

Численное моделирование мезомасштабных атмосферных процессов

Задачи

Atmospheric forcing for the Black Sea circulation models

- 1. Operative forecast
- 2. Regional reanalysis
- 3. Case studies

Science

- 4. Study mesoscale phenomena

Other applications

- 5. wind power stations
- 6. aviation
- 7. air pollution etc.

Оперативный 5-суточный прогноз погоды над Черным морем

21Z06SEP2009

10m wind, m/s

<http://hydrophys.ru/>

MM5 v.3.7 mesoscale model

www.mmm.ucar.edu/mm5/mm5-home.html

Current resolution 10x10km, 23 levels, [domain](#)

Input data - Global Forecast System -0.5x0.5 [GFS](#)

PARAMETERIZATION SCHEMES:

boundary layer - MRF

soil - 5-layer land surface model

cumulus convection - Grell

radiation - RRTM

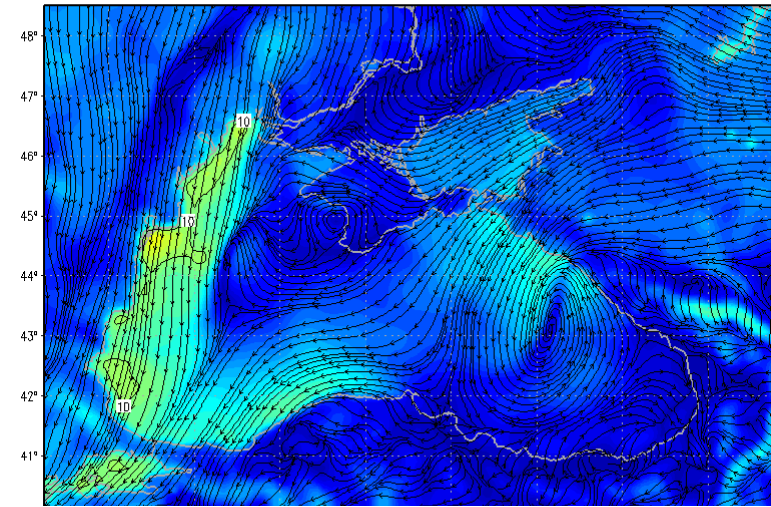
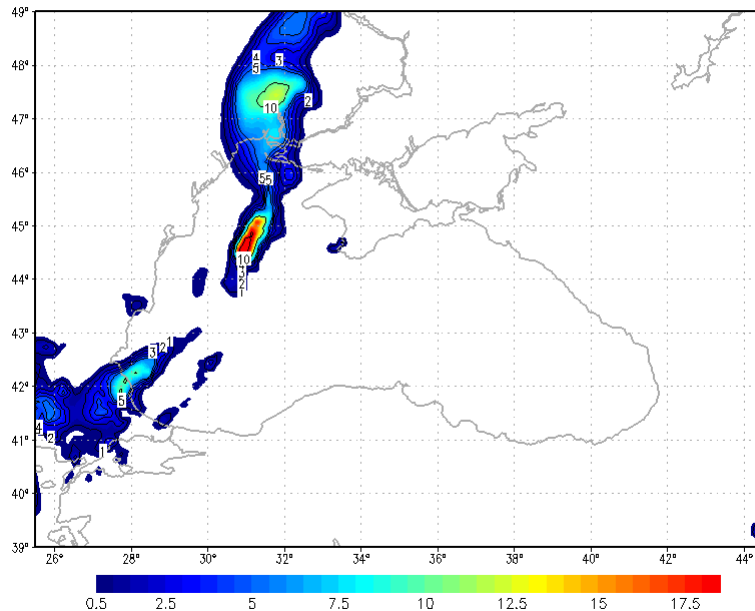
moisture - simple ice

shallow convection - off

Wind wave model - WAM. resolution 10x10km

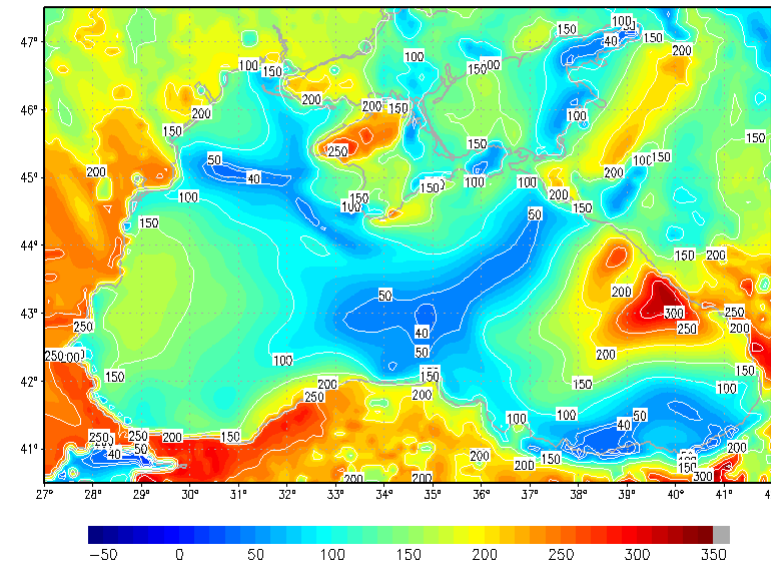
00Z07SEP2009

precipitation rate, mm/3hr



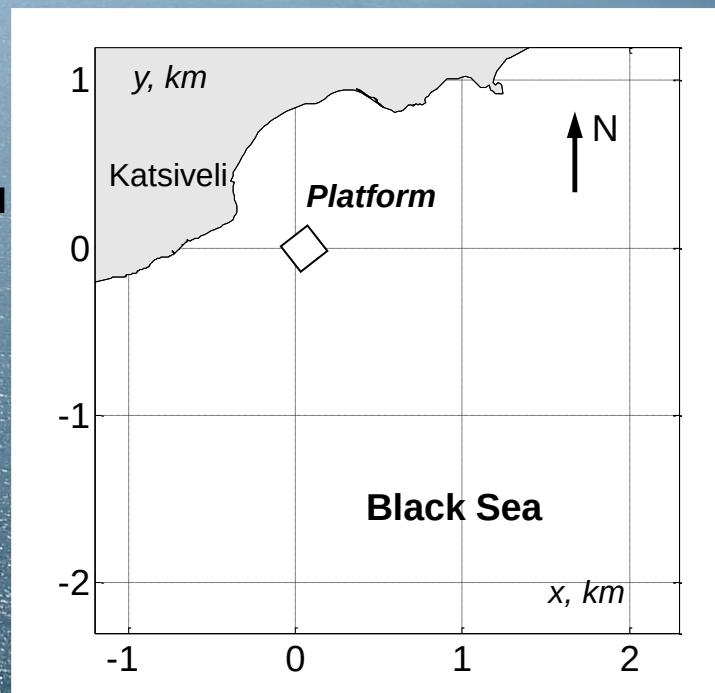
12Z04SEP2009

latent heat flux, W/m2





Расстояние до берега 0.5-1.5 км
Глубина 30 м

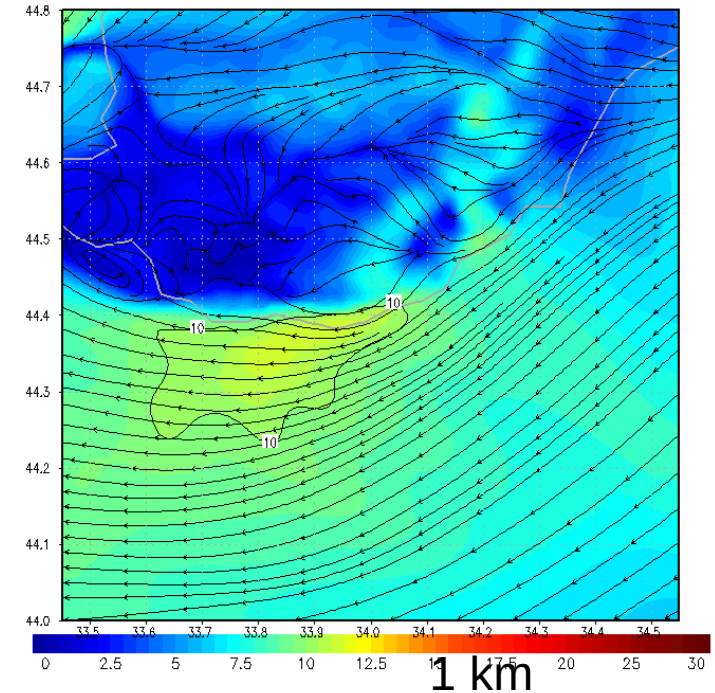


Планирование экспериментов с учетом оперативного метеопрогноза

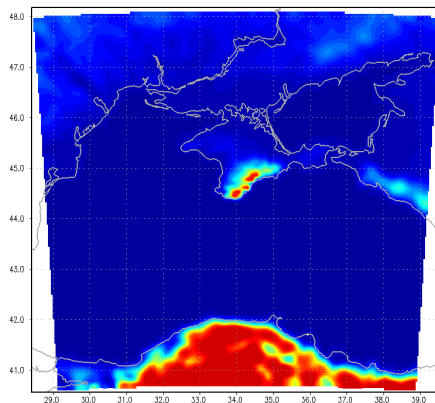
Региональный оперативный прогноз ветровой обстановки над Черным морем на 5 суток регулярно осуществляется в отделе взаимодействия атмосферы и океана МГИ.

11:20Z27SEP2005

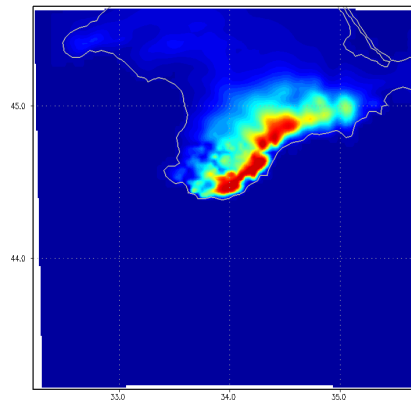
wind 10m



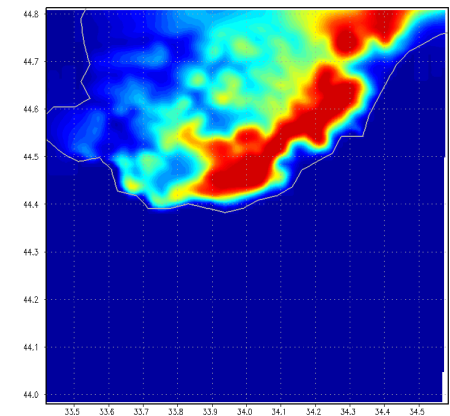
9 km



3 km



1 km



Региональный атмосферный реанализ в Черноморском регионе

- 1) Модель MM5,
2000-2018,
разрешение 18 km,
входные данные – Оперативный глобальный анализ NCEP/NCAR GDAS
- 2) Климатическая региональная атмосферная модель PRECIS,
1959-2002,
разрешение 25 km,
входные данные - ERA-40
- 3) Климатическая региональная атмосферная модель PRECIS,
1979-2015,
разрешение 25 km,
входные данные - ERA-Interim

Mesoscale phenomena

- Land-sea breeze
- Tropical cyclones, medicanes, polar lows

Orography

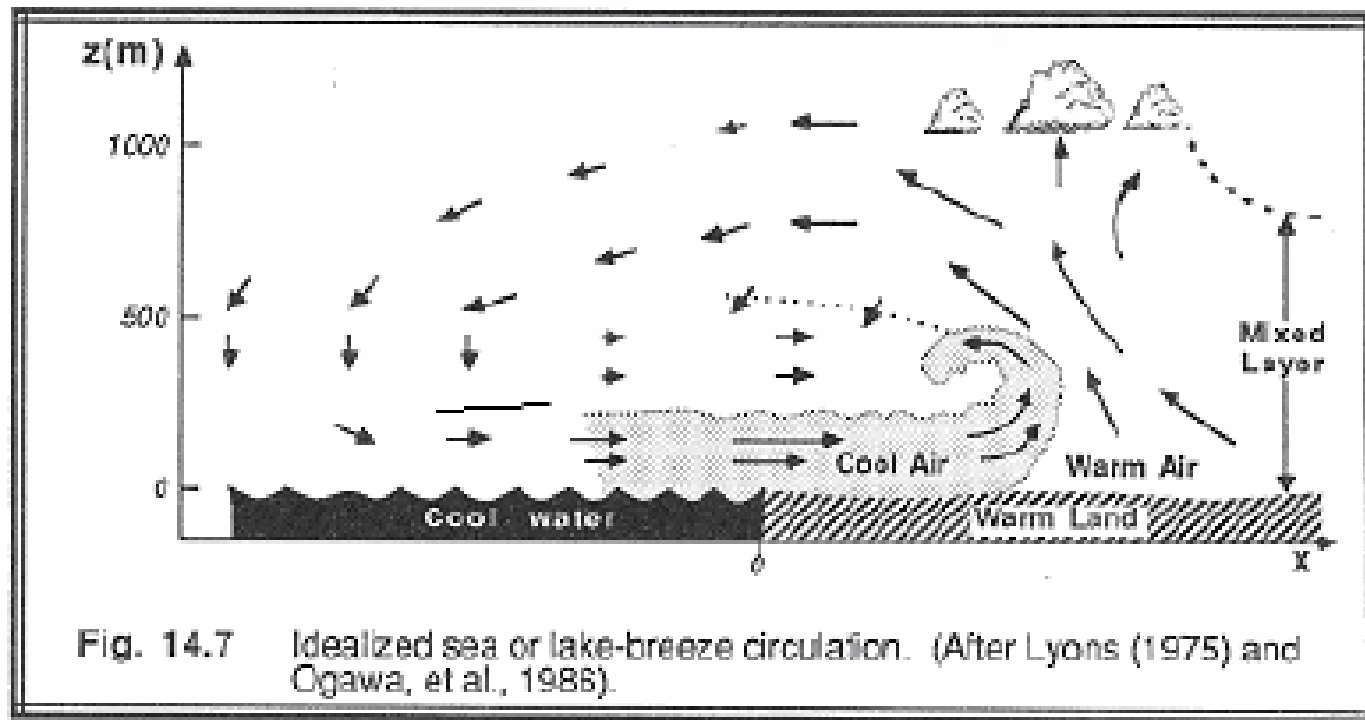
- Lee waves
- Downslope winds
- Lee vortices
- Anabatic and katabatic flow
- Drainage flow
- Gap flow

Convection

- Single cell storms
- Squall line
- Multicell storms
- Supercell storms
- Mesoscale convective complex
- Mesoscale convective vortex

Бризовая циркуляция

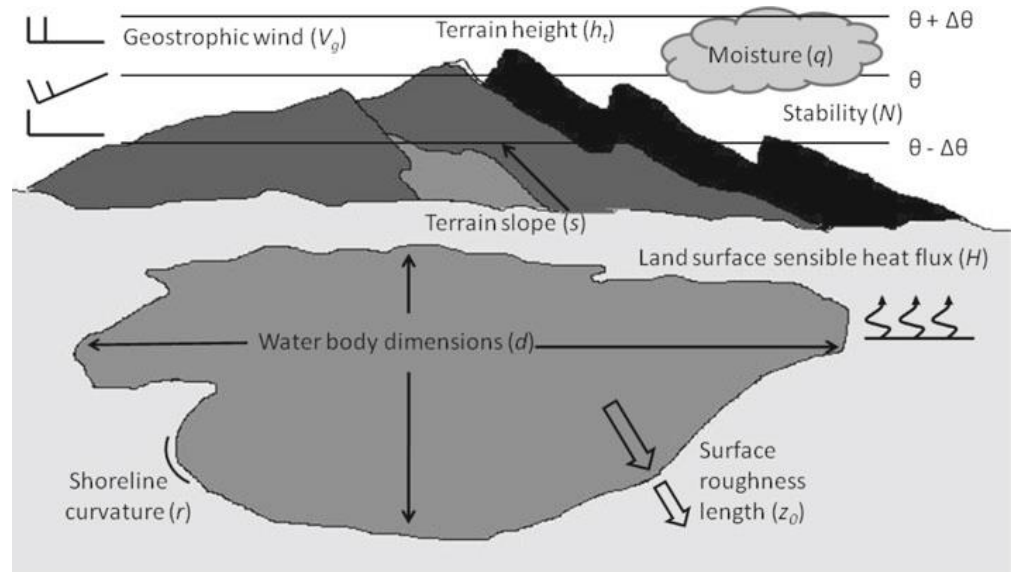
Land-sea breeze



Sea breeze depends on
10 key geophysical parameters

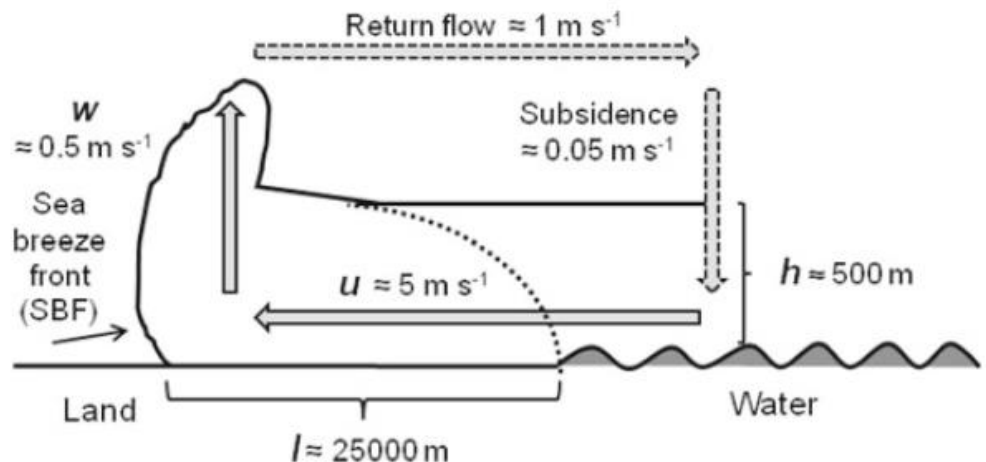
Sensible heat flux	H
Geostrophic wind	V_g
Atmospheric stability	N
Atmospheric moisture	q
Water body dimension	d
Terrain height	h_t
Terrain slope	s
Coriolis parameter	f
Roughness length	z_0
Shoreline curvature	r

Input



Output

Horizontal scale	l
Vertical scale	h
Horizontal wind speed	u
Vertical wind speed	w



Линейная теория

Дисперсионное соотношение для инерционно-гравитационных внутренних волн

$$(\omega^2 - f^2)k_z^2 - (N^2 - \omega^2)k_x^2 = 0$$

$$f \leq \omega \leq N$$

-распространяющиеся волны

$$f = 2\omega \sin \phi$$

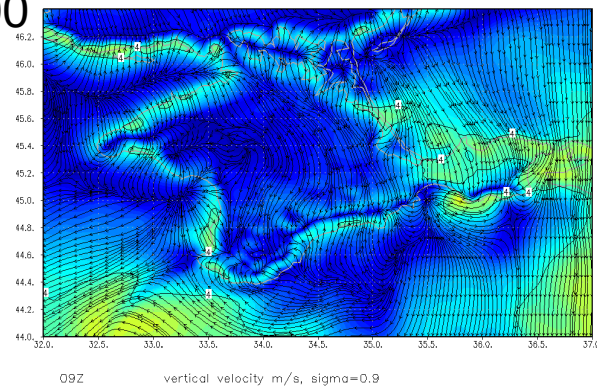
-параметр Кориолиса

Бризовая циркуляция – инерционно-гравитационная волна суточной частоты, генерируемая на поверхности

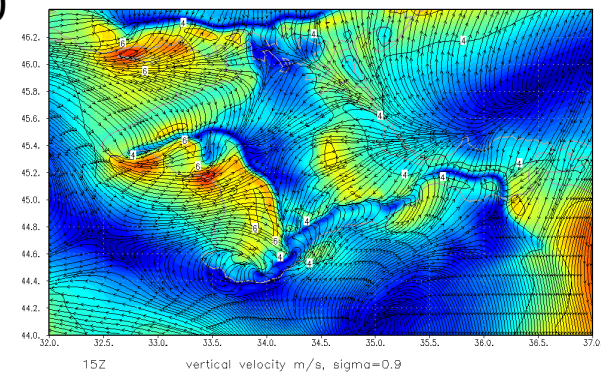
Численное моделирование бризовой циркуляции над Крымом, WRF

