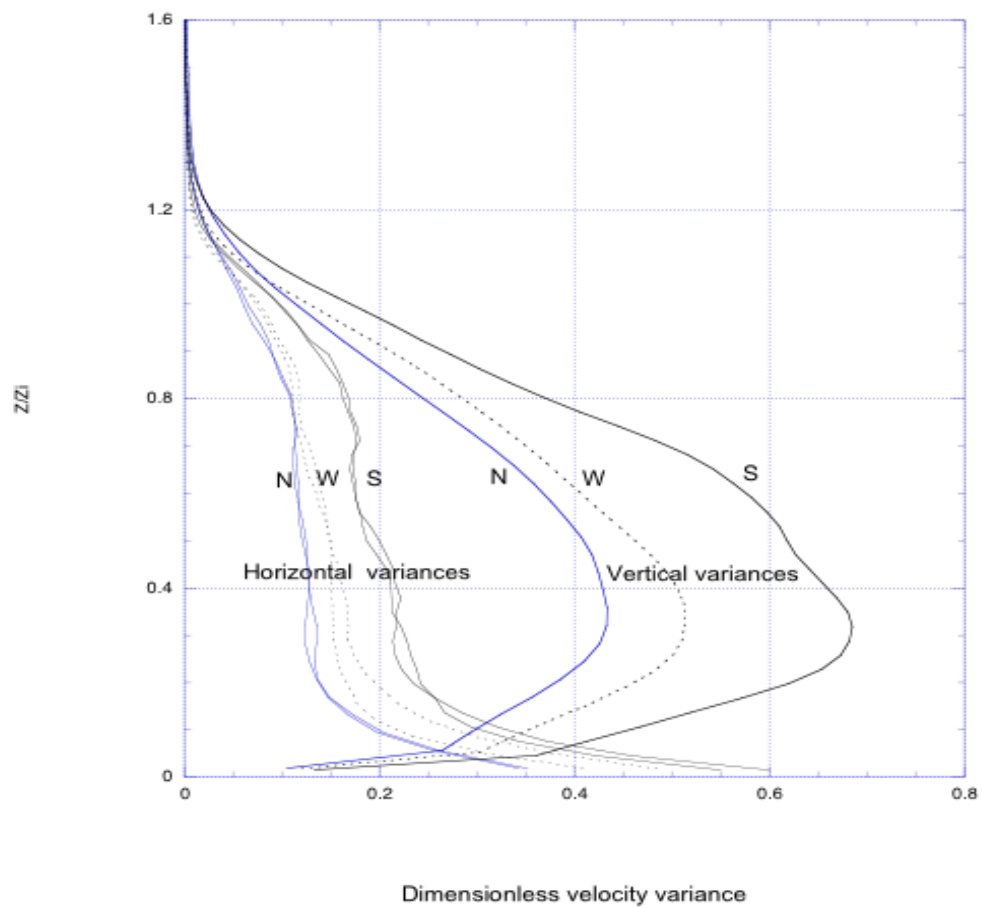




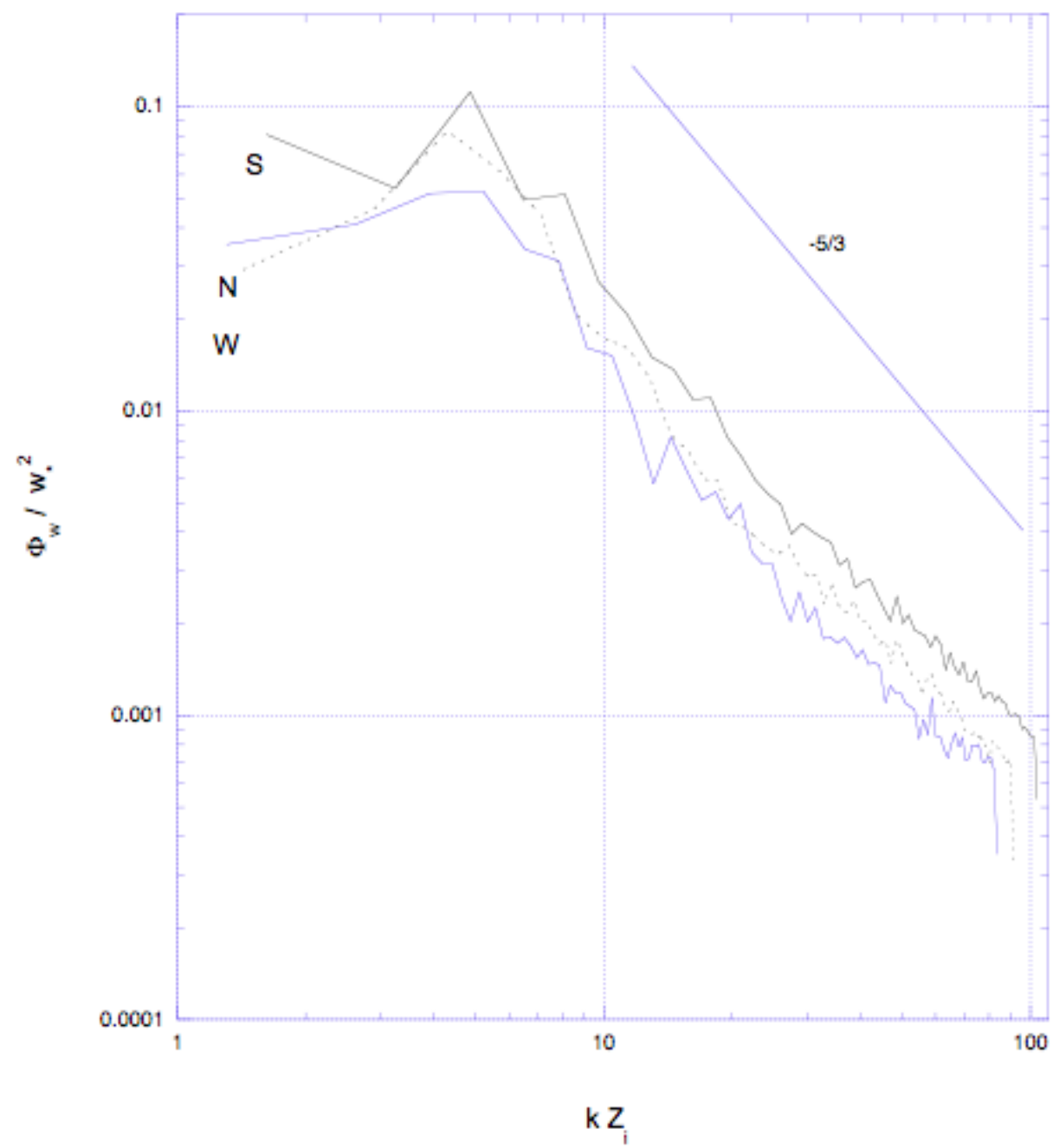