Wind speed

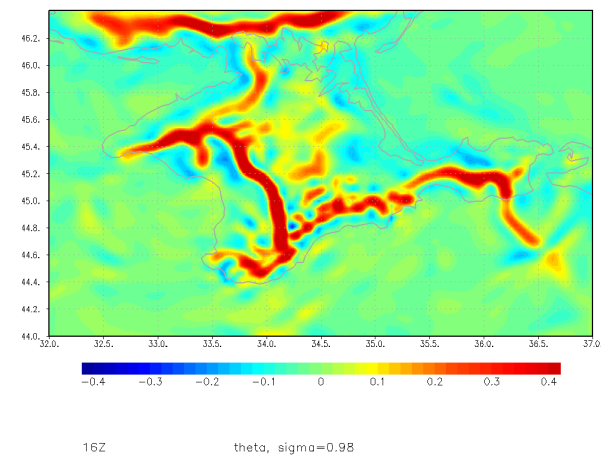
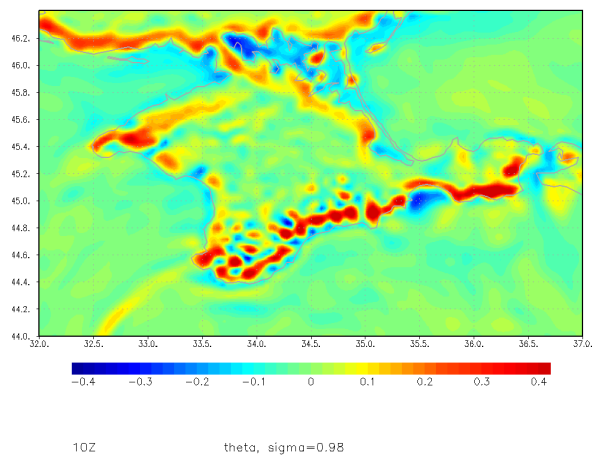
9:00



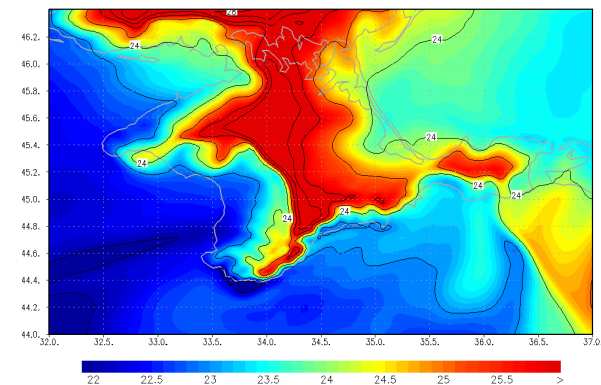
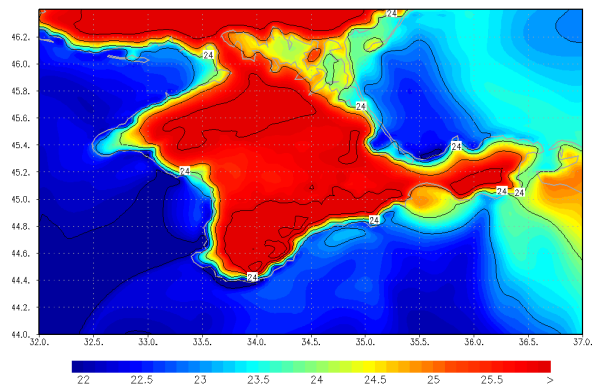
15:00



Vertical velocity



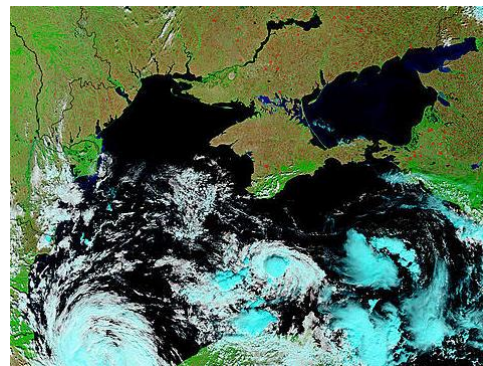
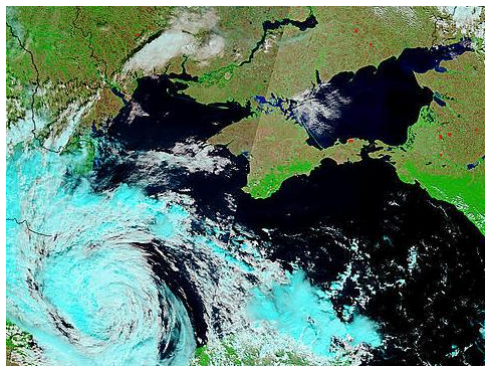
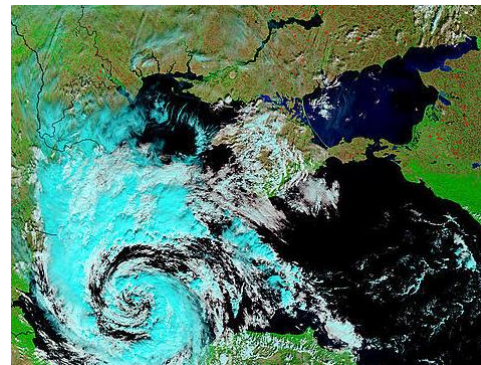
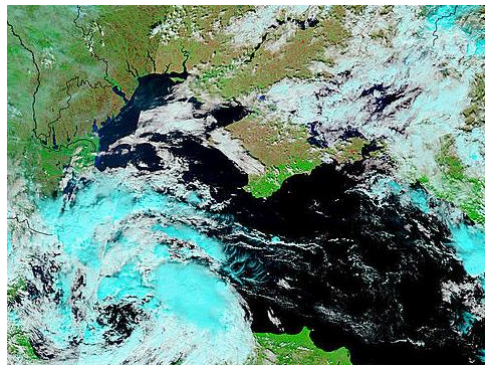
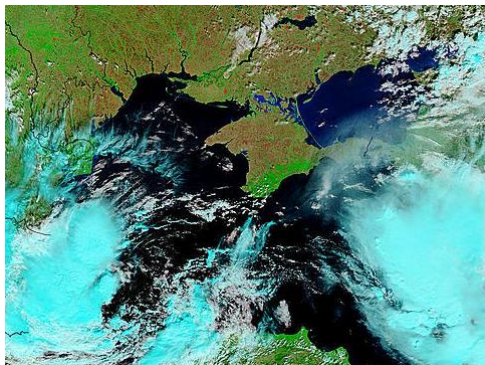
Temperature





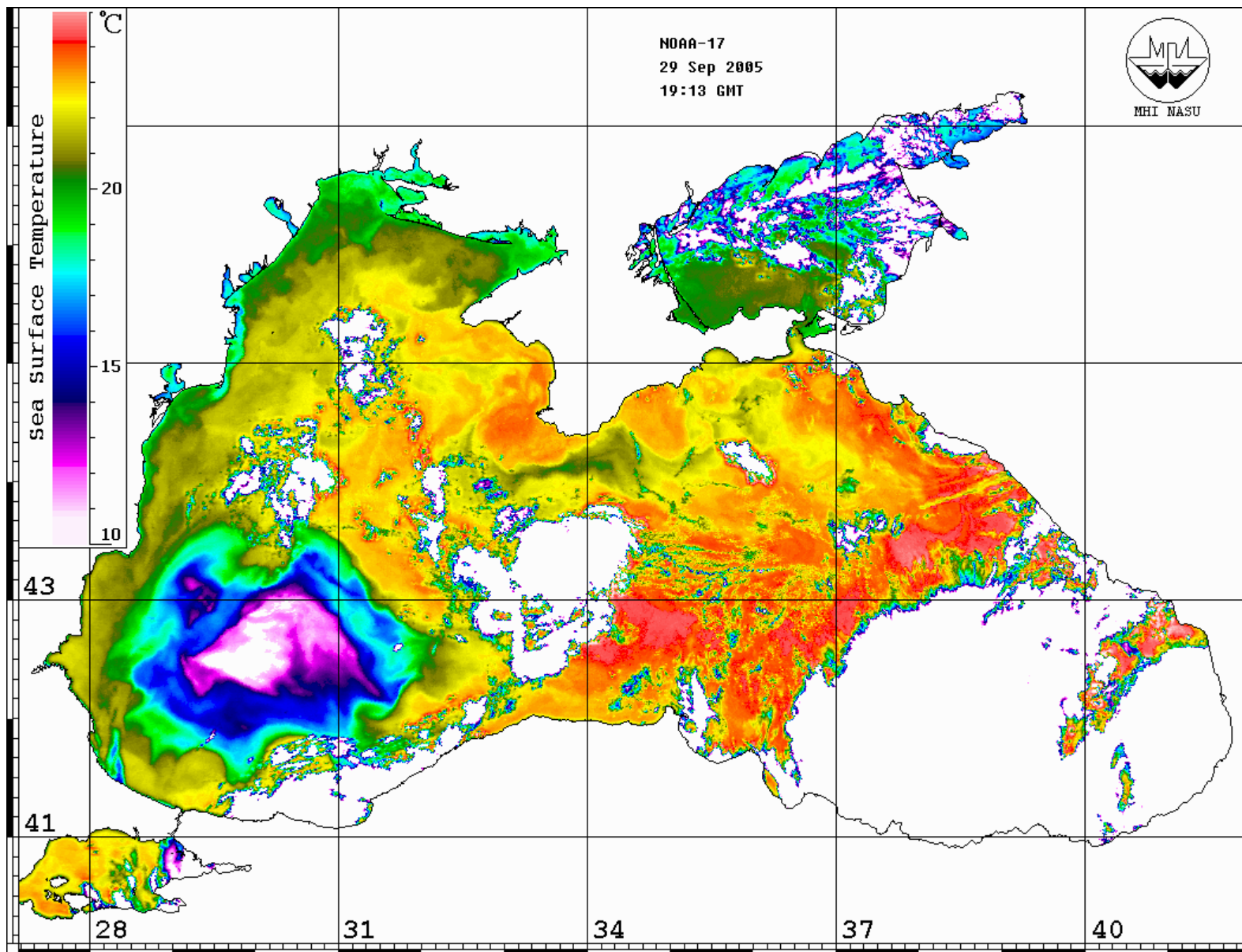
Quasitropical cyclone in the Black Sea

25-29 september 2005



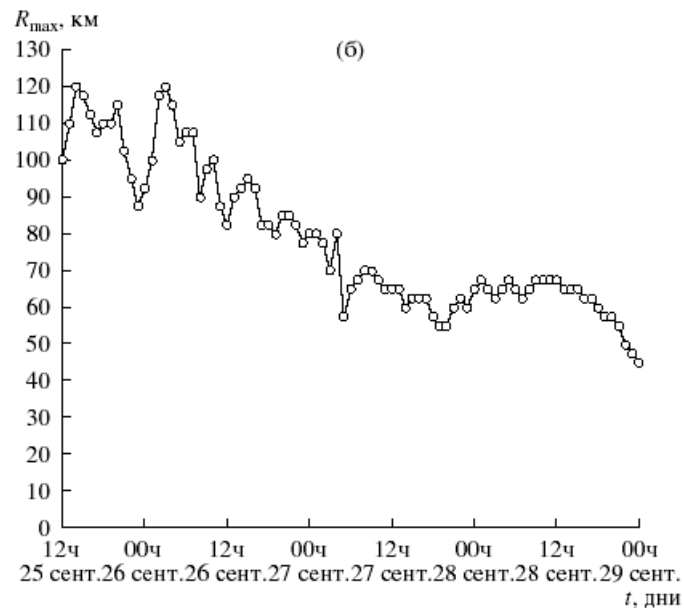
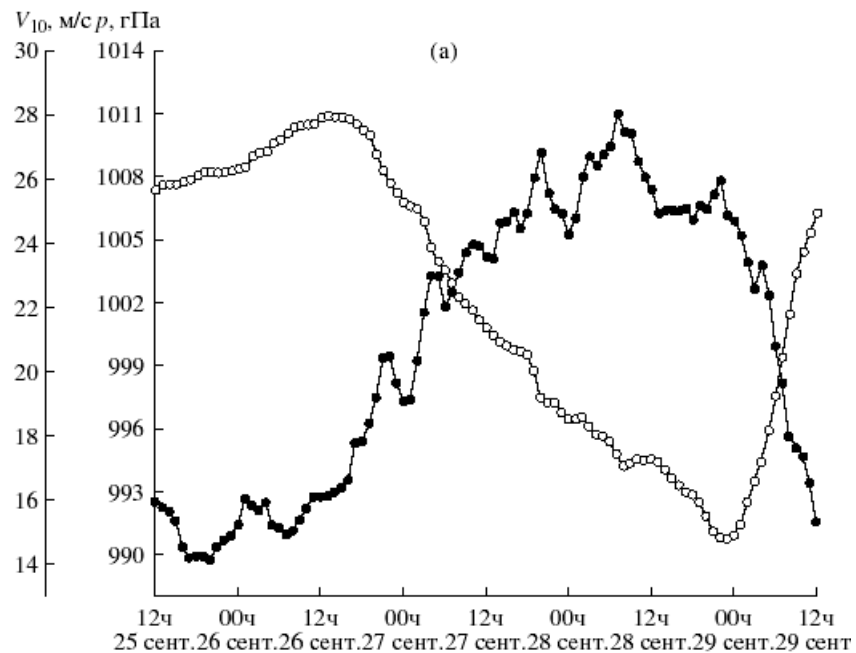
маленький
круглый
долгоживущий
конвективный
над теплым морем

=> квазитропический

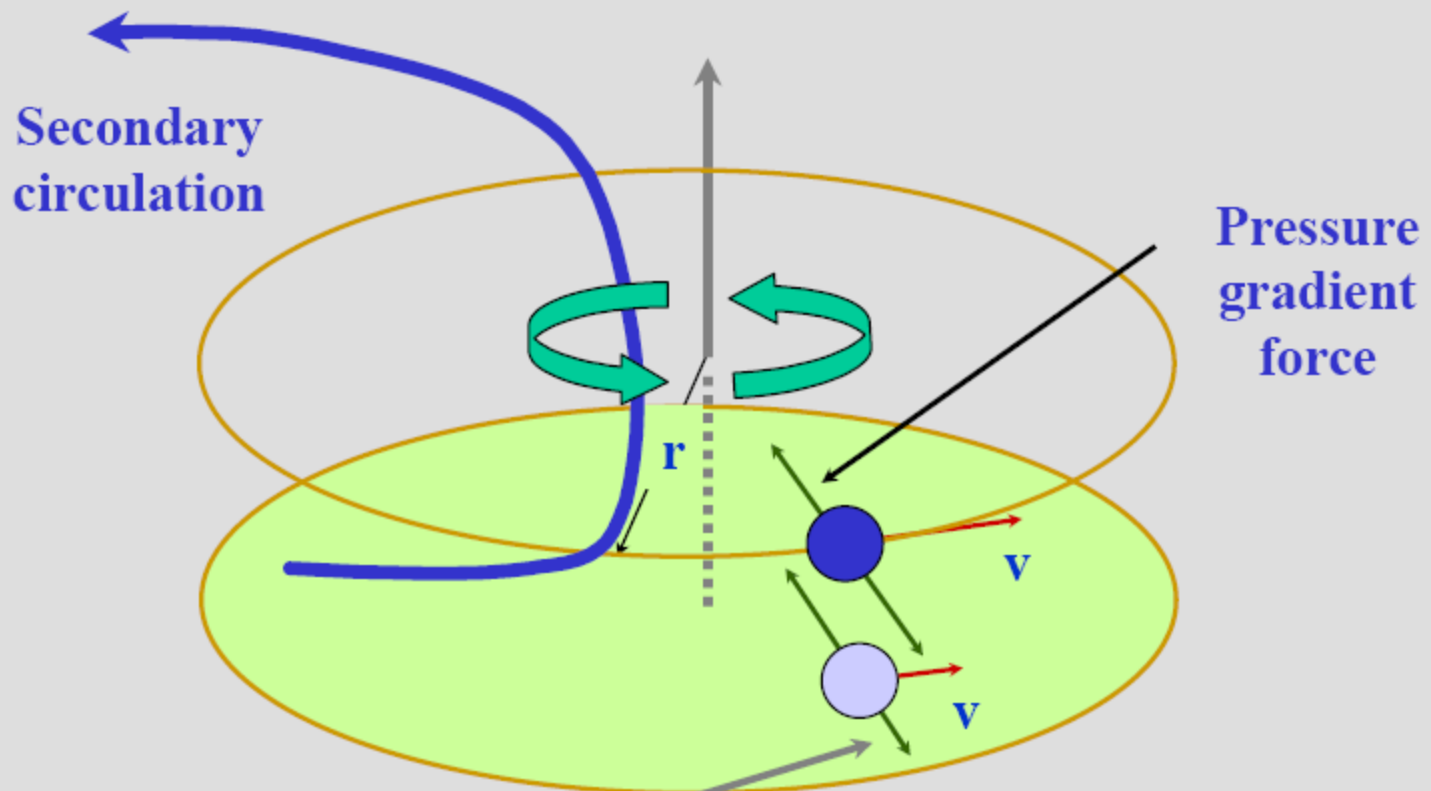


Численное моделирование, MM5

Central pressure $p_{\min}(t)$, azimuthal velocity $V_{\max}(t)$, radius $R(t)$



Frictionally-induced secondary circulation

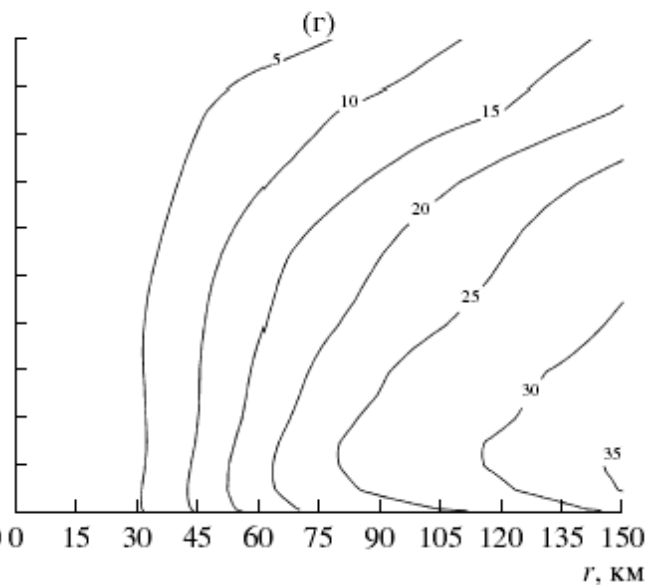
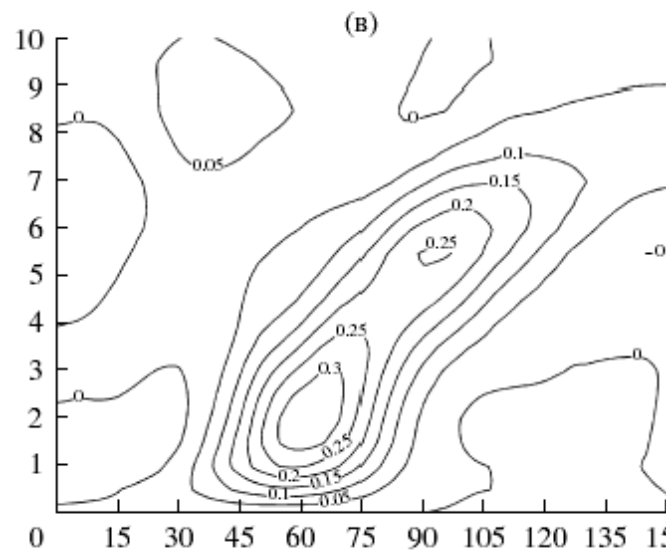
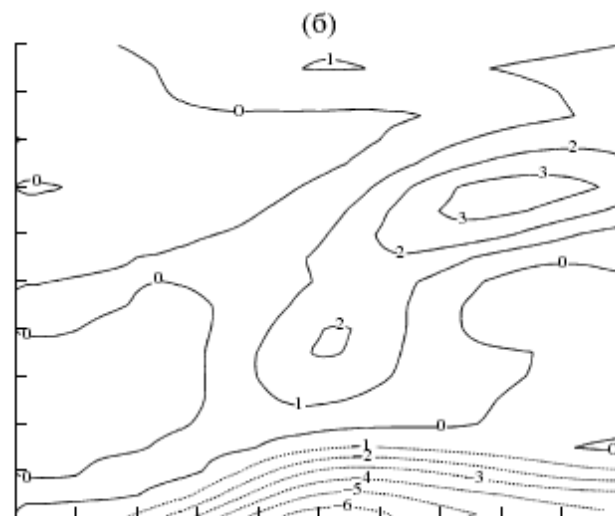
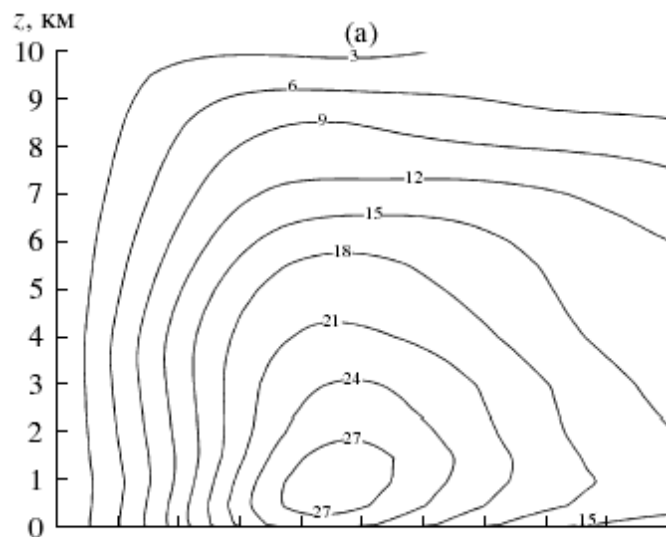


Centrifugal and Coriolis forces **reduced by friction**

Численное моделирование, MM5

Azimuthal velocity $V_\theta(r,z)$
vertical velocity $w(r,z)$

radial velocity $V_r(r,z)$
angular momentum $M(r,z)$



сухая

термодинамика

влажная (упрощенная)

первое начало

$$TdS = C_p dT - Vdp$$

$$TdS \approx C_p dT - Vdp + Ldq$$

q – удельная влажность

энтропия

$$S = C_p \ln \left(\frac{T}{T_0} \right) - R \ln \left(\frac{p}{p_0} \right) = \\ = C_p \ln \theta$$

$$S \approx C_p \ln \left(\frac{T}{T_0} \right) - R \ln \left(\frac{p}{p_0} \right) + \frac{Lq}{T} = \\ = C_p \ln \theta_e$$

потенциальная температура

$$\theta = T \left(\frac{p_0}{p} \right)^{\frac{R}{C_p}}$$

эквивалентная
потенциальная температура

$$\theta_e \approx T \left(\frac{p_0}{p} \right)^{\frac{R}{C_p}} \exp \left(\frac{Lq}{C_p T} \right)$$

$$\theta_e^* = \theta_e(T, p, q^*)$$

* - насыщение

сухая адиабата

$$\theta = const$$

влажная адиабата

$$\theta_e^* = const$$

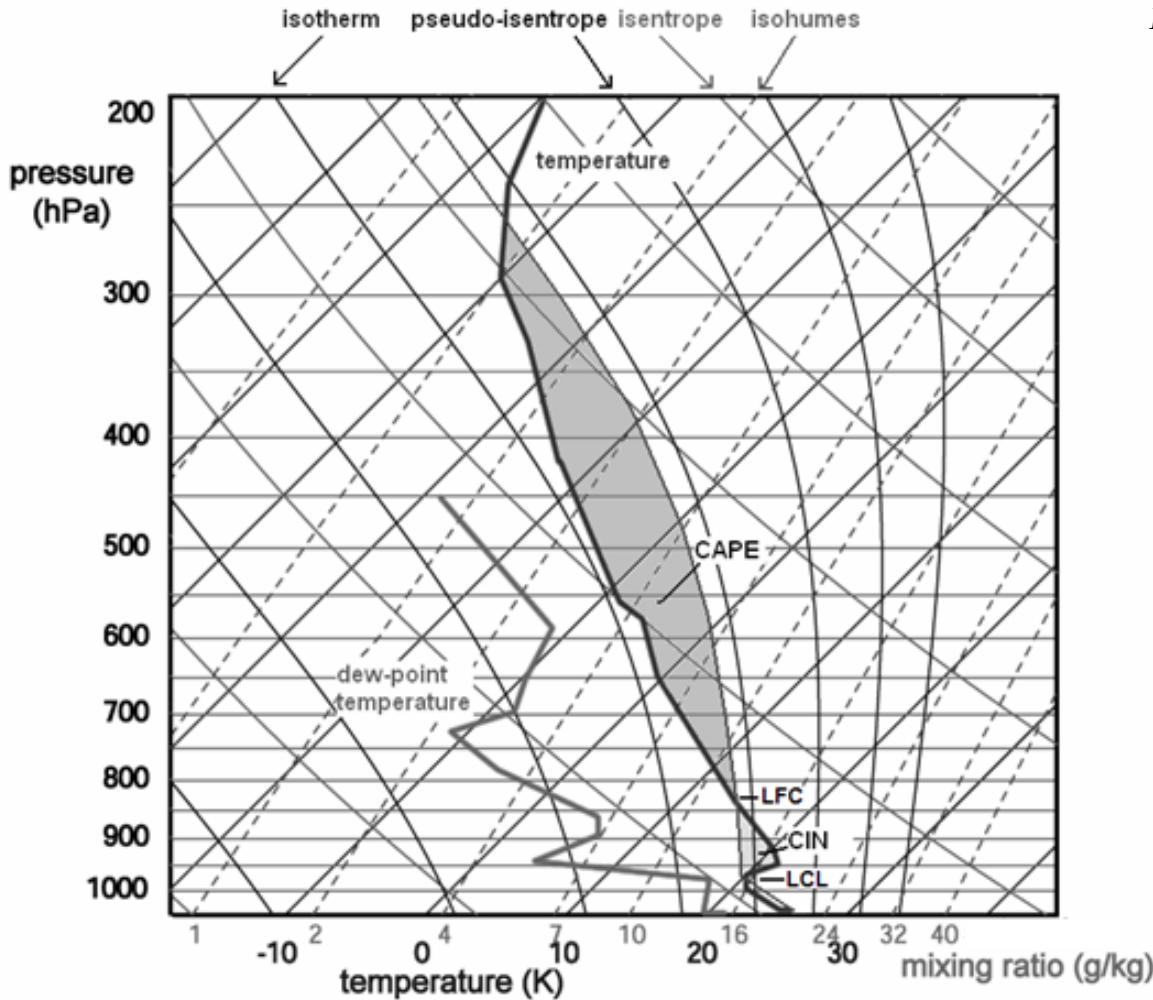
Определение CAPE

Вертикальное зондирование

$$CAPE = g \int_{LFC}^{EL} \frac{\Delta \rho}{\rho} dz = \int_{LFC}^{EL} R \Delta T d \ln p = \frac{w^2}{2} > 0$$

$$CIN = g \int_{LCL}^{LFC} \frac{\Delta \rho}{\rho} dz < 0$$

**конвективная доступная
потенциальная энергия =
работа сил плавучести**



Большая CAPE

**1) большая температура
на нижних уровнях**

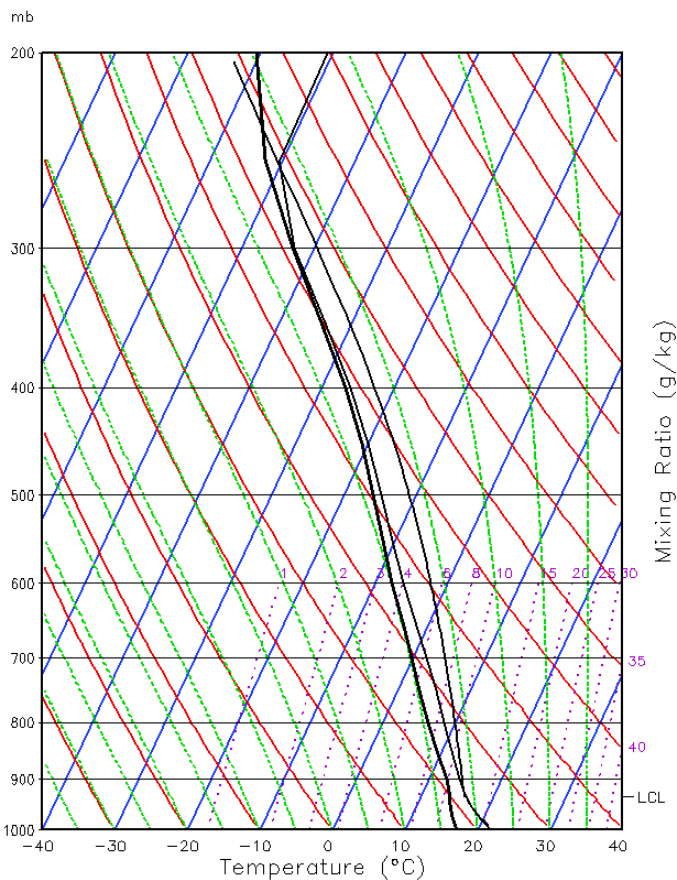
**2) большая влажность
на нижних уровнях**

**3) низкая температура
на средних уровнях**

25 сентября 0ч.

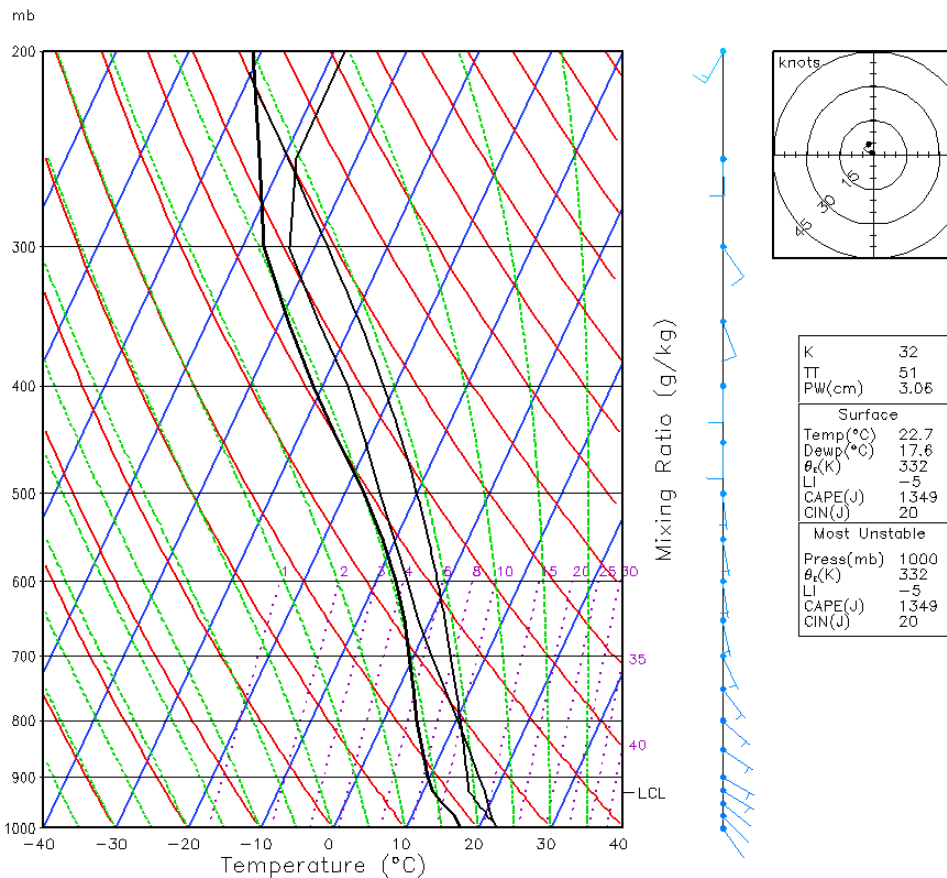
Вертикальные зондирования над Черным морем

lon=32, lat=43



CAPE=1014 Дж/кг

lon=38, lat=43

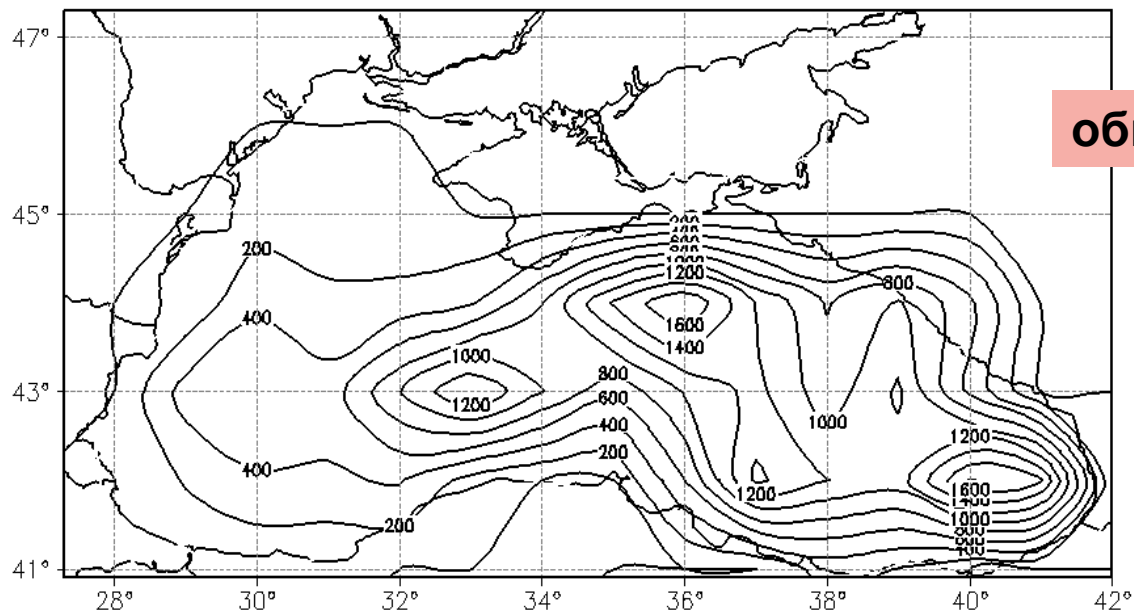


CAPE=1349 Дж/кг

CIN=-20 Дж/кг

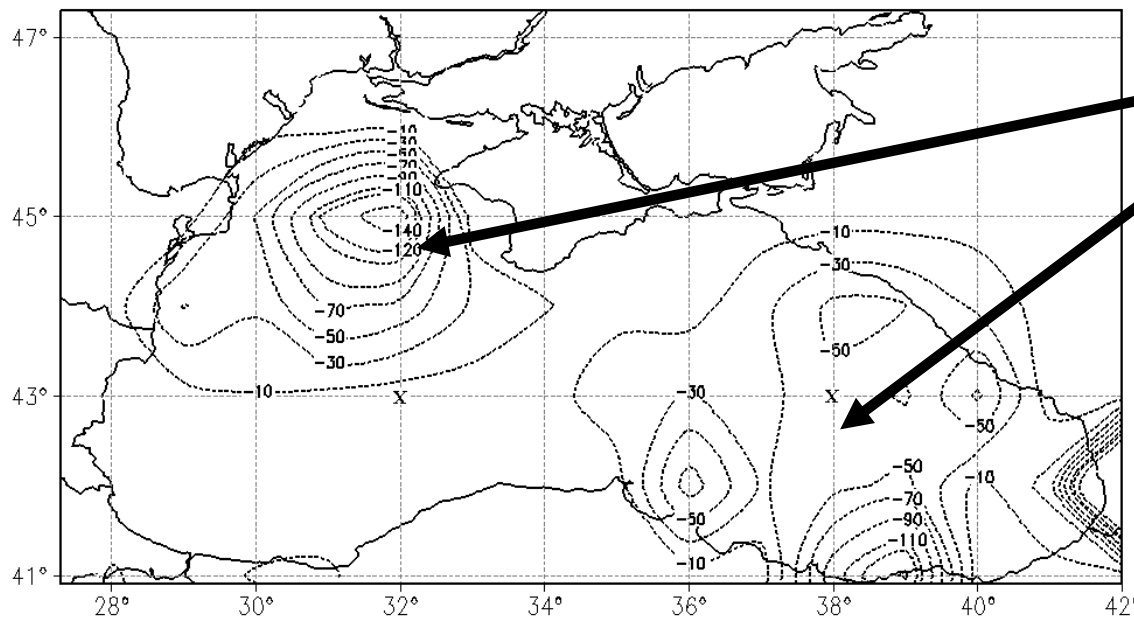
25 сентября 0ч.

CAPE



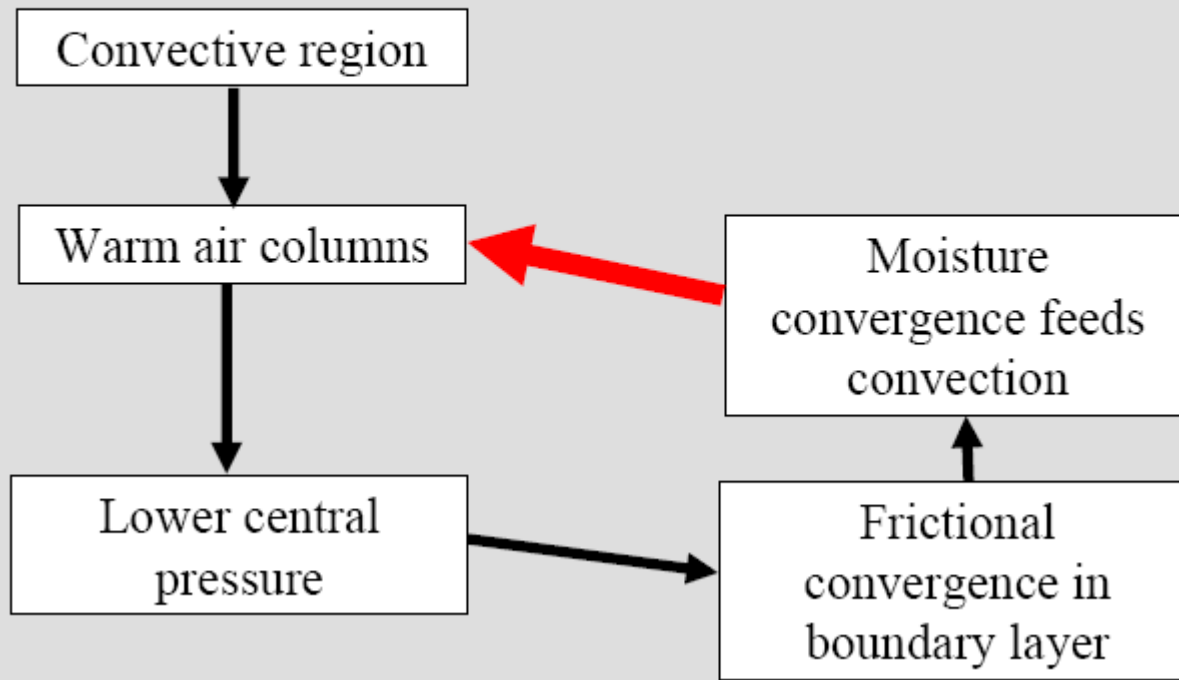
обширный резервуар CAPE

CIN



запирающий слой

CISK theory for growth



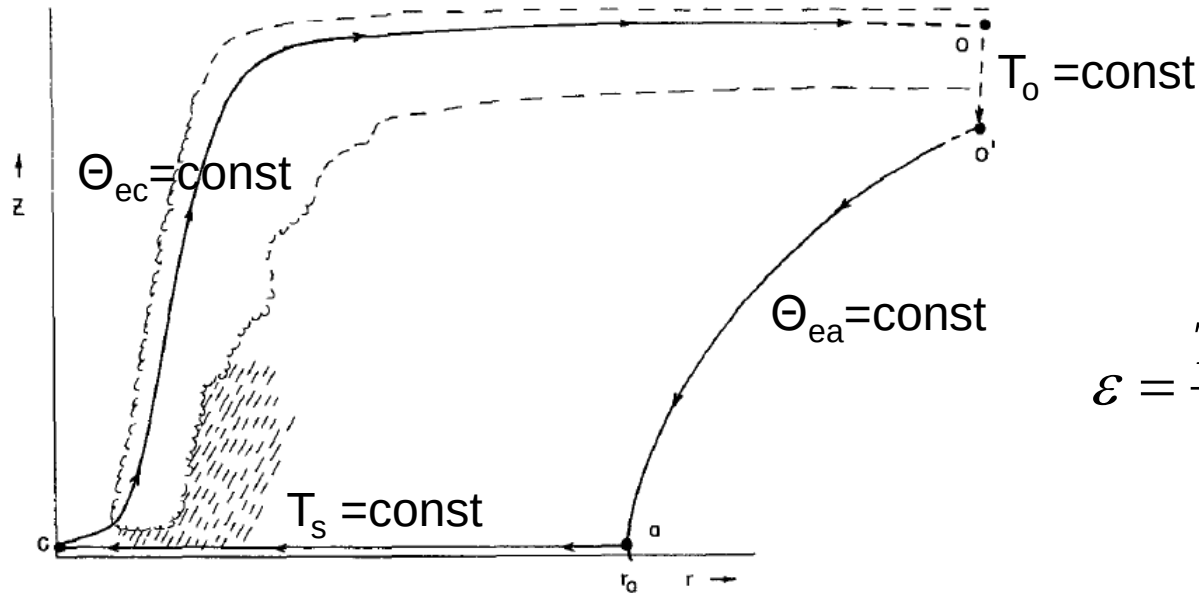
Summary of CISK

Basis of theory:

- Convection organised by frictional moisture convergence.
- Latent heat release drives the system

Упрощенная модель тропического циклона Emanuel 1986 (WISHE)

максимальная потенциальная интенсивность МРІ



цикл Карно

К.П.Д.