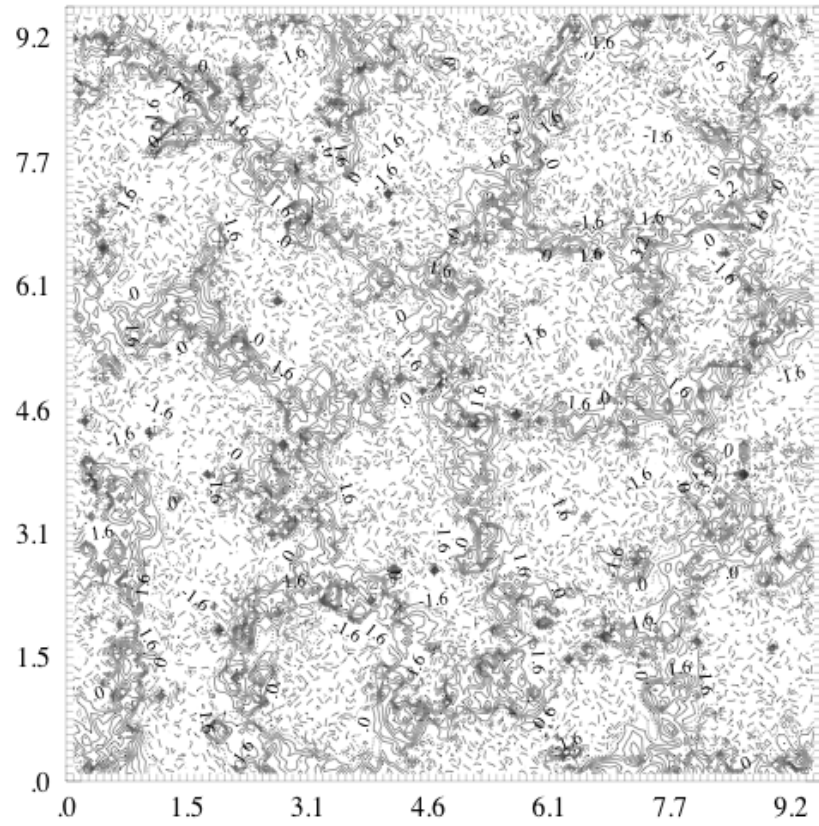


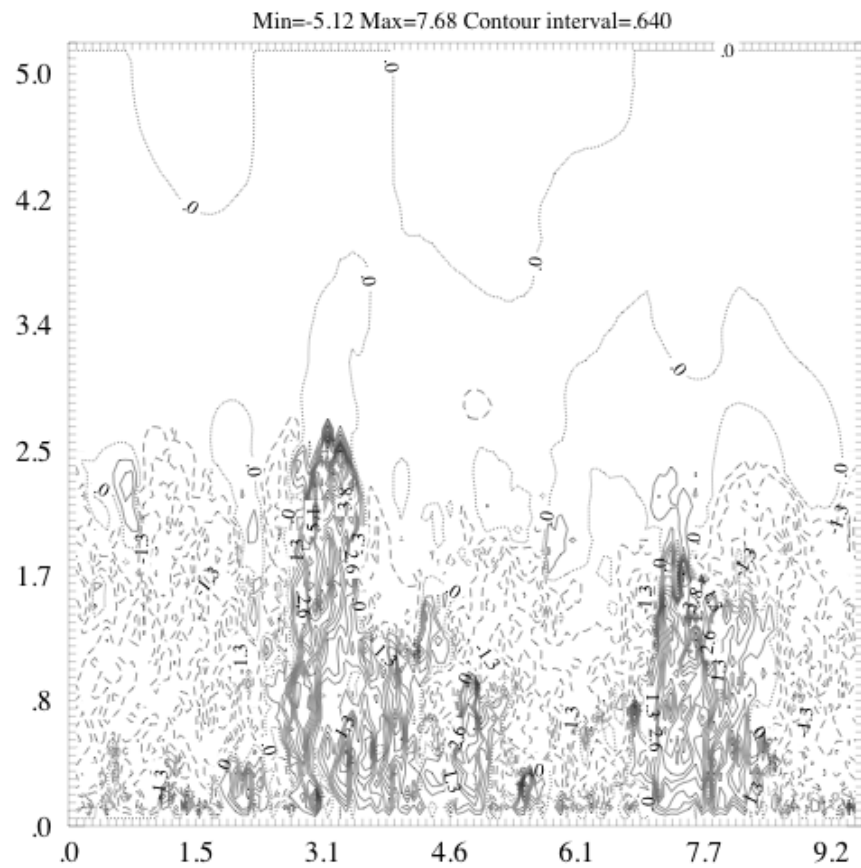