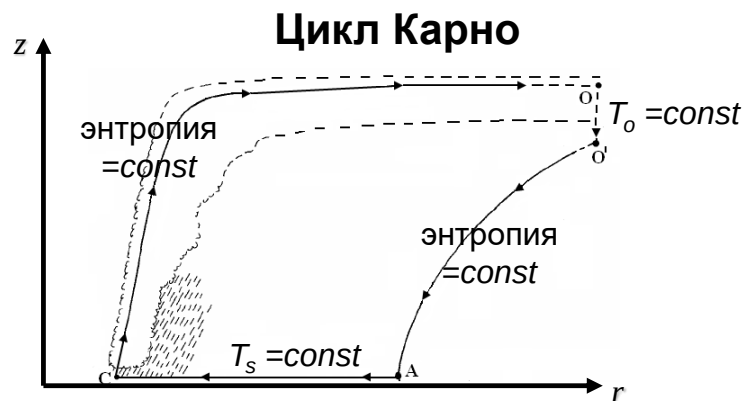
$$\varepsilon = \frac{T_s - T_o}{T_s} = 1 - \frac{223}{296} = 25\%$$

$$\oint TdS = \oint \mathbf{F}d\mathbf{l}$$

$$T_s(S_c - S_a) = RT_s \ln \frac{p_a}{p_c} + L(q_c^* - q_a)$$

$$\ln \frac{p_a}{p_c} = \varepsilon \frac{L}{RT_o} (q_c^* - q_a) = 0.25 \frac{2.5 \cdot 10^6}{287 \cdot 223} 3 \cdot 10^{-3} = 0.03$$

(30гПа)



Вторичная циркуляция в тропическом циклоне, представленного как идеальная тепловая машина Карно

$$\kappa.n.\partial = \frac{T_s - T_o}{T_s} = 1 - \frac{243}{288.7} = 16\%$$

T_s - температура поверхности моря

T_o - температура воздуха при оседании

Максимальная интенсивность циклона

$$V_{\theta \max}^2 = \frac{C_k}{C_D} (T_s - T_o) \cdot (s_s^* - s_b) \Big|_{в \text{ стене глаза}}$$

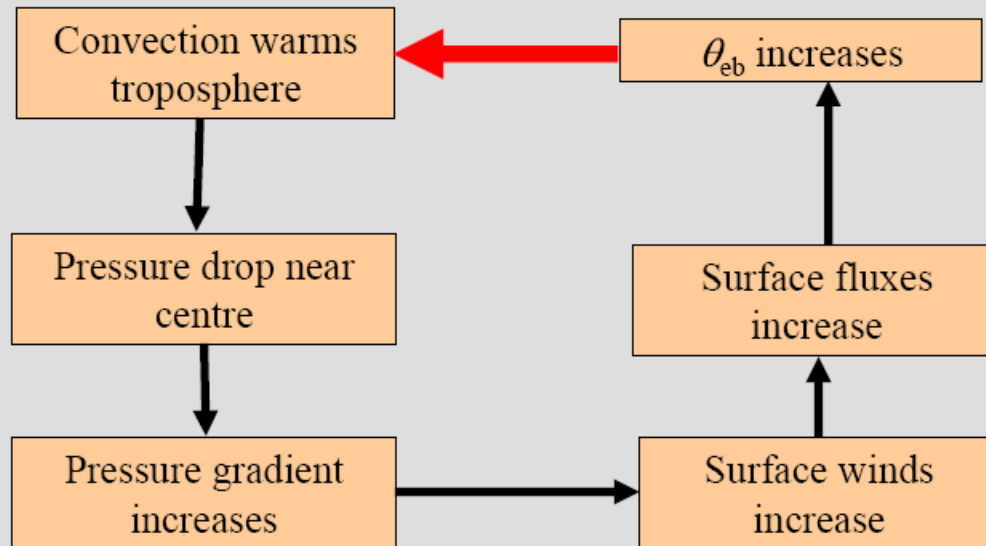
C_k, C_D - коэффициенты обмена

s_s^*, s_b - энтропия воздуха на поверхности моря и в пограничном слое

Сравнение характерных параметров тропического и черноморского квазитропического циклонов

Величина	Характерное значение	
	для тропического циклона	для черноморского квазитропического циклона
Азимутальная скорость	60 м/с	46 м/с
Радиус циклона	1000 км	250 км
Вертикальная скорость	6 см/с	4.6 см/с
Радиальная скорость	10 м/с	7 м/с
Перепад давления между центром и периферией	45 гПа	26 гПа
Временной масштаб	15 часов	18 часов

WISHE theory for growth



Summary of WISHE

- System driven by thermodynamic imbalance between ocean surface and boundary layer air
- Does not need large CAPE.
- Surface fluxes organise convection
- As surface pressure drops, huge increase in CAPE.

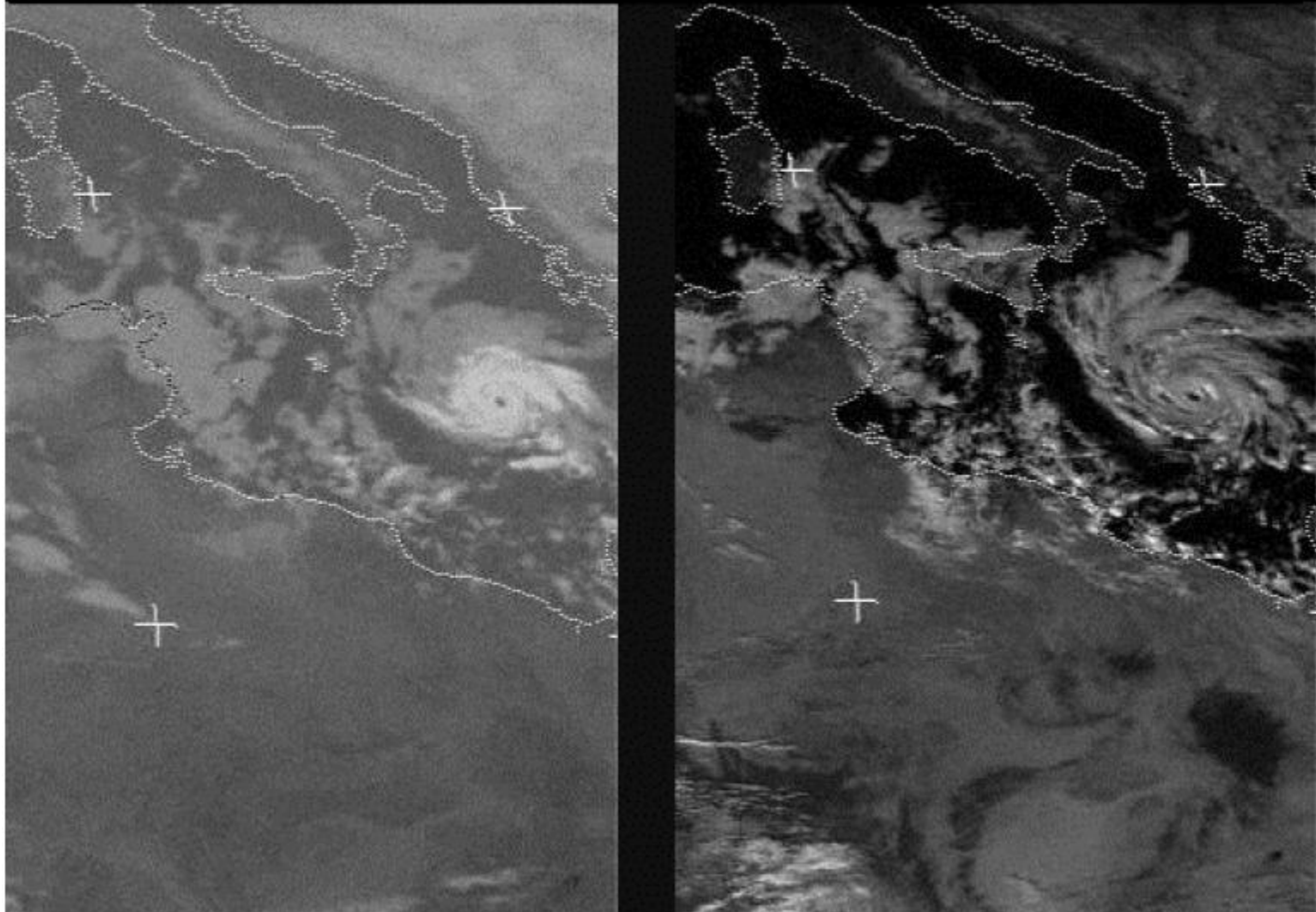
**БЛАГОПРИЯТНЫЕ УСЛОВИЯ
для развития квазитропического циклона
над Черным морем**

- 1) температура поверхности моря $T=23^{\circ}\text{C}$**
- 2) параметр Кориолиса не равен нулю, широта $=42^{\circ}$**
- 3) высокая влажность средней тропосферы**
- 4) отсутствие вертикального сдвига скорости**
- 5) обширный резервуар CAPE**
- 6) затравка:
конвергенция + циклоническая завихренность в нижнем слое**
- 7) контраст море-суша?**

Средиземноморские квазитропические циклоны

Cyclone with eye over Mediterranean Sea

METEOSAT IR 16 Jan 1995 0930Z/1330Z METEOSAT VIS



Средиземноморские квазитропические циклоны

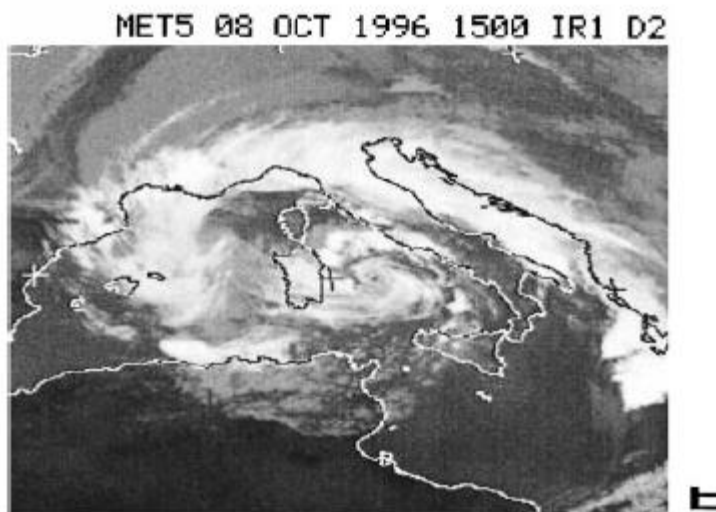


FIG. 9. Meteosat satellite images in the infrared bandwidth. Courtesy of EUMETSAT, through University of Nottingham, United Kingdom. (a) At 1130 UTC 7 Oct 1996, the eyelike feature can be seen between Sardinia and the Balearic Islands. (b) At 1500 UTC 8 Oct the cyclone crossed Sardinia and its eye can be seen to the east of Sardinia.

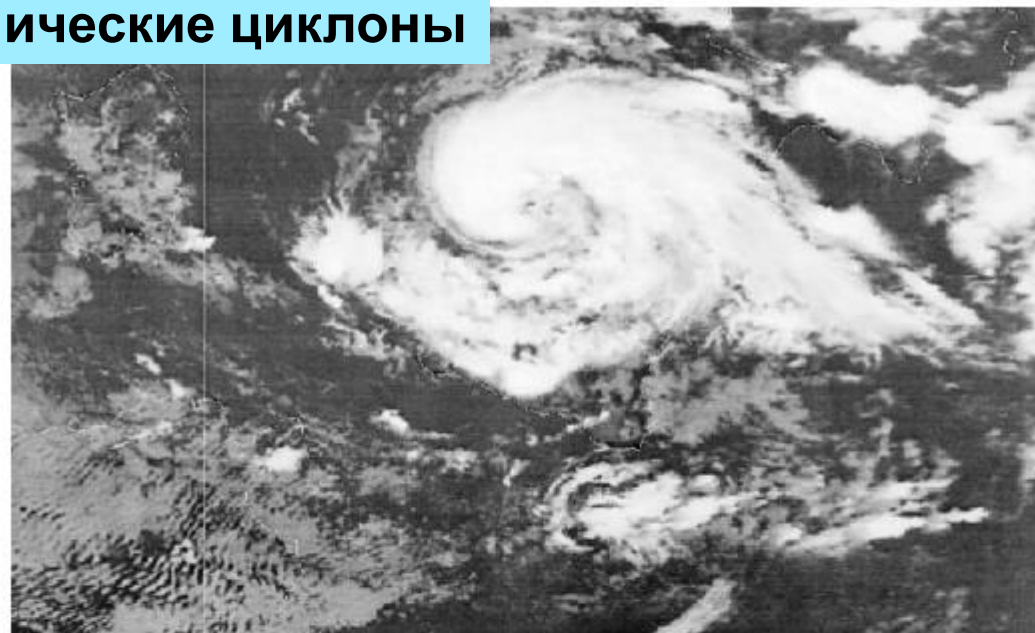
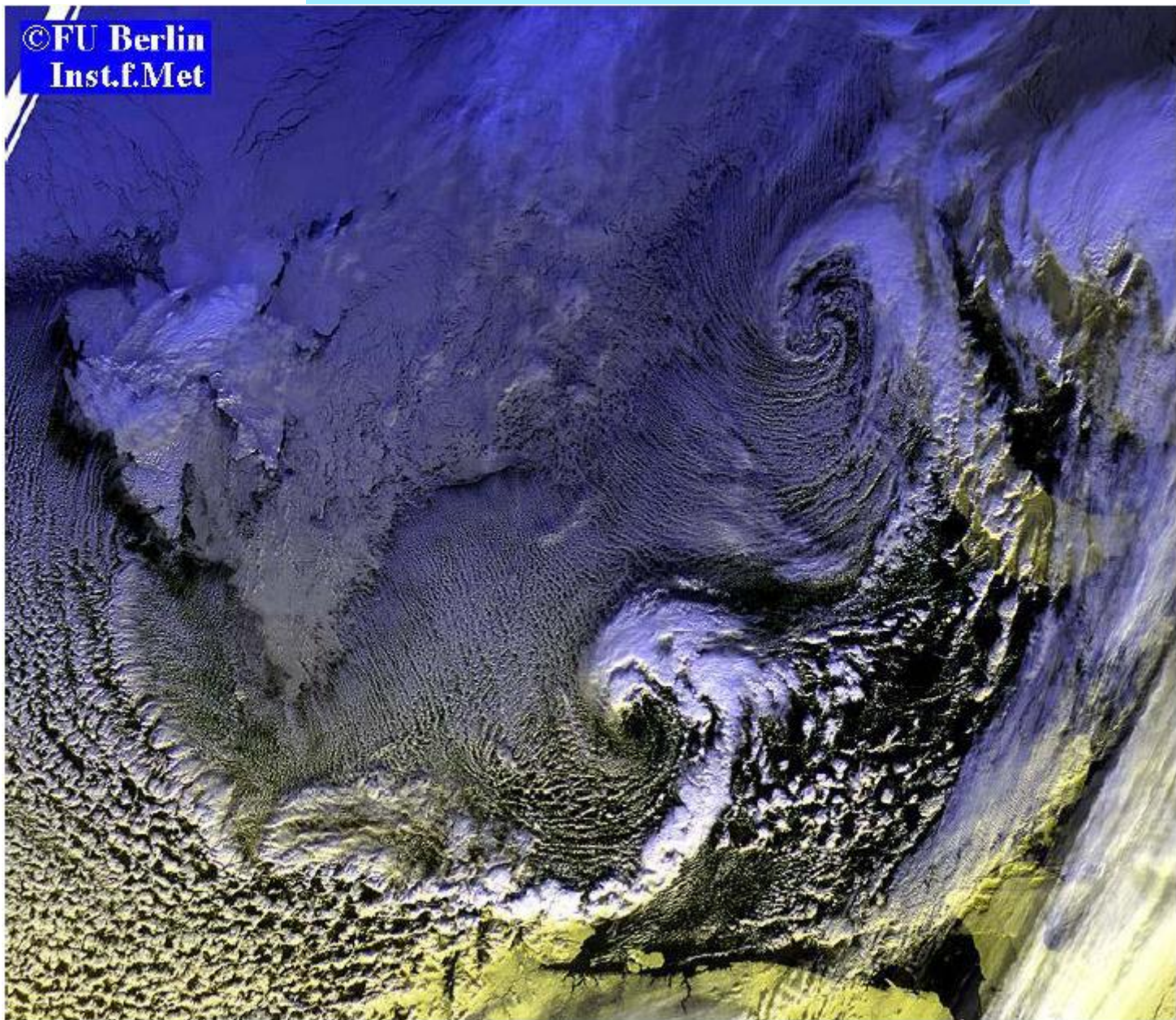


FIG. 12. NOAA satellite images in the infrared bandwidth. Courtesy of Dundee Satellite Receiving Station. The mesocyclonic vortex can be seen over the central-southwestern Tyrrhenian Sea at (a) 1319 9 Oct and (b) at 1717 9 Oct 1996. A very slow southeastward progression can be inferred. Notice the well-defined eye.

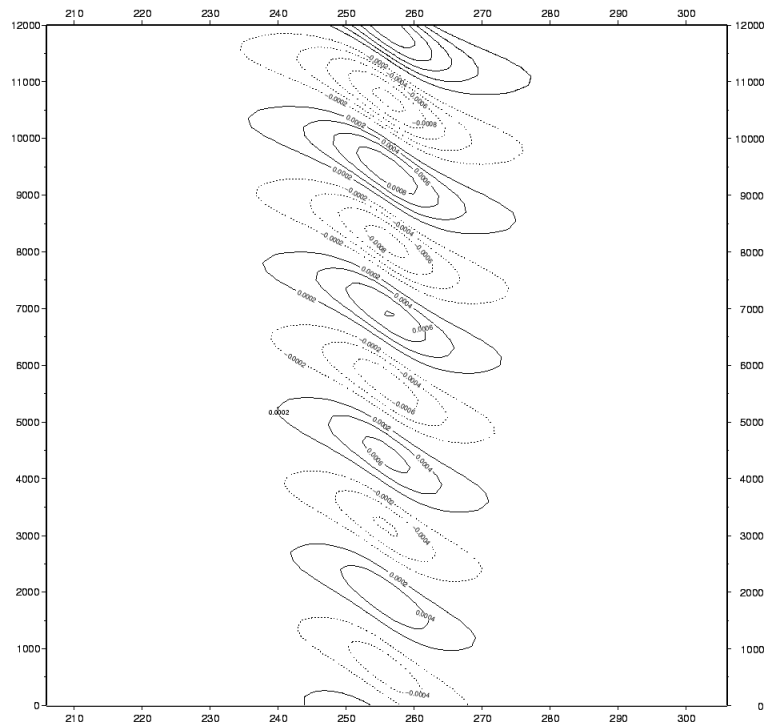
Полярные циклоны – Polar lows



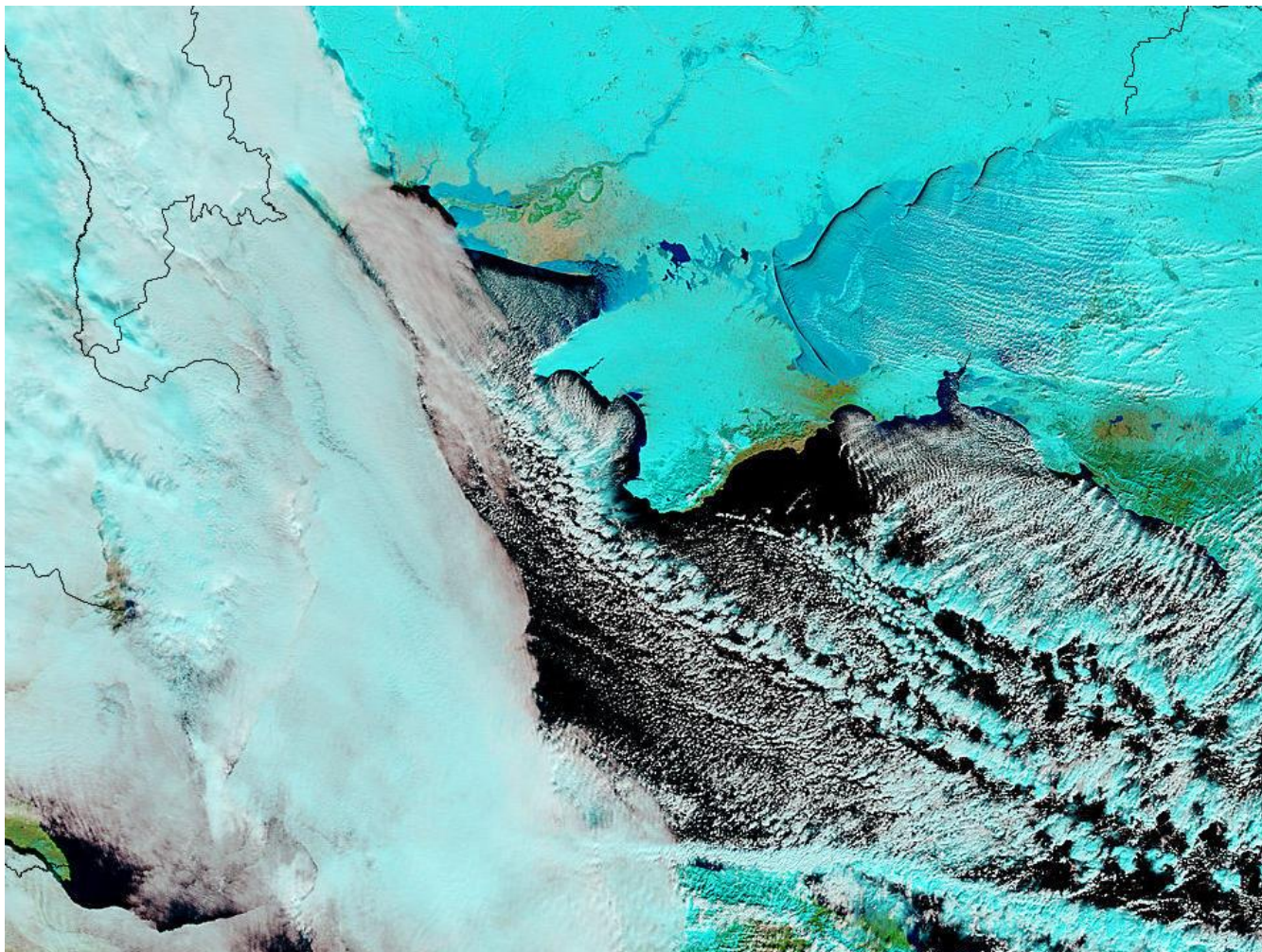
Горные волны Mountain waves

- $N(z)=\text{const}$
- $U(z)=\text{const}$

W



Подветренные волны Lee waves

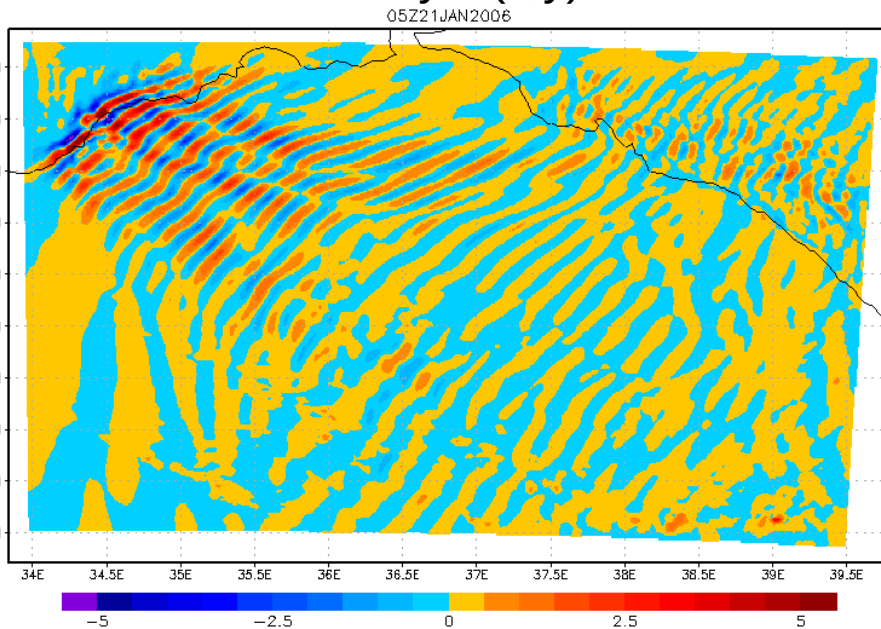


Численное моделирование подветерных волн

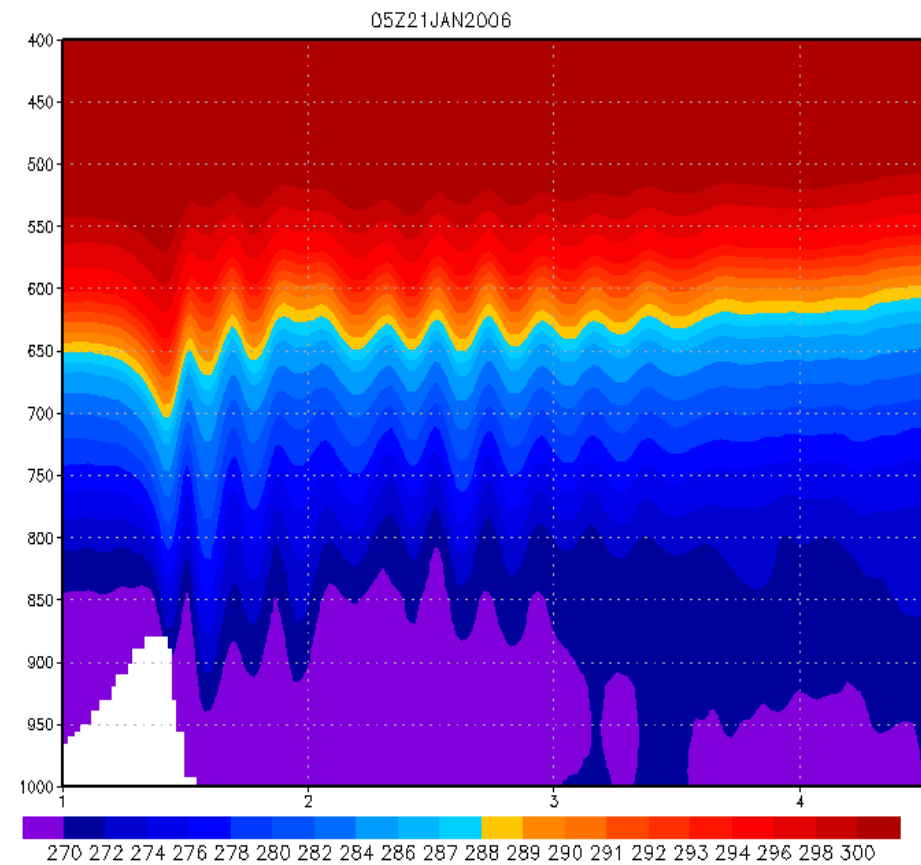
WRF domains 9 km,
3 km, 1 km



Vertical velocity $w(x,y)$

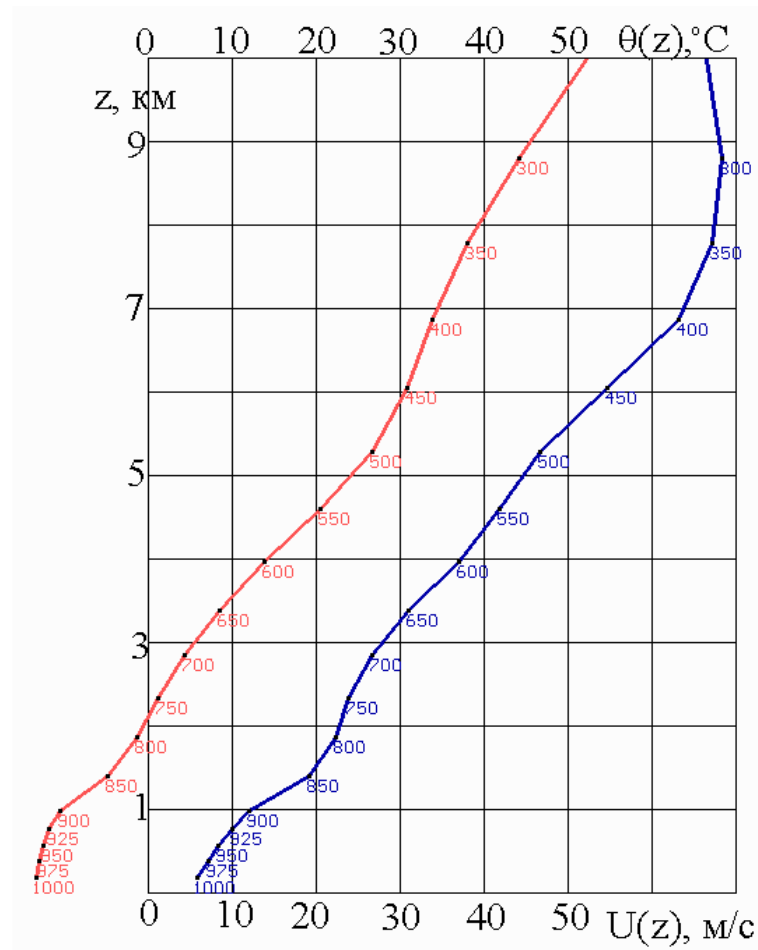


Potential temperature $\theta(x,p)$



Profiles

Potential temperature $\theta(z)$, wind velocity $U(z)$



Linear theory lee waves

2-layer model. Phase velocity

$$c^2 = \frac{g}{k} \frac{\Delta\rho}{\rho_1 c t h k H + \rho_2}$$

is equal to the wind speed U at some wave number k

Continuous stratification. Vorticity Taylor-Goldstein equation

$$\frac{\partial^2 \hat{w}}{\partial z^2} + m^2(z) \hat{w} = 0,$$

where

$$w'(x, z, t) = \hat{w}(z) \exp[i(kx - \omega t)]$$

vertical wave number m
(Scorer parameter)

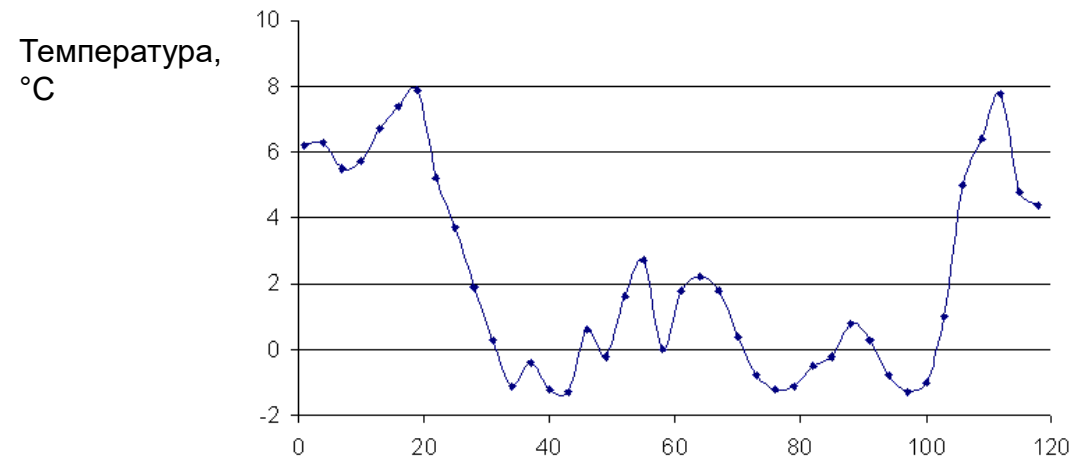
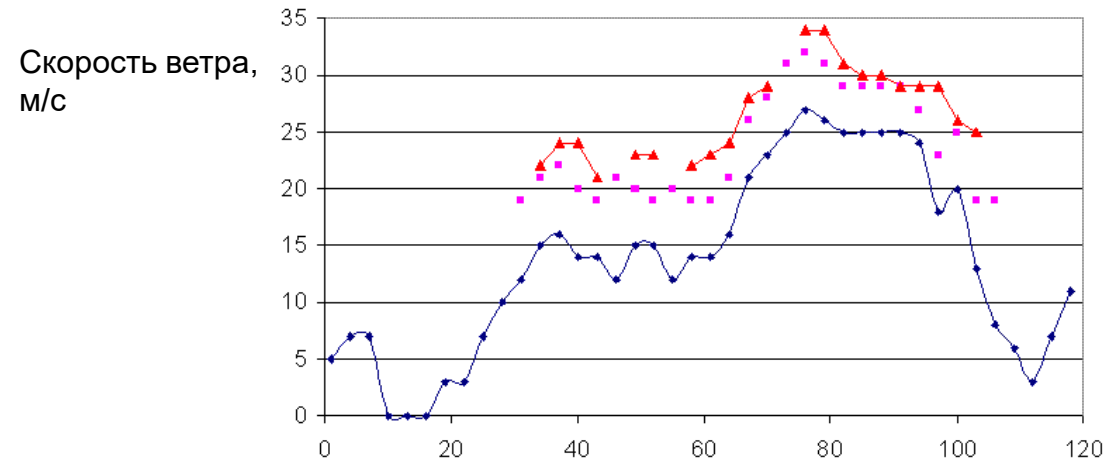
$$m^2(z) = \frac{N^2}{(U - c)^2} - \frac{U_{zz}}{U - c} - k^2, \quad c = \frac{\omega}{k}.$$