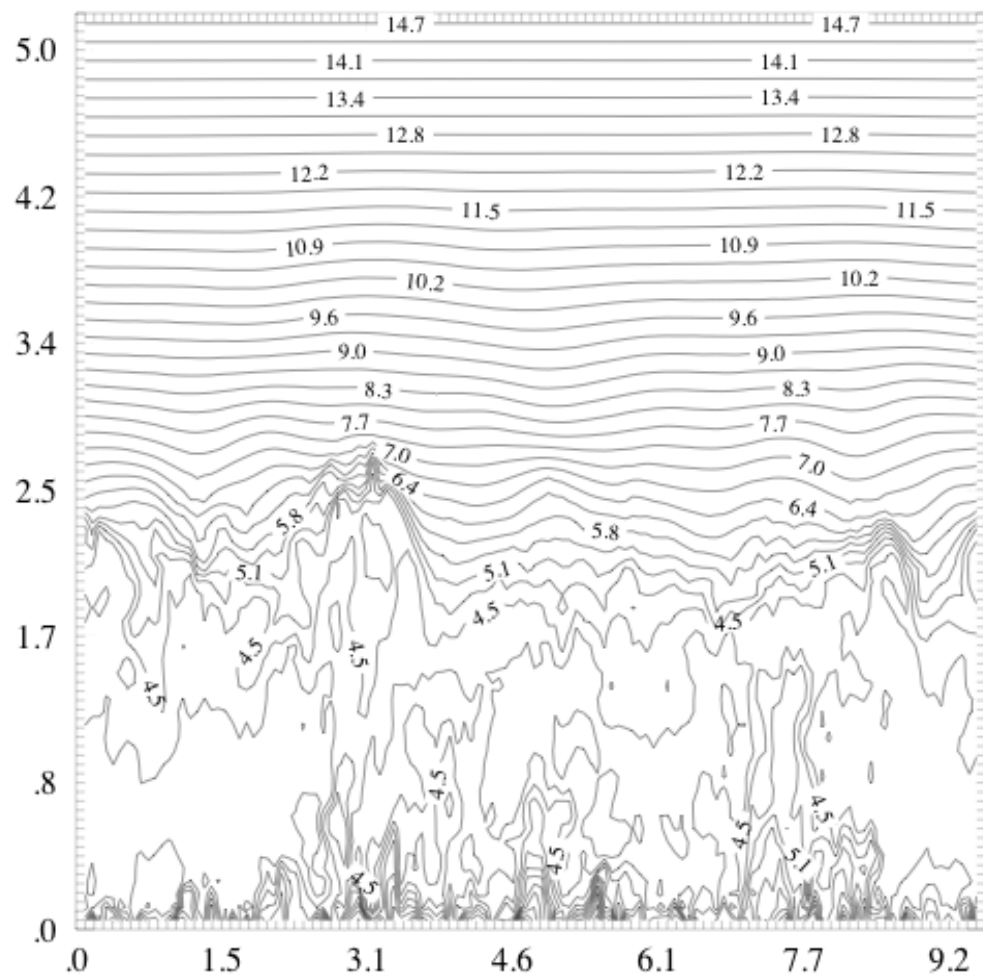


Min=-4.80 Max=7.20 Contour interval=.800

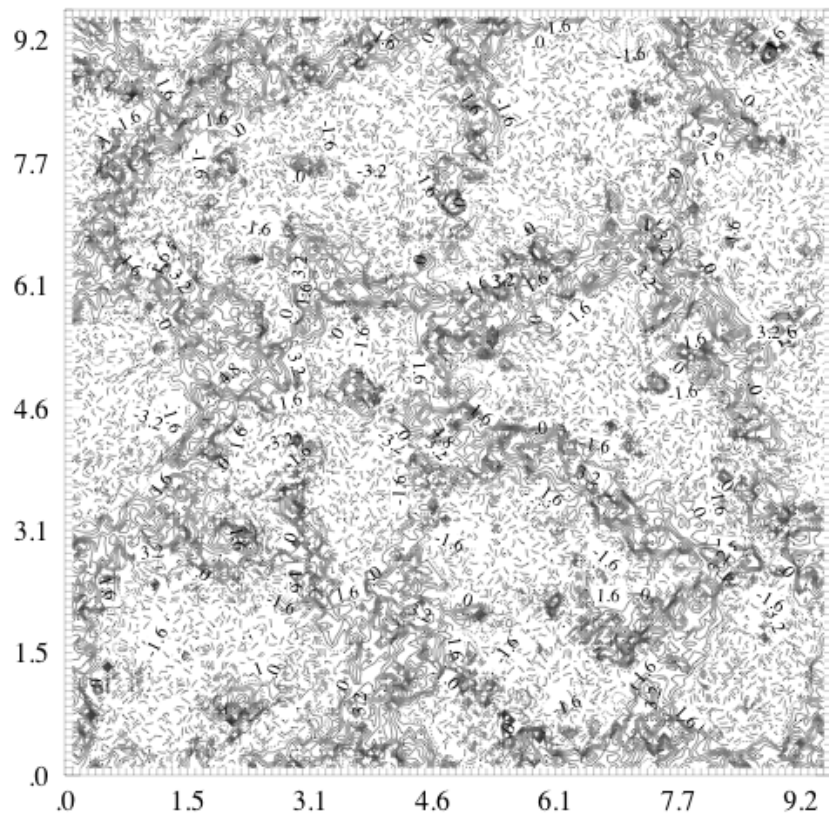