$m^2 > 0$ propagation $m^2 < 0$ decay

Downslope winds

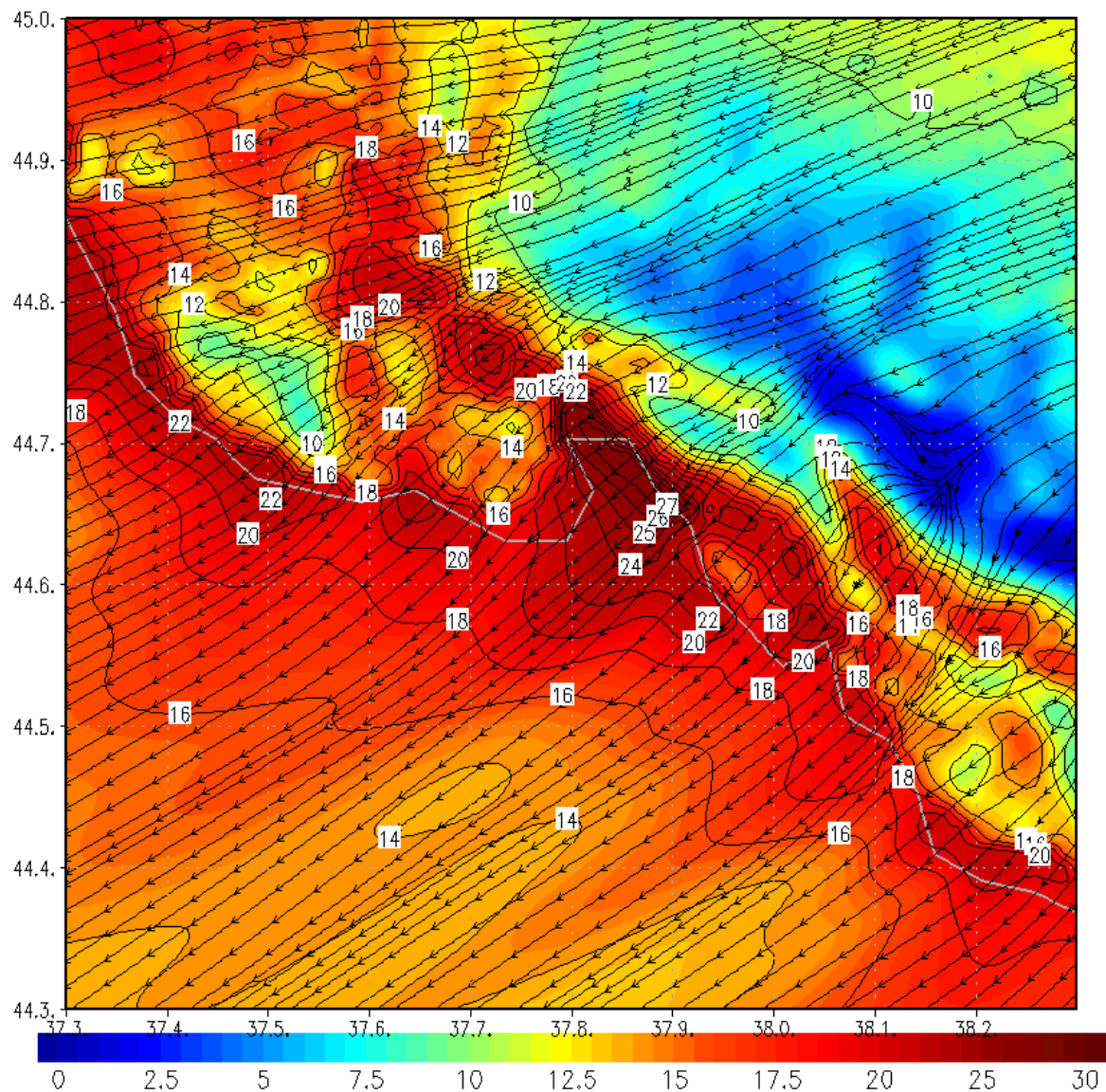
Новороссийская бора

Наблюдения



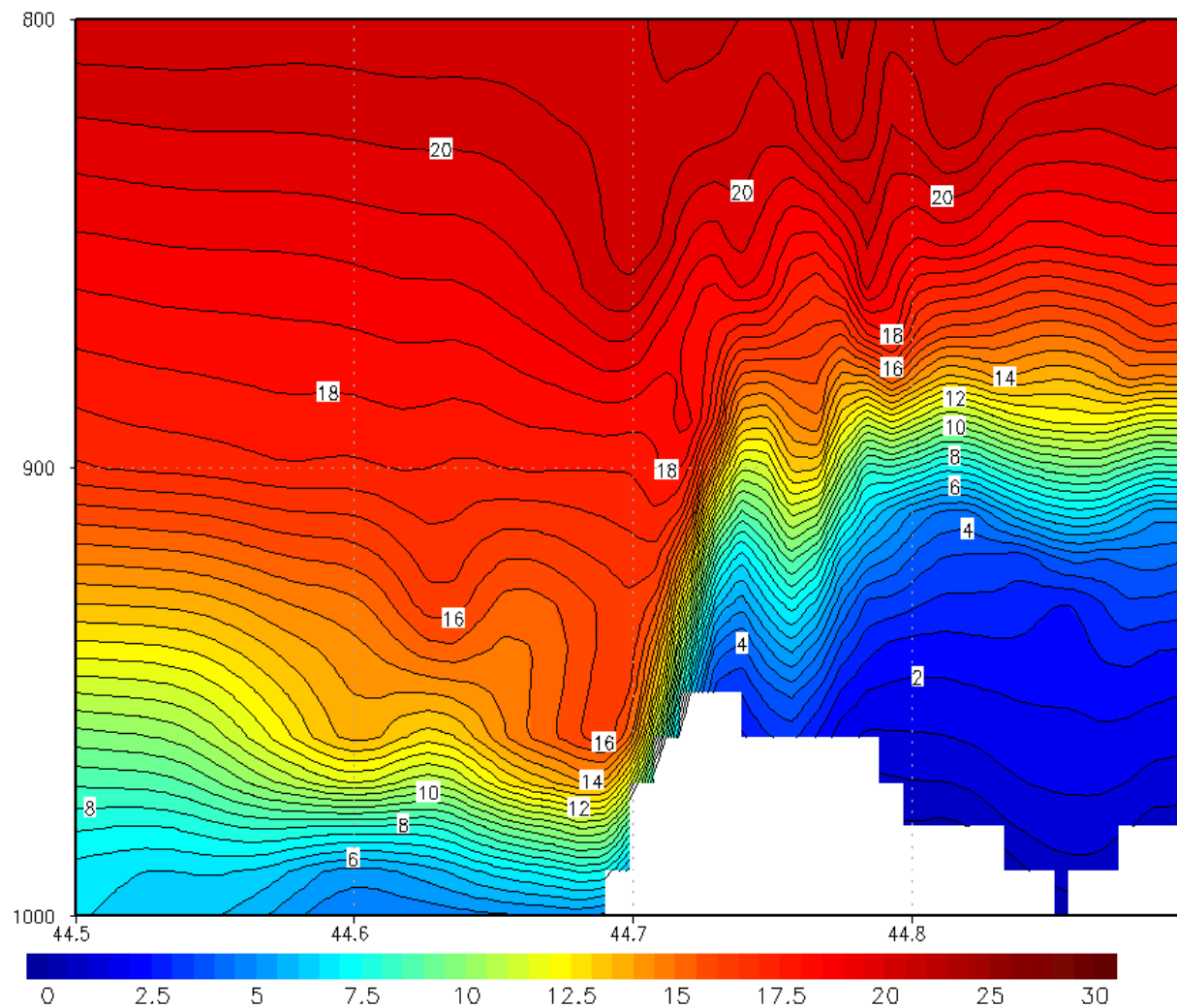
Новороссийская бора

Численное моделирование
WRF, 3 вложенных домена, 5км, 1.67км, 555м



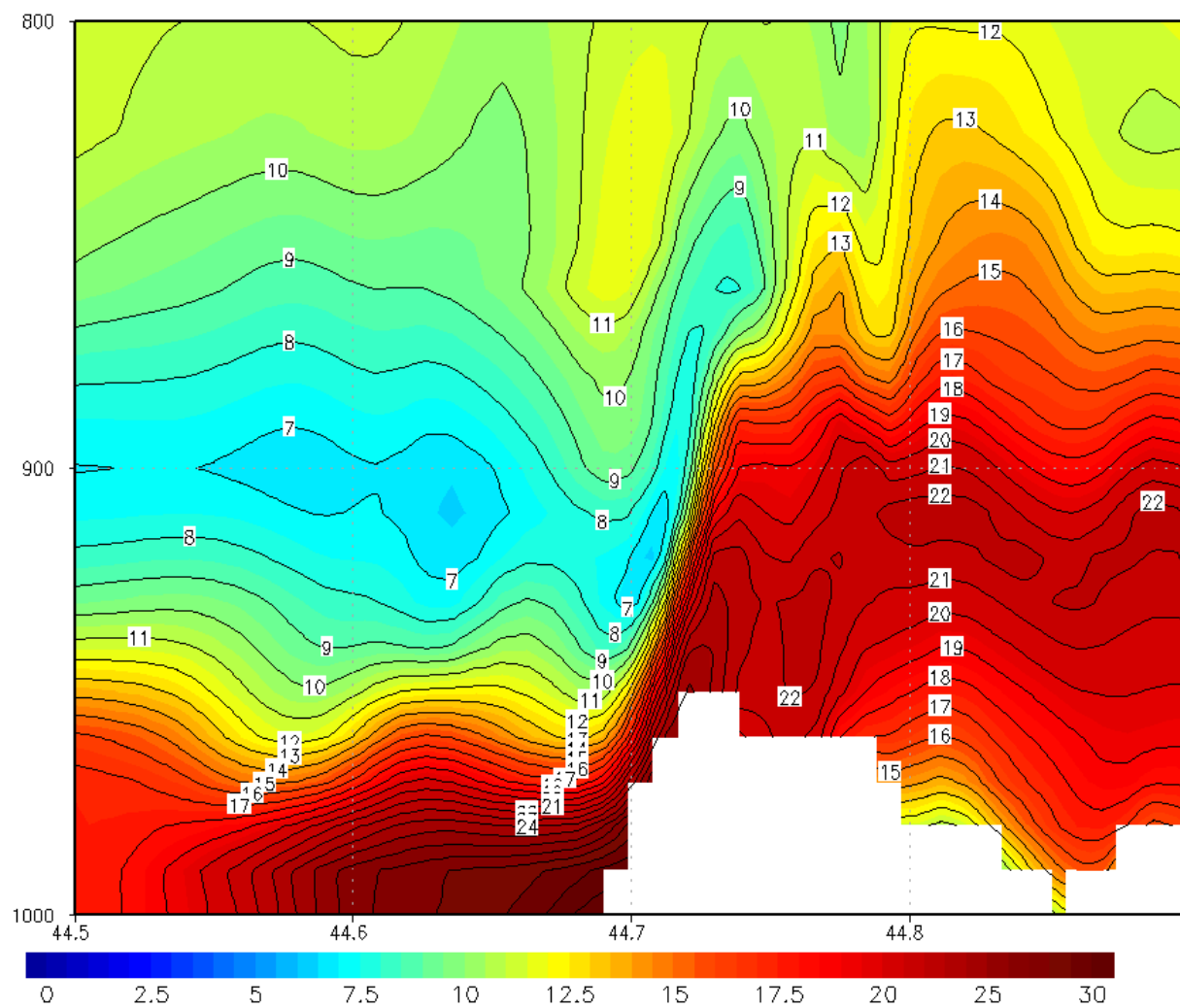
Скорость ветра, 10м

Новороссийская бора



Вертикальный разрез, потенциальная температура

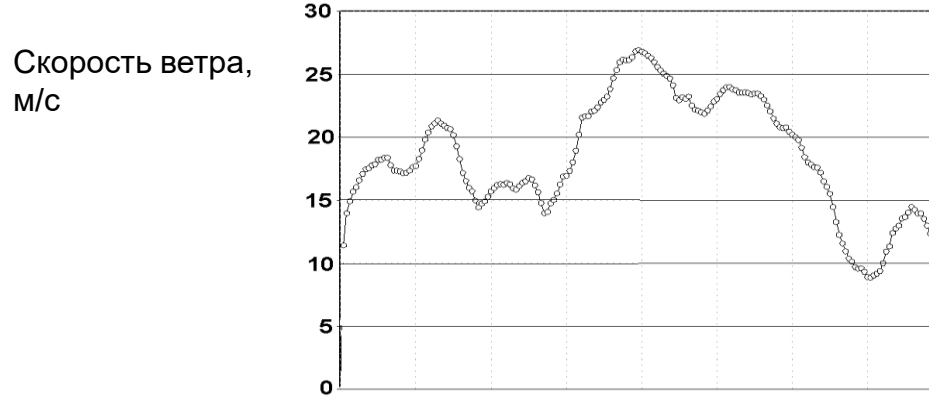
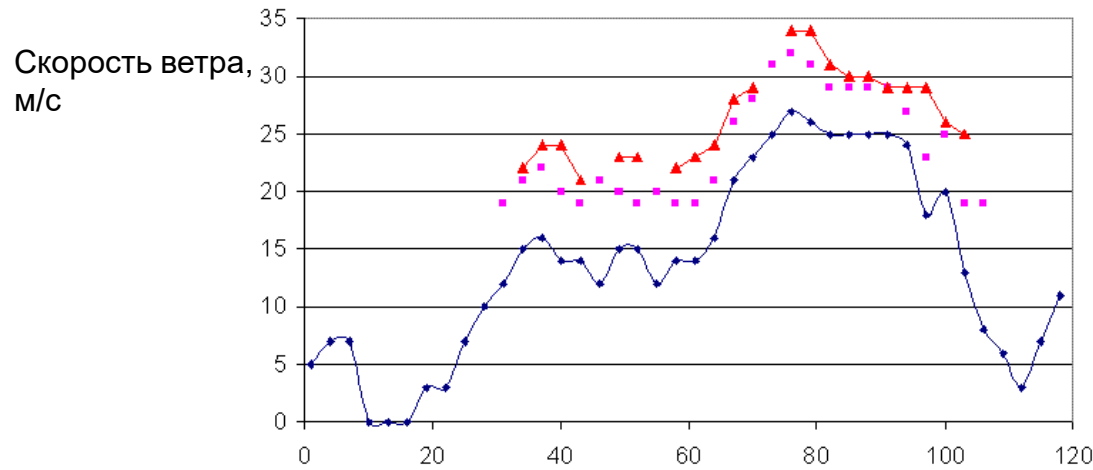
Новороссийская бора



Вертикальный разрез, скорость ветра

Новороссийская бора

Прогноз



Downslope wind

Theory

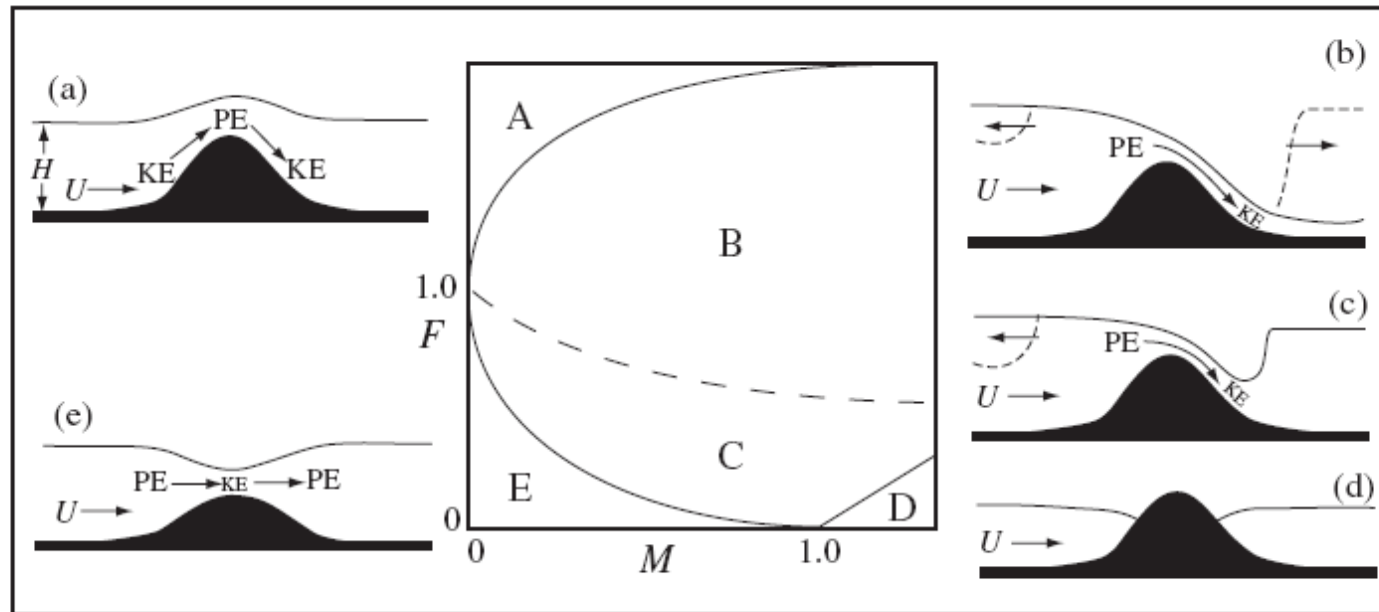
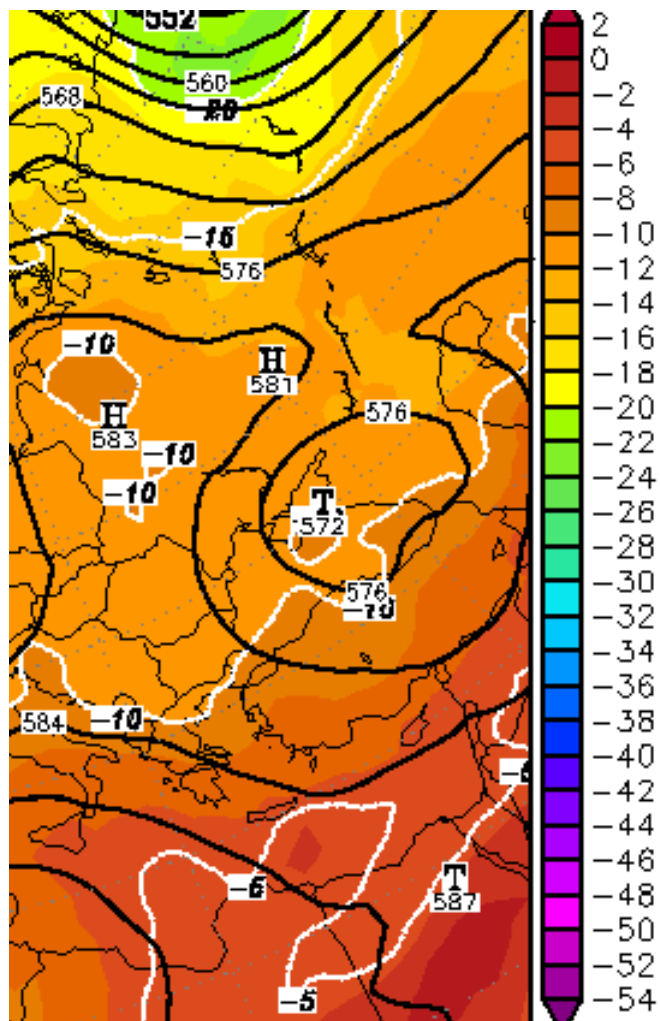
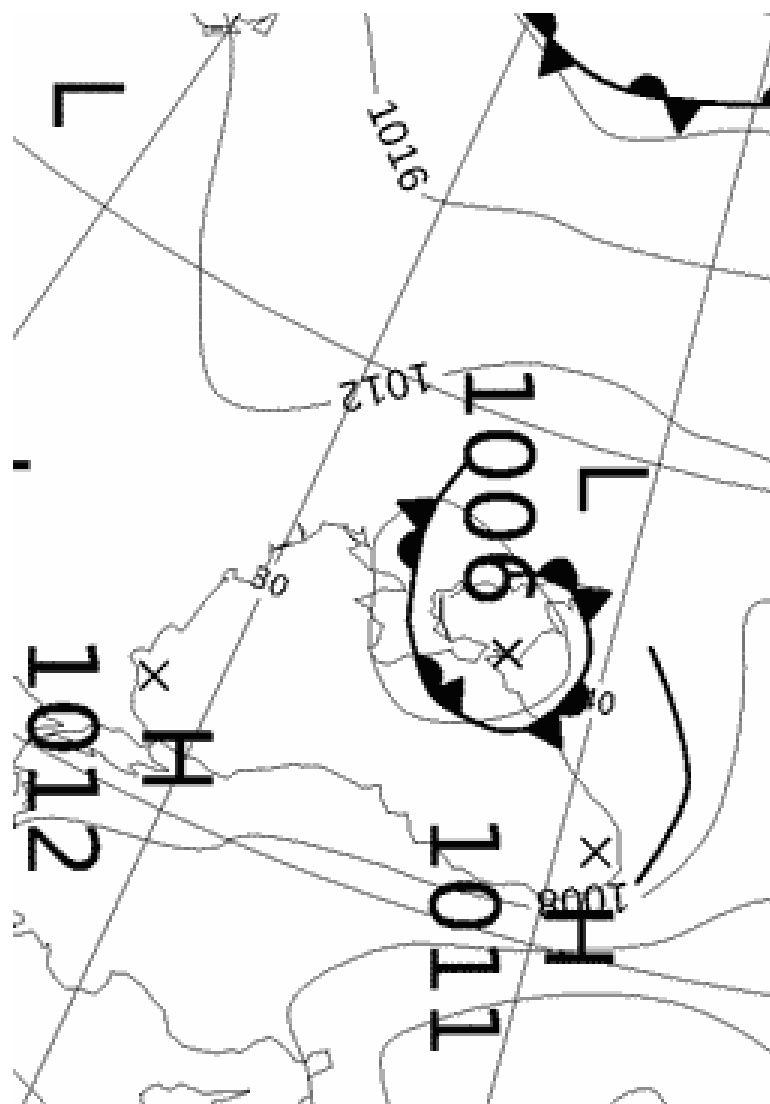


Fig. 3.3 Five flow regimes of the transient one-layer shallow water system, based on the two nondimensional control parameters ($F = U/\sqrt{gH}$, $M = h_m/H$). (a) Regime A: supercritical flow, (b) Regime B: flow with both upstream and downstream propagating hydraulic jump, (c) Regime C: flow with upstream propagating jump and downstream stationary jump, (d) Regime D: completely blocked flow, and (e) Regime E: subcritical flow. The dashed lines in (b) and (c) denote transient water surface. In regimes B and C, upstream flow is partially blocked. (Adapted after Baines 1995 and Durran 1990.)

Катастрофическое наводнение в Крымске 6-7 июля 2012

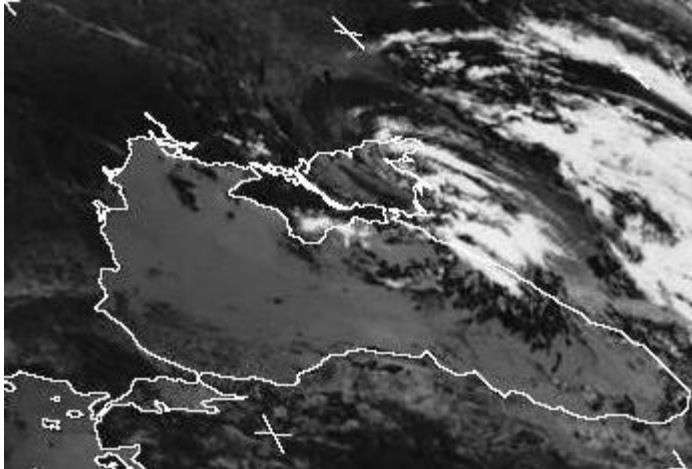


Geopotential 500 mb
Temperature 500 mb

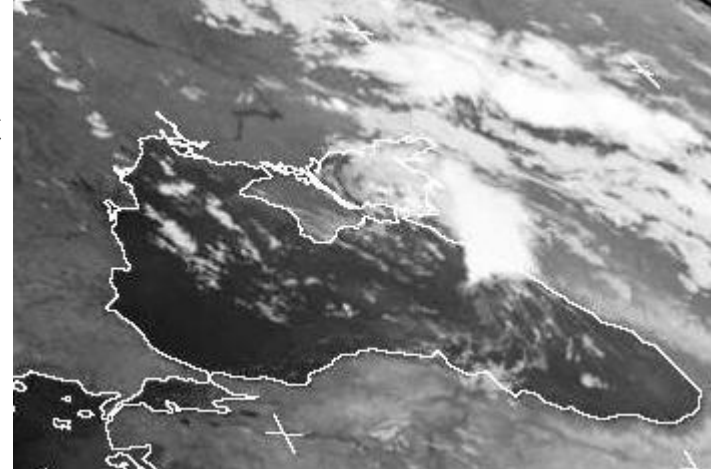


6 jul 2012 12:00 UTC

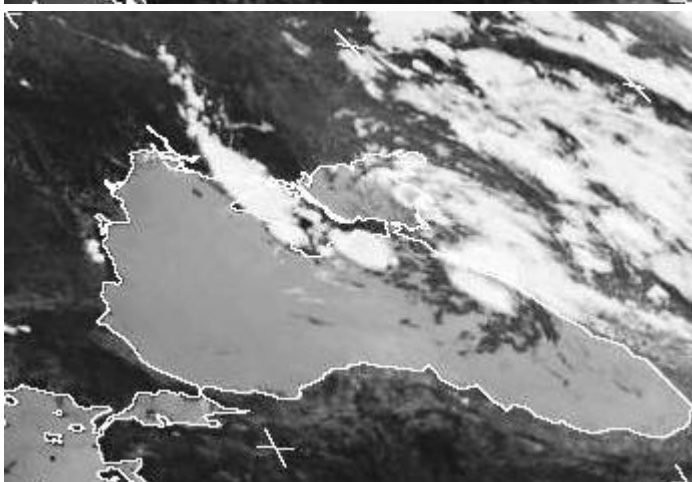
6 jul 2012
06:00 UTC



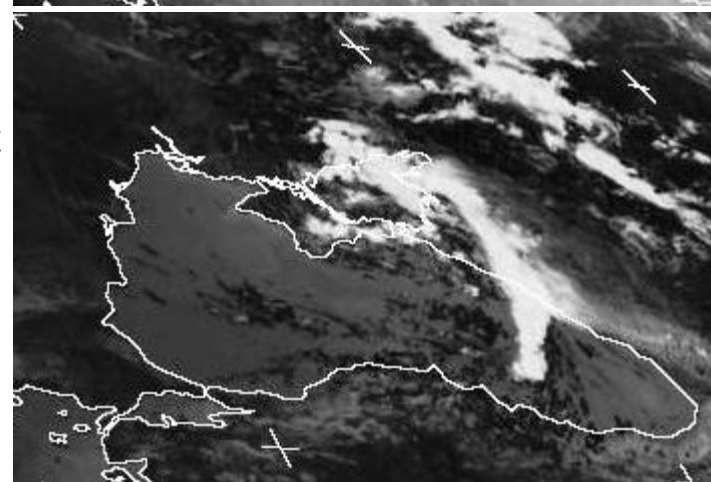
7 jul 2012
00:00 UTC



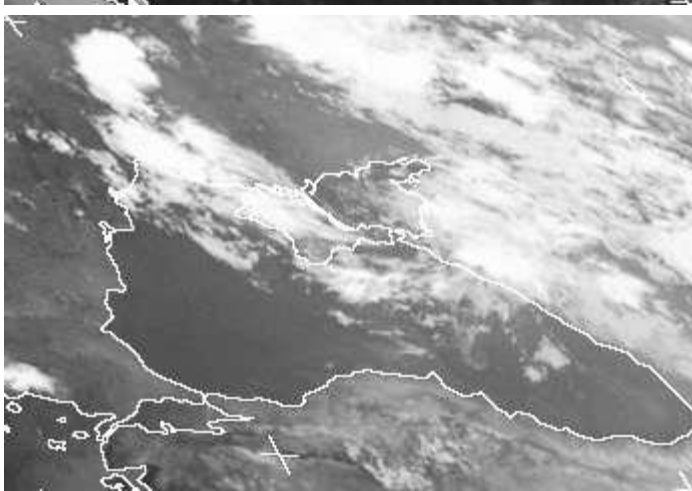
6 jul 2012
12:00 UTC



7 jul 2012
06:00 UTC



6 jul 2012
18:00 UTC

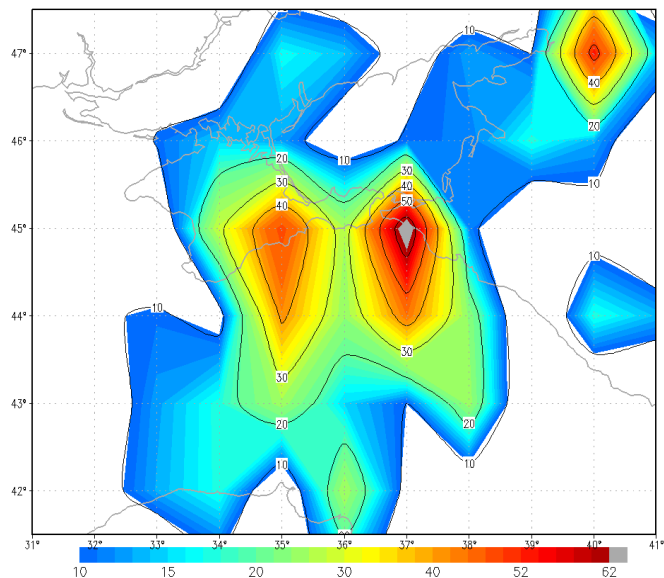


7 jul 2012



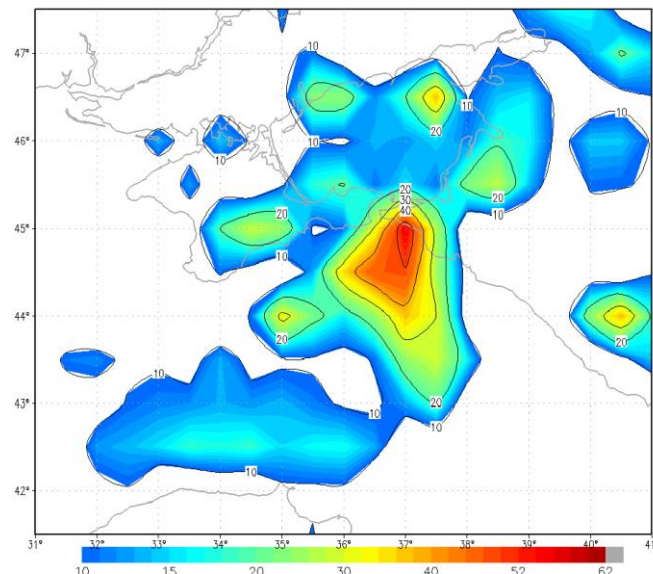
Осадки

NCEP/NCAR GFS, разрешение 1°x1°

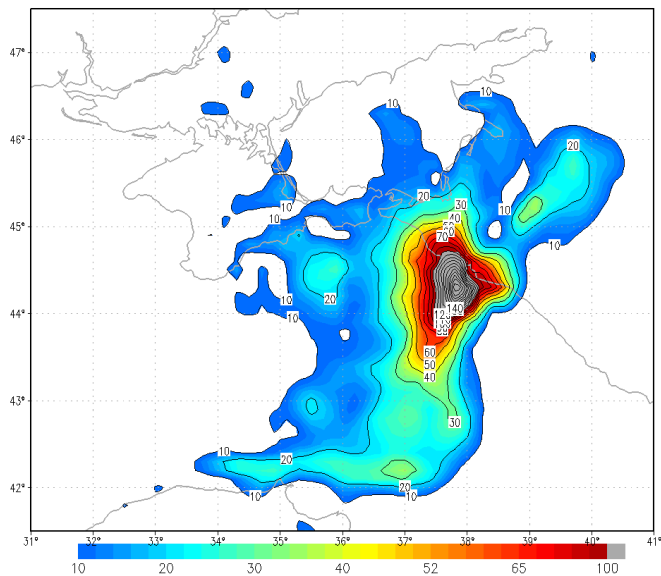


Новороссийск	275 мм
Геленджик	283 мм
Крымск	171 мм

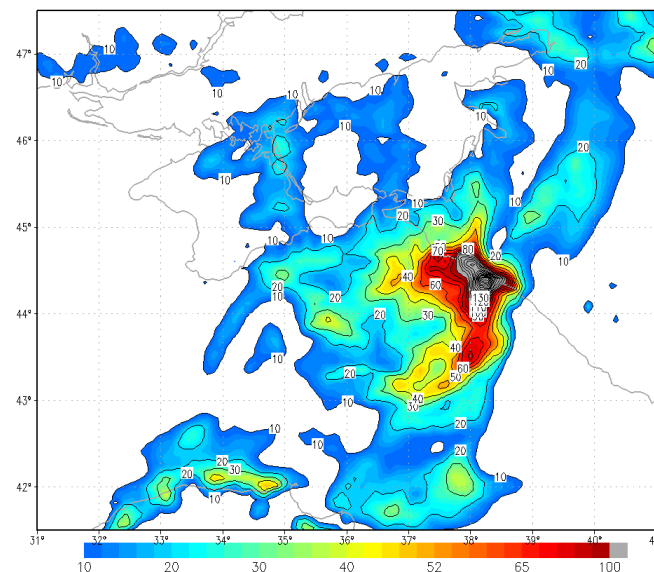
NCEP/NCAR GFS, разрешение 0.5°x0.5°



Оперативный прогноз, MM5, разрешение 10 km

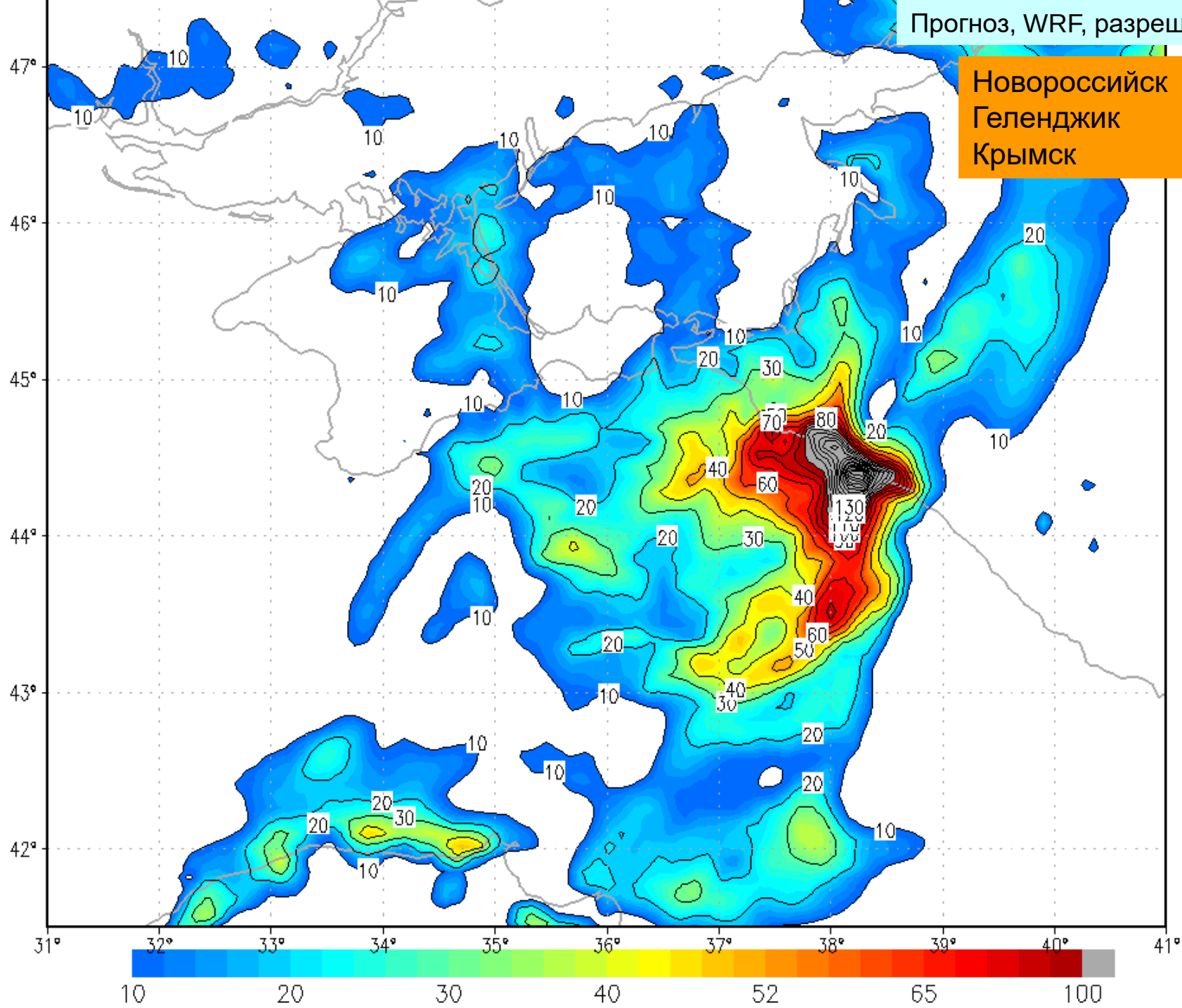


Прогноз, WRF, разрешение 5 km

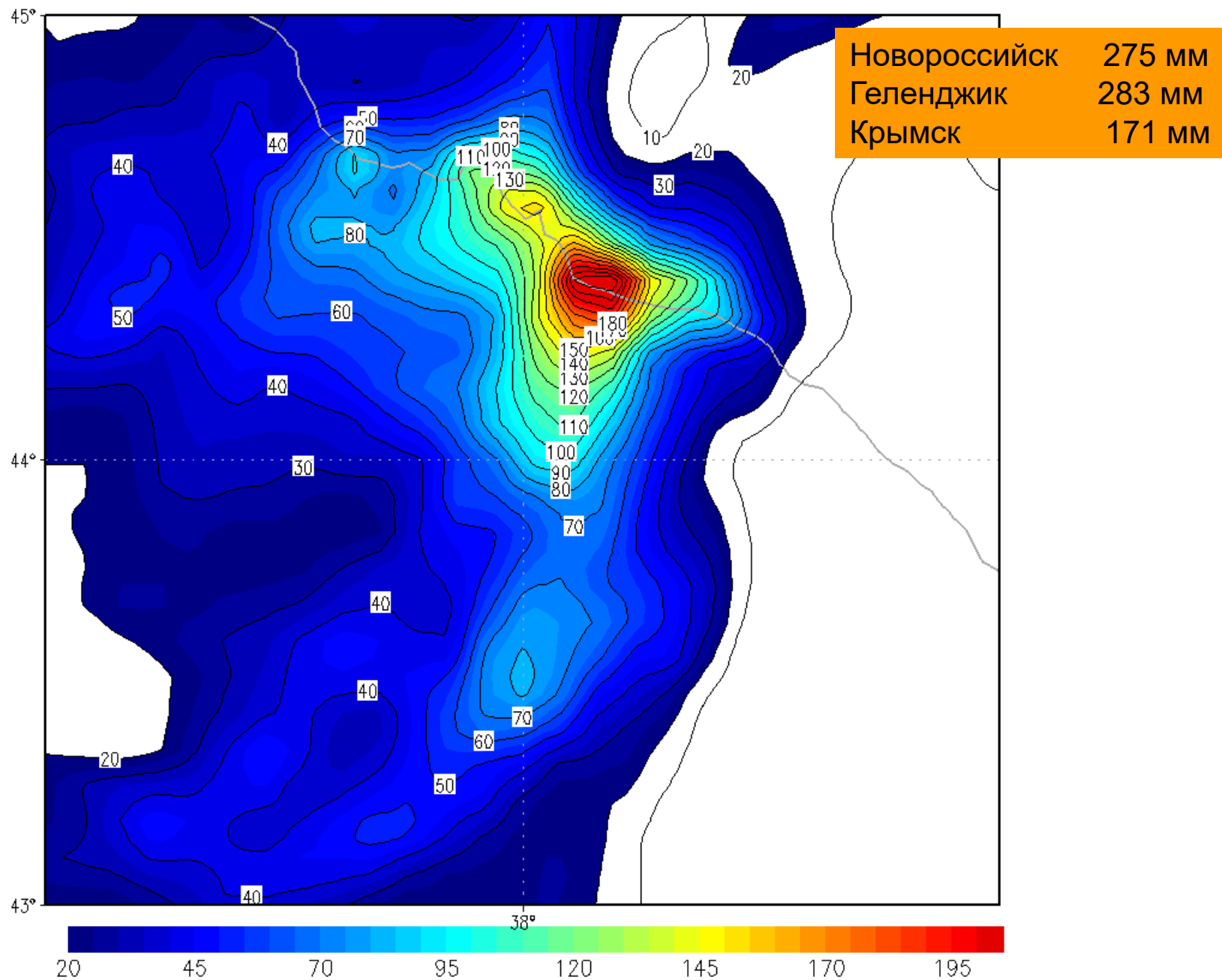


Прогноз, WRF, разрешение 5 km

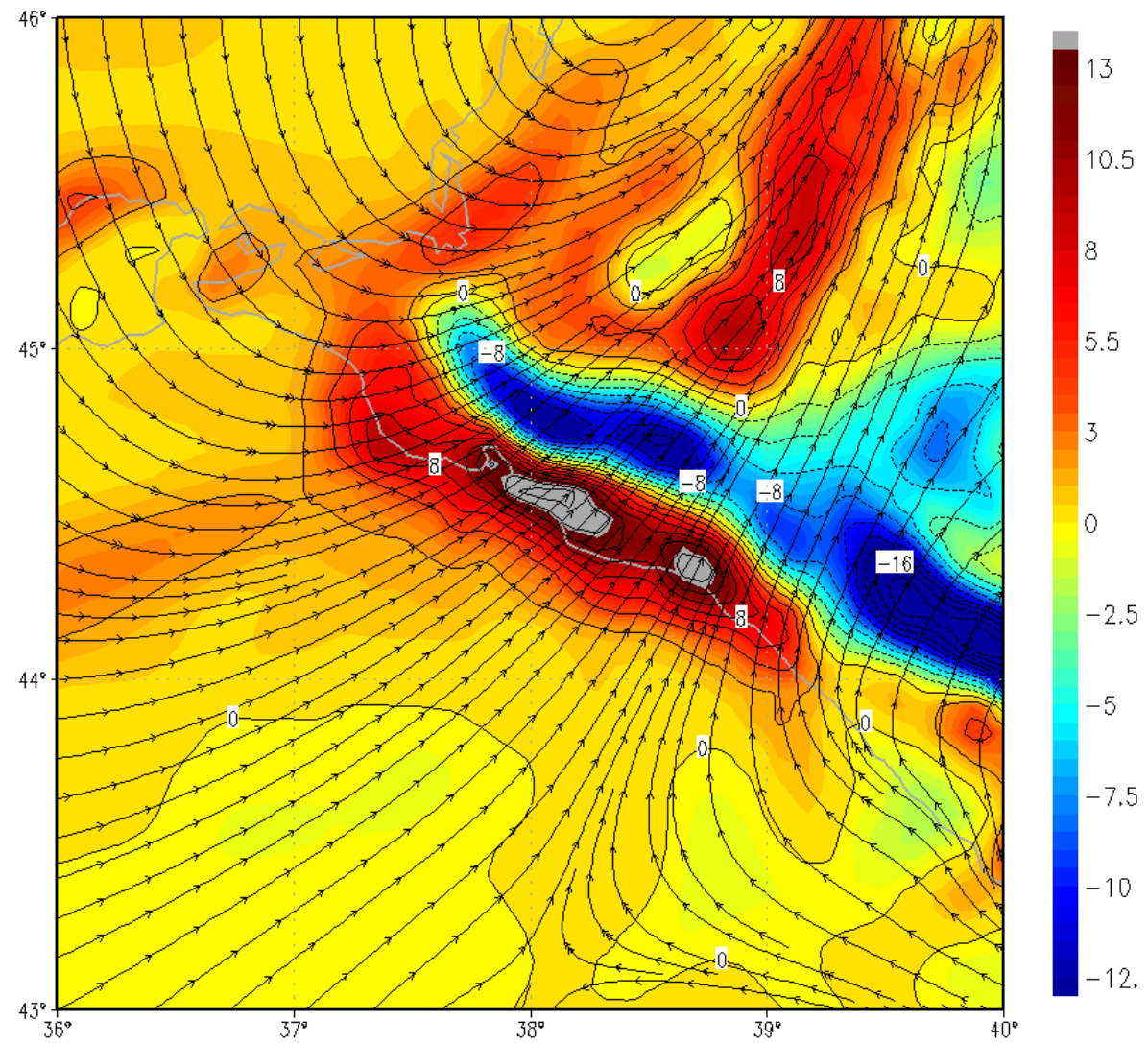
Новороссийск	275 мм
Геленджик	283 мм
Крымск	171 мм



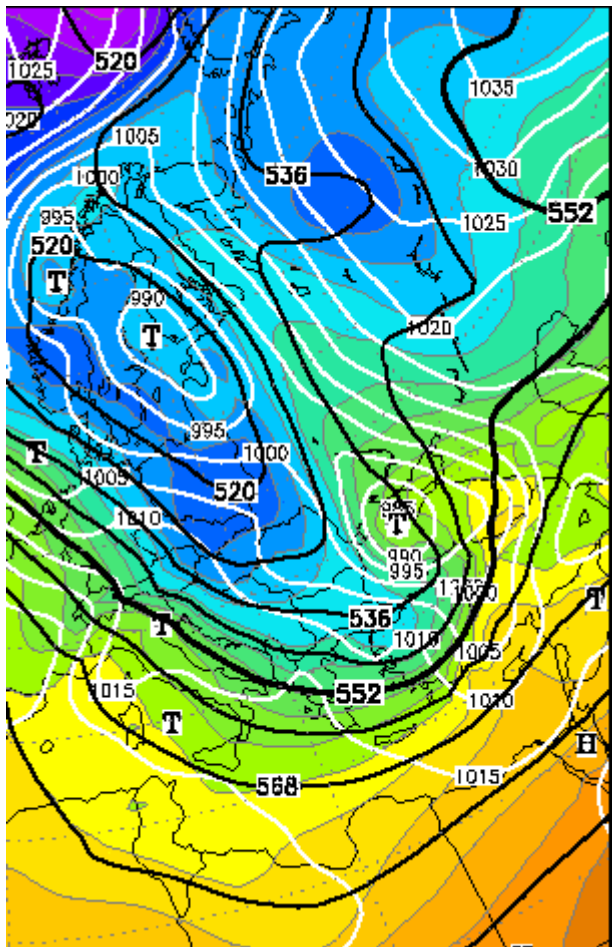
Прогноз, WRF, разрешение 5 km



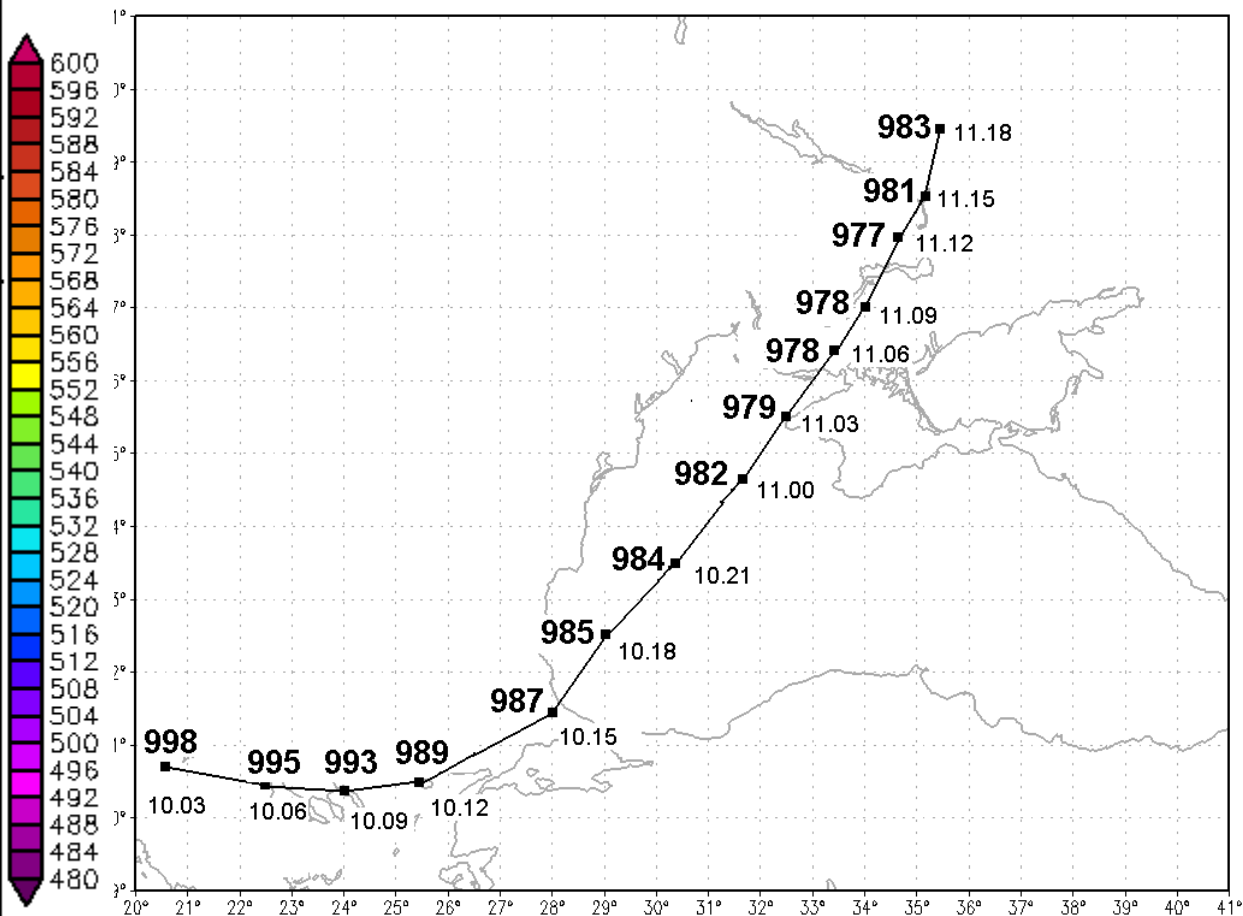
Вертикальная скорость, цветом, см/с
Горизонтальная скорость, линии тока