Min=2.88 Max=14.7 Contour interval=.320

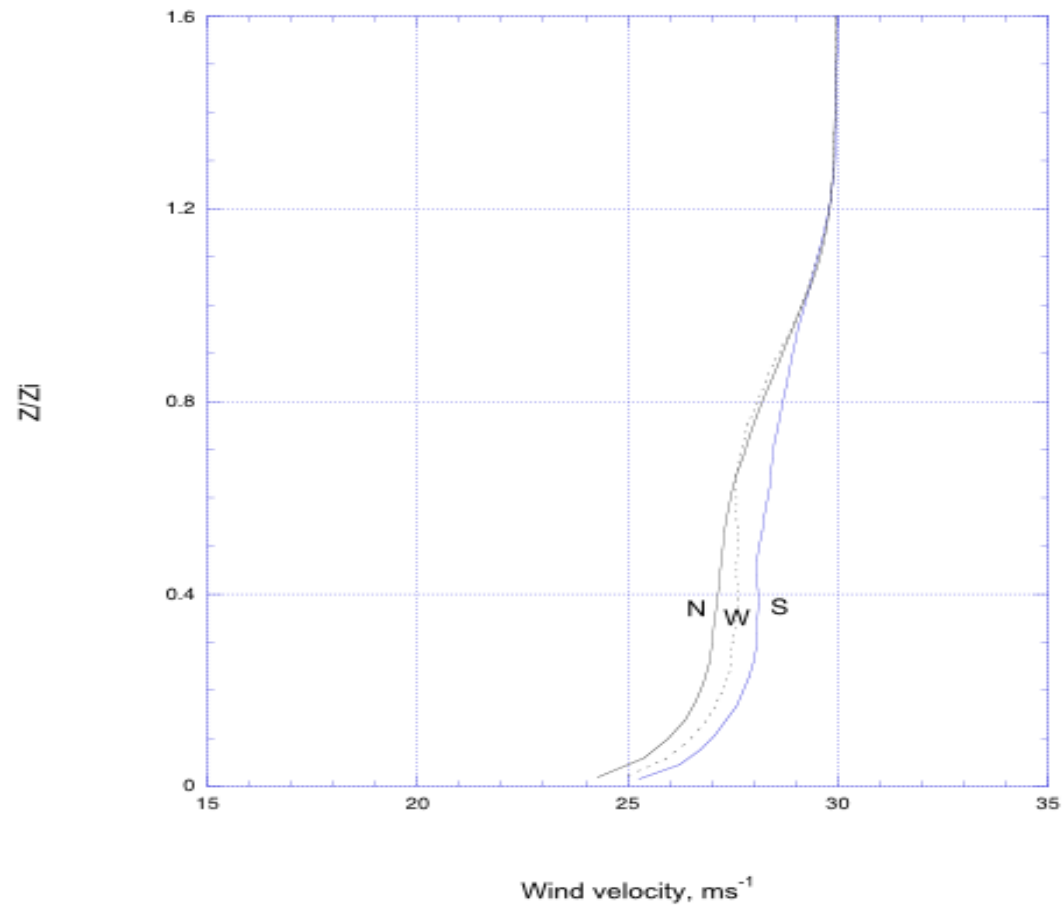