Катастрофический шторм 11 ноября 2007г

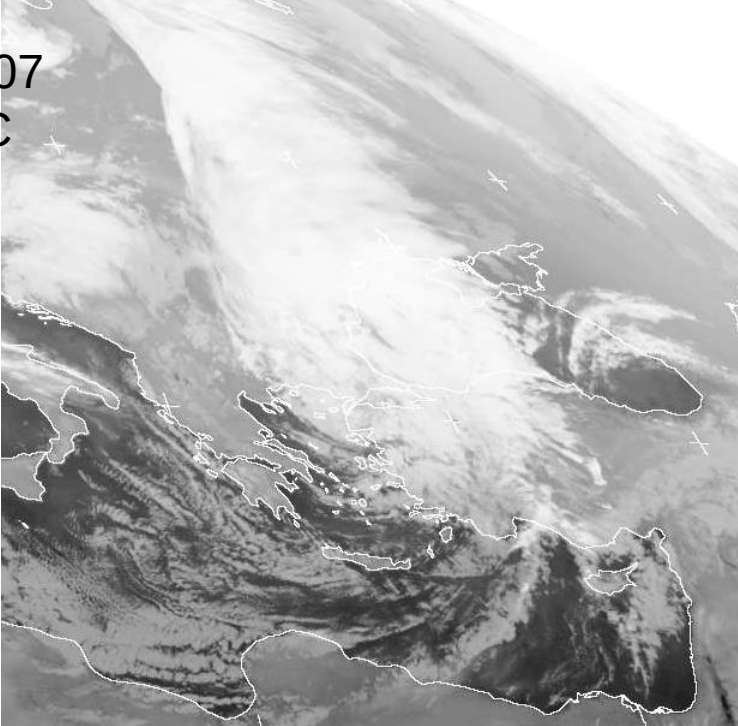


Геопотенциал Н500 мб
Н500мб-Н1000мб
Давление на уровне моря

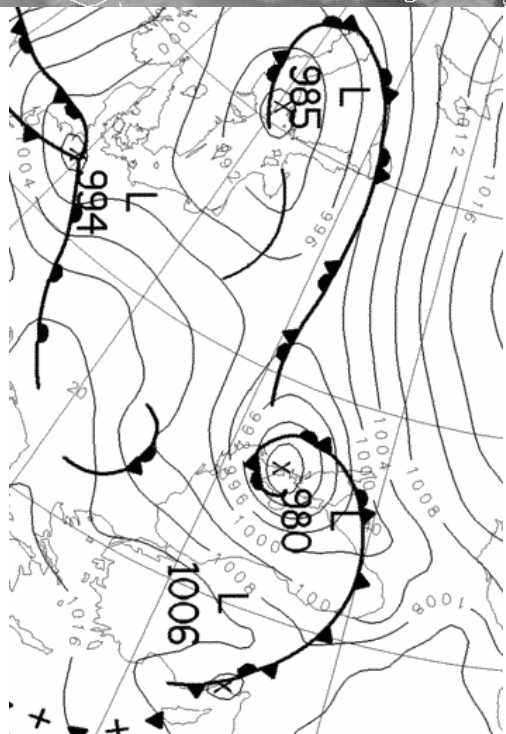
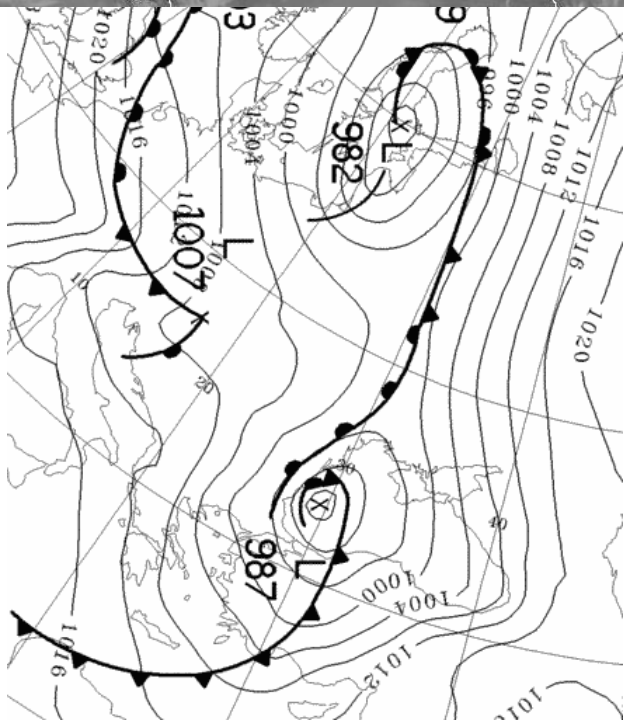
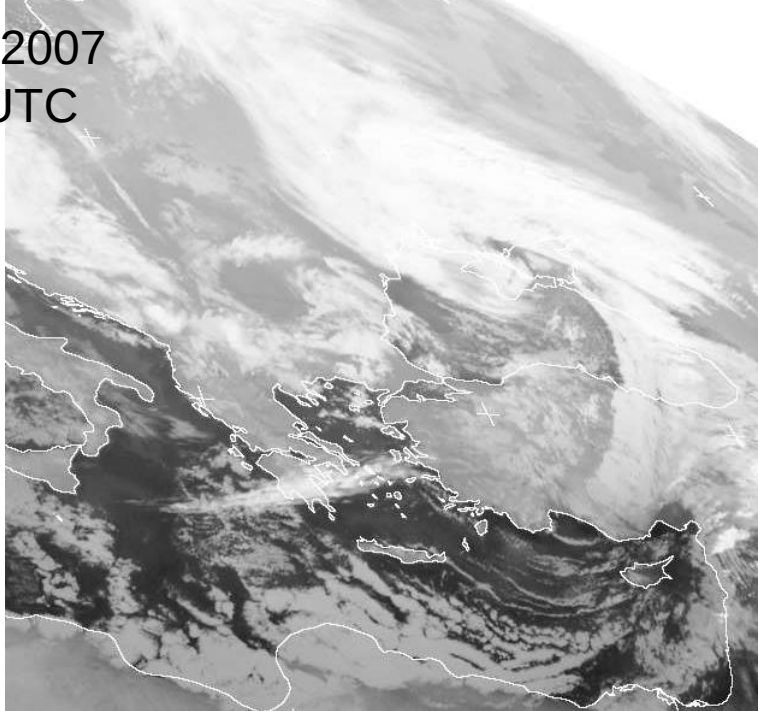


Траектория циклона
Минимальное давление

10 nov 2007
18:00 UTC



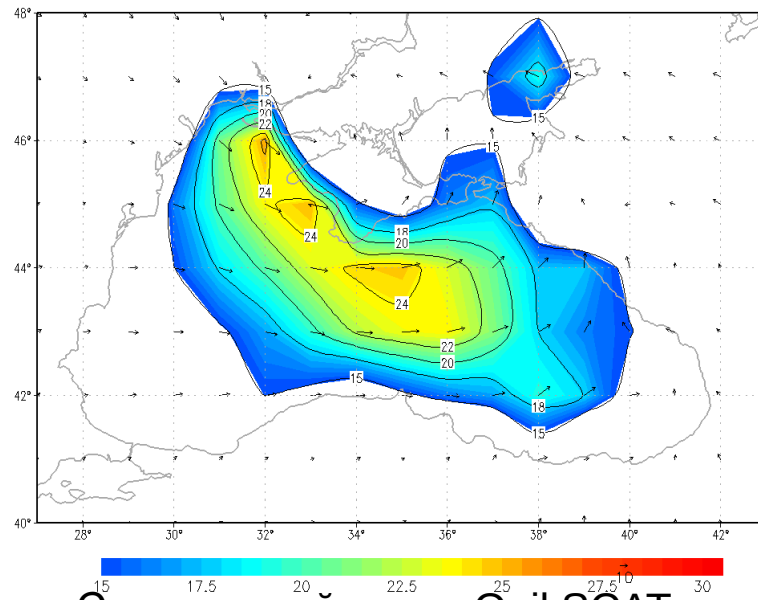
11 nov 2007
06:00 UTC



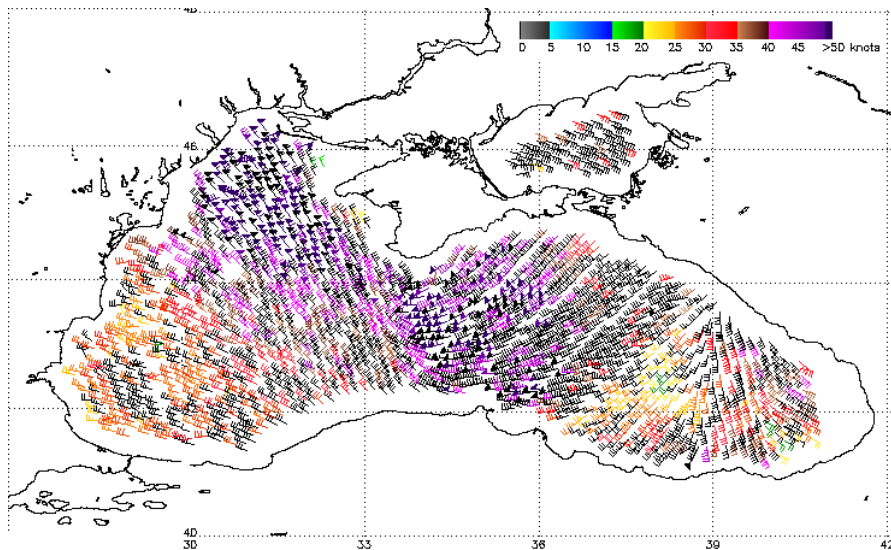
Скорость ветра

11 nov 2007 06:00 UTC

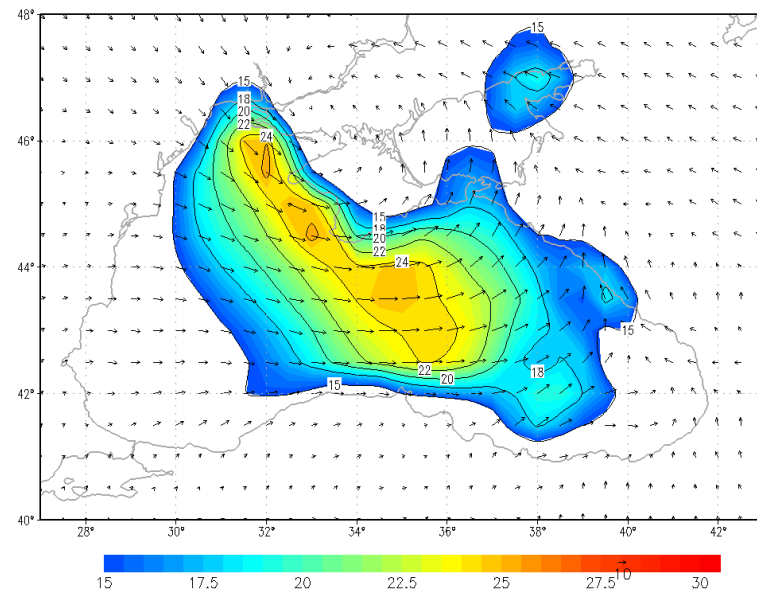
NCEP/NCAR GFS, разрешение 1°x1°



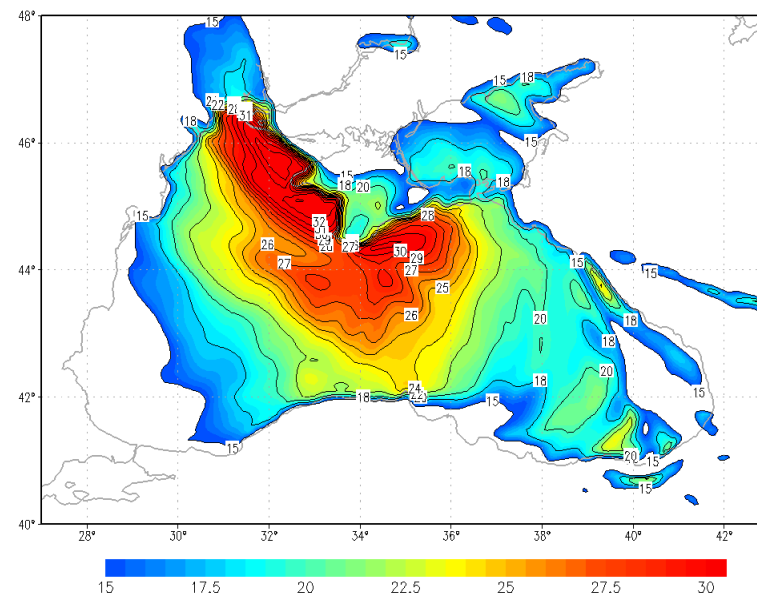
Спутниковый ветер QuikSCAT,
разрешение 12.5x12.5km

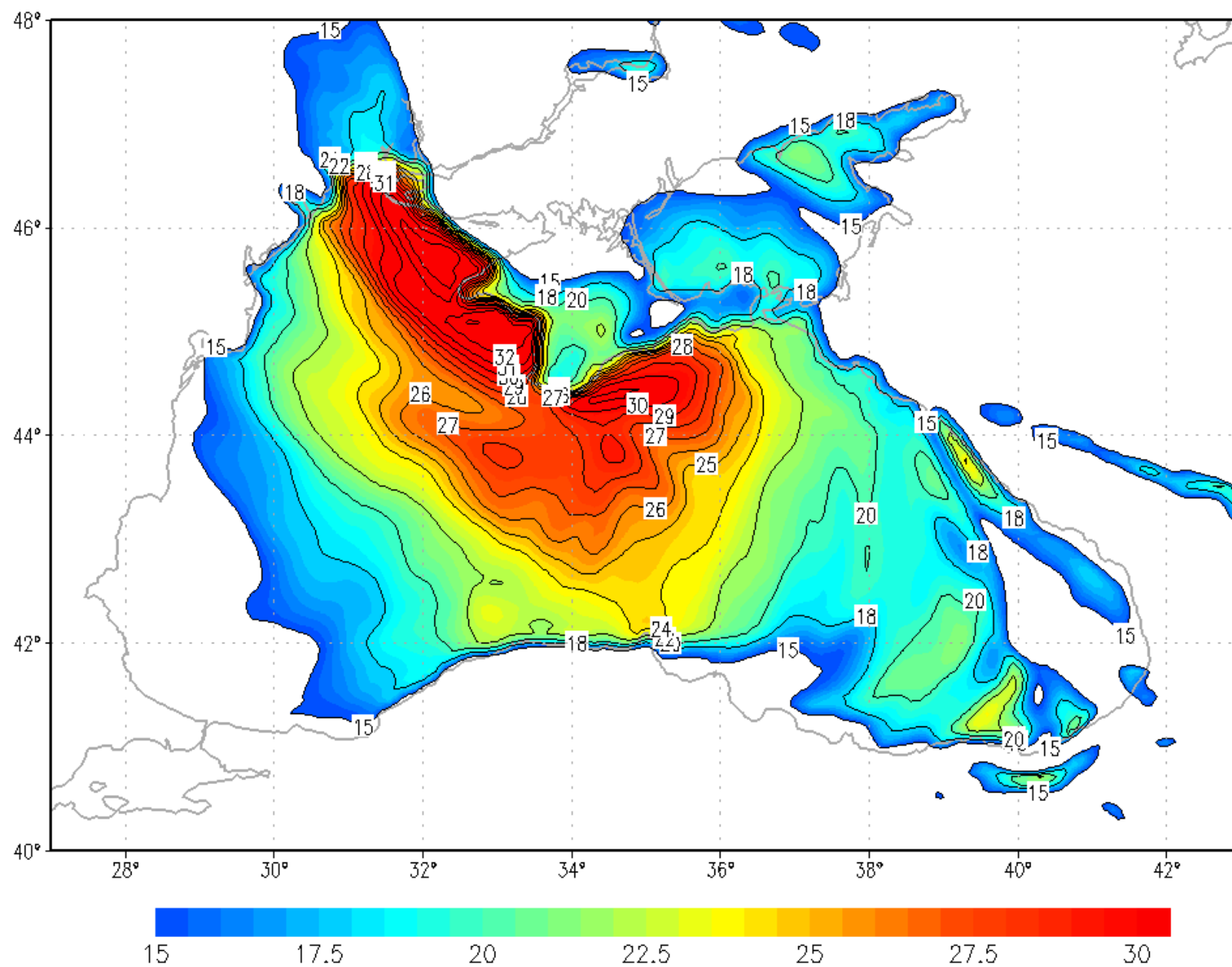


NCEP/NCAR GFS, разрешение 0.5°x0.5°



Прогноз WRF, разрешение 9x9km



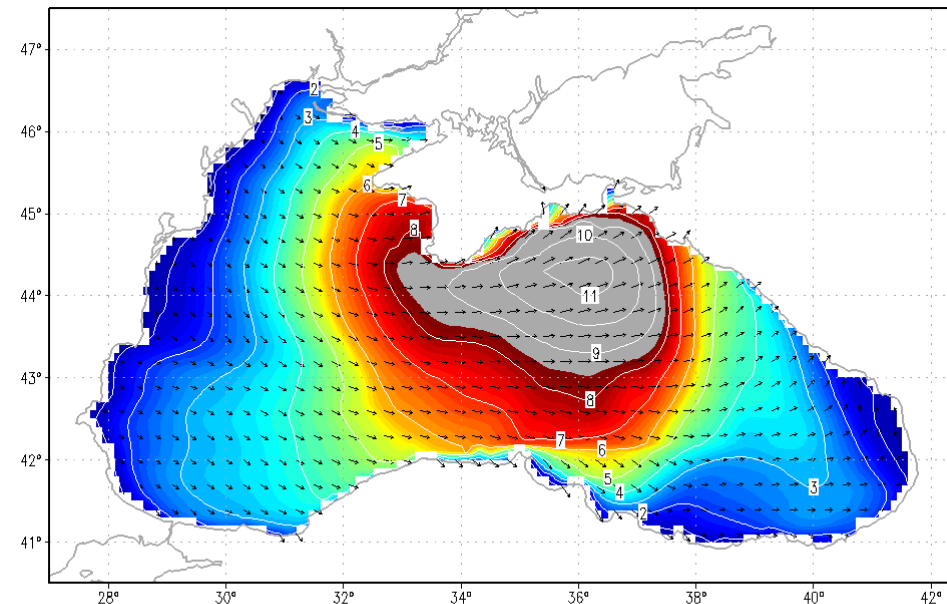
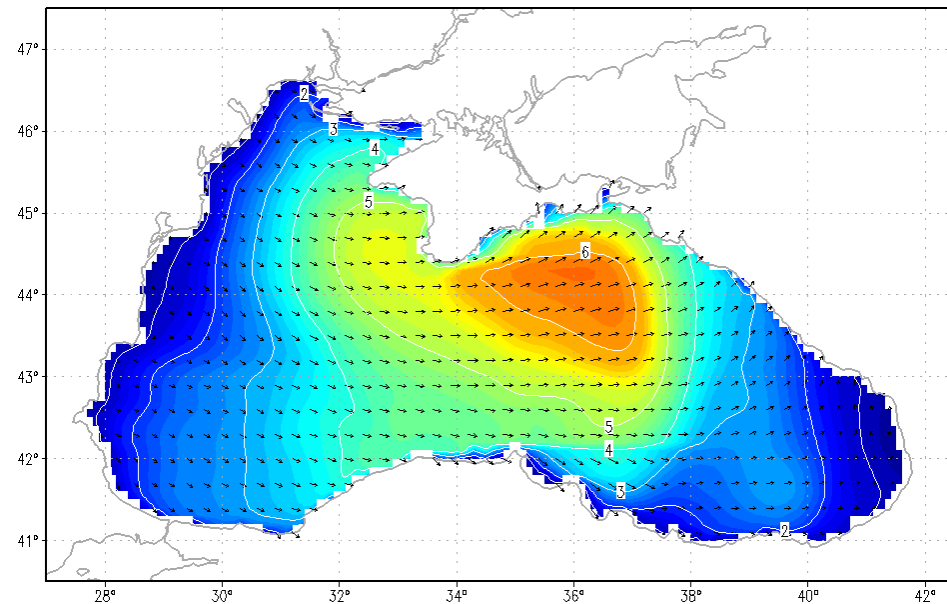


Прогноз ветровых волн
модель WAM
разрешение 10x10km

Входной ветер –
NCEP/ NCAR GFS, 0.5°x0.5°

11 nov 2007
10:00 UTC

Входной ветер –
WRF, resolution 9x9km



Спасибо за внимание