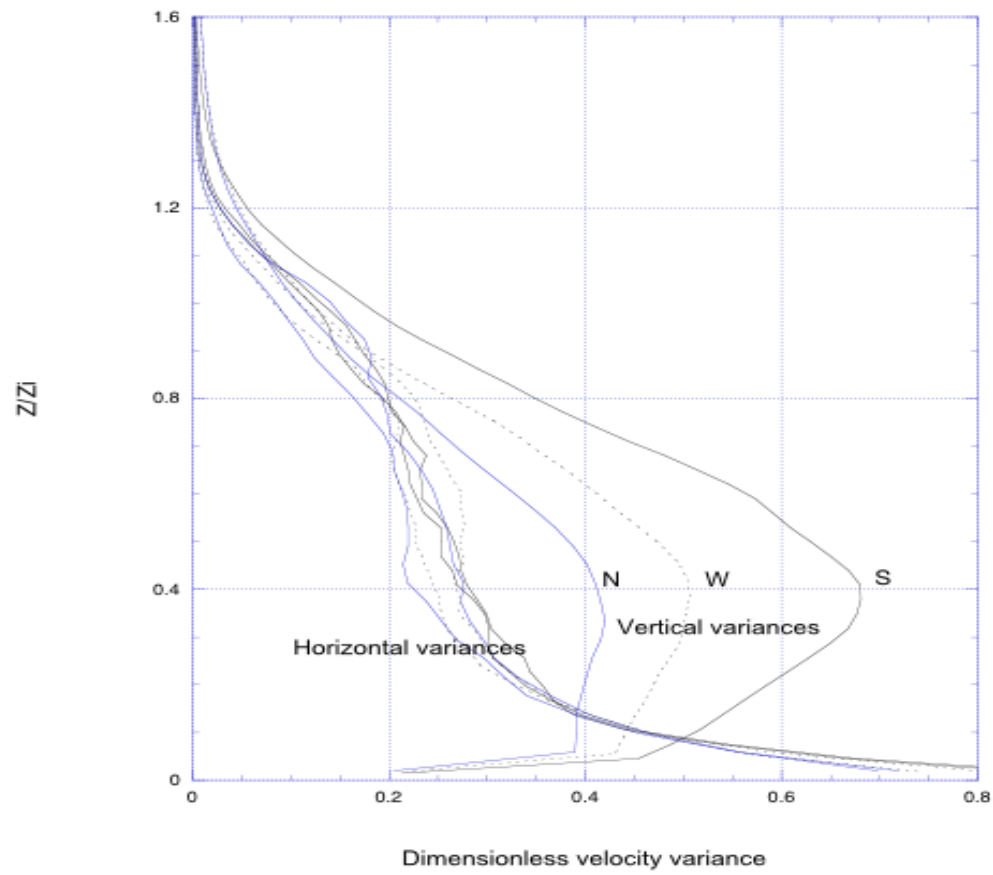
Min=-6.40 Max=8.80 Contour interval=.800





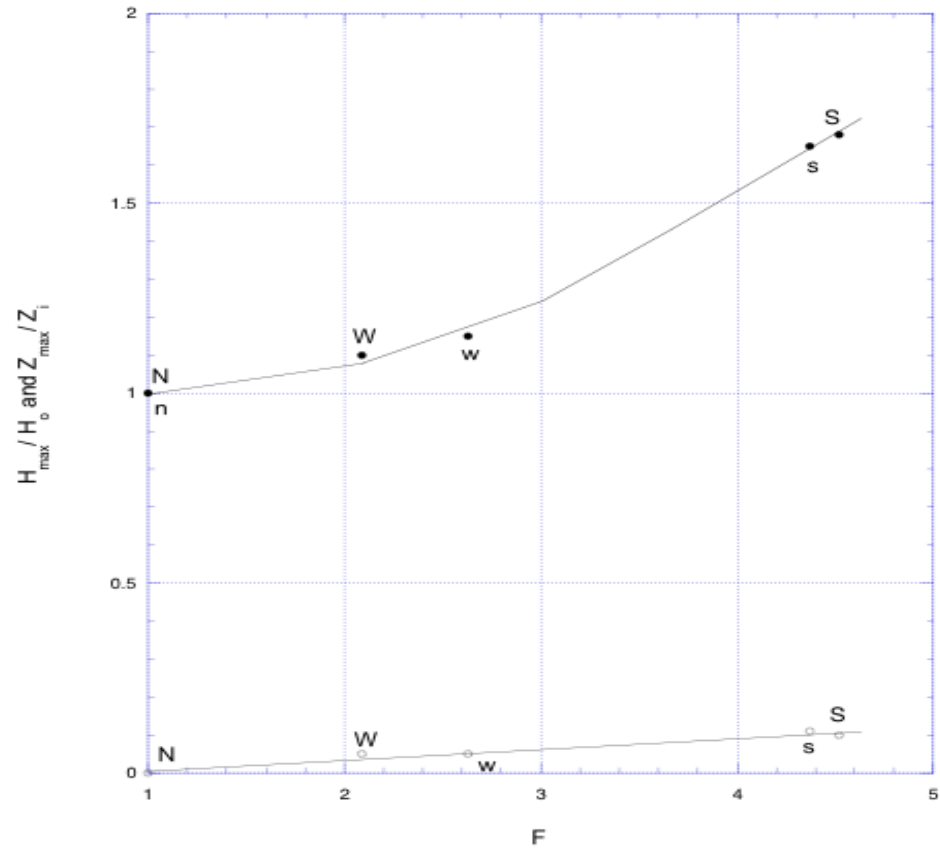
*konwekcji wymuszona*

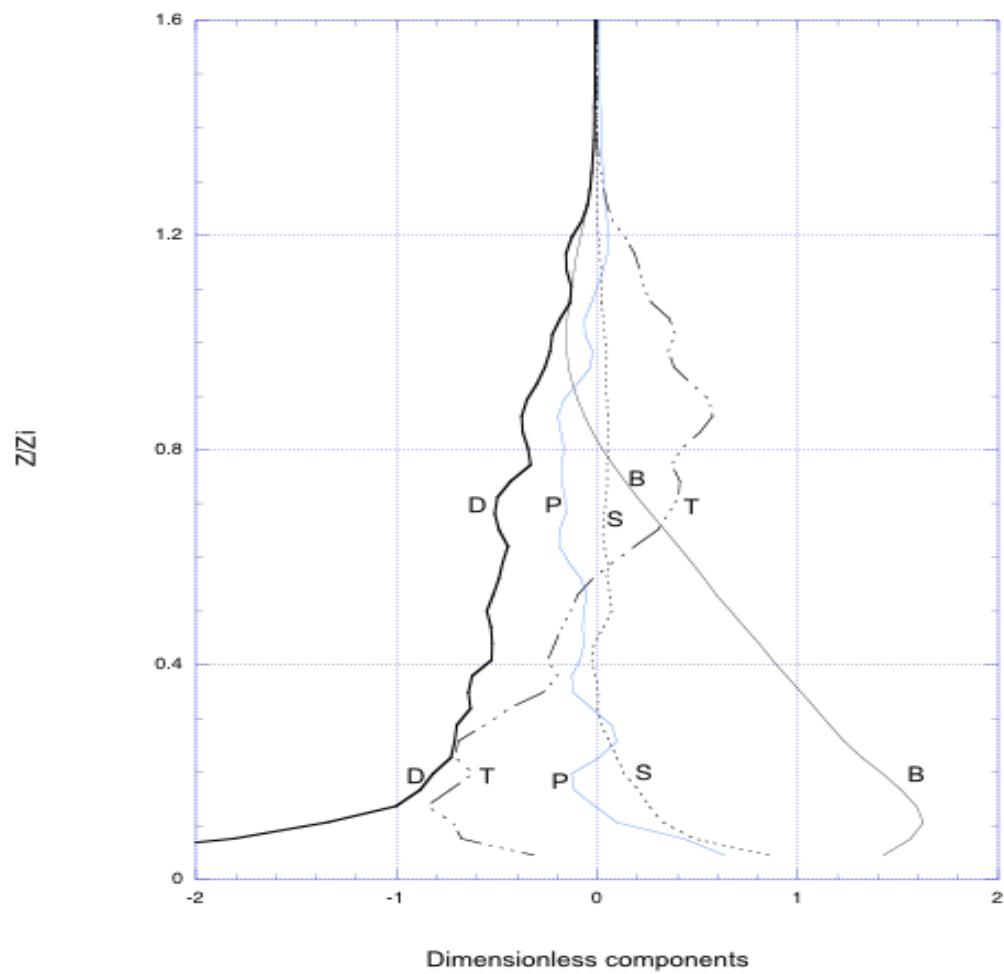




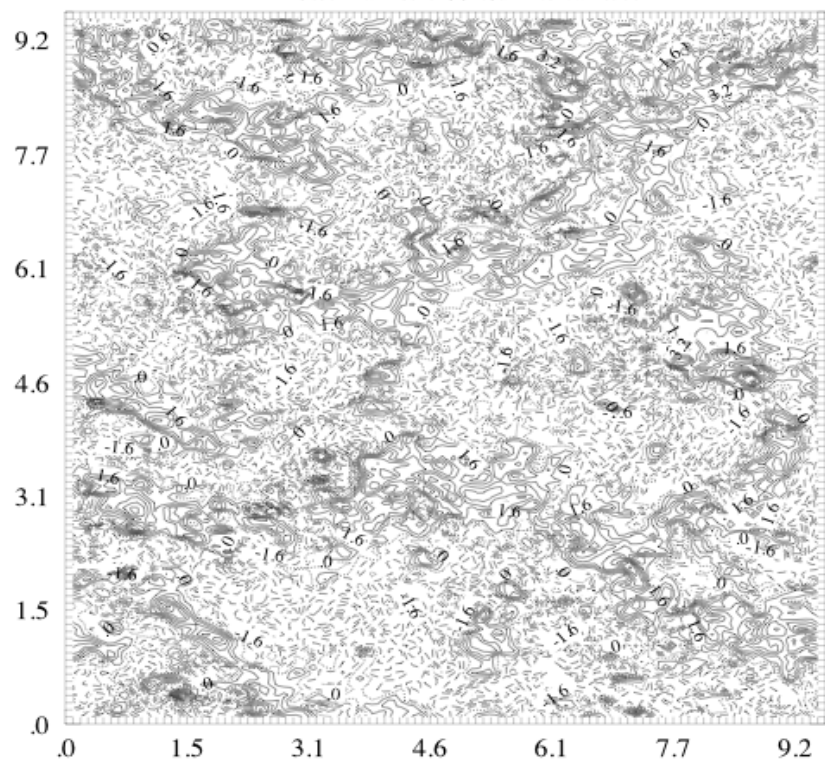


Data 14

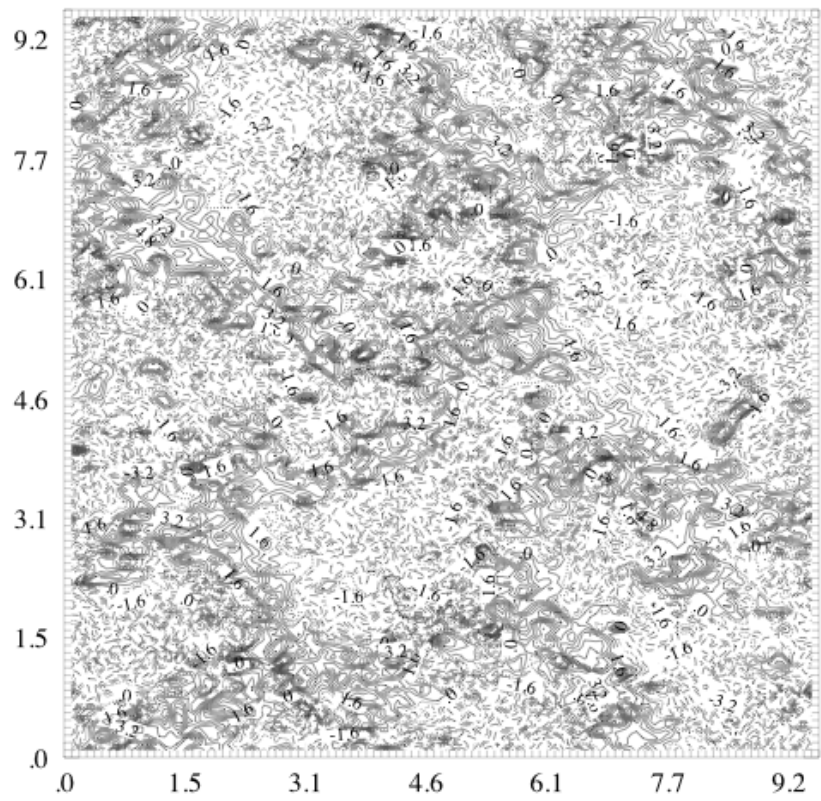




Min=-5.60 Max=6.40 Contour interval=.800



Min=-9.60 Max=8.80 Contour interval=.800



# Wnioski końcowe:

1. Statystyki turbulencji w warunkach bezwietrznych i wietrznych generalnie nie różnią się znacznie (zarówno na Ziemi jak i Marsie),
2. Komórki cyrkulacyjne powstają, kiedy grzanie radiacyjne jest odpowiednio silne (na Marsie niezależnie od prędkości wiatru).
3. Jeśli grzanie radiacyjne jest słabsze (np. wczesnie rano na Marsie), a wiatr odpowiednio silny, powstają rolki,
4. Wpływ strumienia ciepła przy gruncie na Marsie (w stosunku do grzania radiacyjnego powyżej) jest istotny.

# Wnioski końcowe:

1. Statystyki turbulencji w warunkach bezwietrznych i wietrznych generalnie nie różnią się znacznie (zarówno na Ziemi jak i Marsie),
2. Komórki cyrkulacyjne powstają, kiedy grzanie radiacyjne jest odpowiednio silne (na Marsie niezależnie od prędkości wiatru).
3. Jeśli grzanie radiacyjne jest słabsze (np. wczesnie rano na Marsie), a wiatr odpowiednio silny, powstają rolki,
4. Wpływ strumienia ciepła przy gruncie na Marsie (w stosunku do grzania radiacyjnego powyżej) jest istotny.

# Wnioski końcowe:

1. Statystyki turbulencji w warunkach bezwietrznych i wietrznych generalnie nie różnią się znacznie (zarówno na Ziemi jak i Marsie),
2. Komórki cyrkulacyjne powstają, kiedy grzanie radiacyjne jest odpowiednio silne (na Marsie niezależnie od prędkości wiatru).
3. Jeśli grzanie radiacyjne jest słabsze (np. wczesnie rano na Marsie), a wiatr odpowiednio silny, powstają rolki,
4. Wpływ strumienia ciepła przy gruncie na Marsie (w stosunku do grzania radiacyjnego powyżej) jest istotny.

# Wnioski końcowe:

1. Statystyki turbulencji w warunkach bezwietrznych i wietrznych generalnie nie różnią się znacznie (zarówno na Ziemi jak i Marsie),
2. Komórki cyrkulacyjne powstają, kiedy grzanie radiacyjne jest odpowiednio silne (na Marsie niezależnie od prędkości wiatru).
3. Jeśli grzanie radiacyjne jest słabsze (np. wczesnie rano na Marsie), a wiatr odpowiednio silny, powstają rolki,
4. Wpływ strumienia ciepła przy gruncie na Marsie (w stosunku do grzania radiacyjnego powyżej) jest istotny.





*Koniec*