

Определение характеристик атмосферных движений по данным многоволнового зондирования из космоса

А.Ф. Нерушев*, Е.К. Крамчанинова*,
В.И. Соловьев**

*Институт экспериментальной метеорологии ГУ «НПО «Тайфун»,
г. Обнинск, пр. Ленина, 82.

**НИЦ «Планета», Москва, Б. Предтеченский пер., 7.

Введение

- Определение глобальных и региональных полей ветра - одна из важнейших практических задач, решаемых с помощью дистанционных спутниковых методов измерений.
- **Цель доклада:**
 - изложить метод, позволяющий определять не только вектор горизонтальной скорости ветра (\mathbf{V}), но также завихренность ($\text{rot}\mathbf{V}$) и коэффициент горизонтальной турбулентной диффузии (K_d);
 - продемонстрировать возможности метода на примере расчета динамических характеристик атмосферы по данным радиометра **SEVIRI** геостационарного метеорологического спутника **Meteosat-8**.

Геостационарный спутник Meteosat-8

- Meteosat-8 или MSG-1 (**M**eteosat **S**econd **G**eneration) - усовершенствованный геостационарный метеорологическим спутником второго поколения. Оперативная фаза эксплуатации спутника началась 29 января 2004 г. Точка стояния спутника 3.4° западной долготы.
- Радиометрическая аппаратура SEVIRI (**S**pinning **E**nhanced **V**isible and **I**nfra **R**ed **I**mager) обеспечивает каждые 15 минут получение изображений видимого диска Земли в 12 спектральных диапазонах, с разрешением в подспутниковой точке:
 - 3 км – в 11 спектральных каналах;
 - 1 км – в канале 0.5-0.9 мкм.

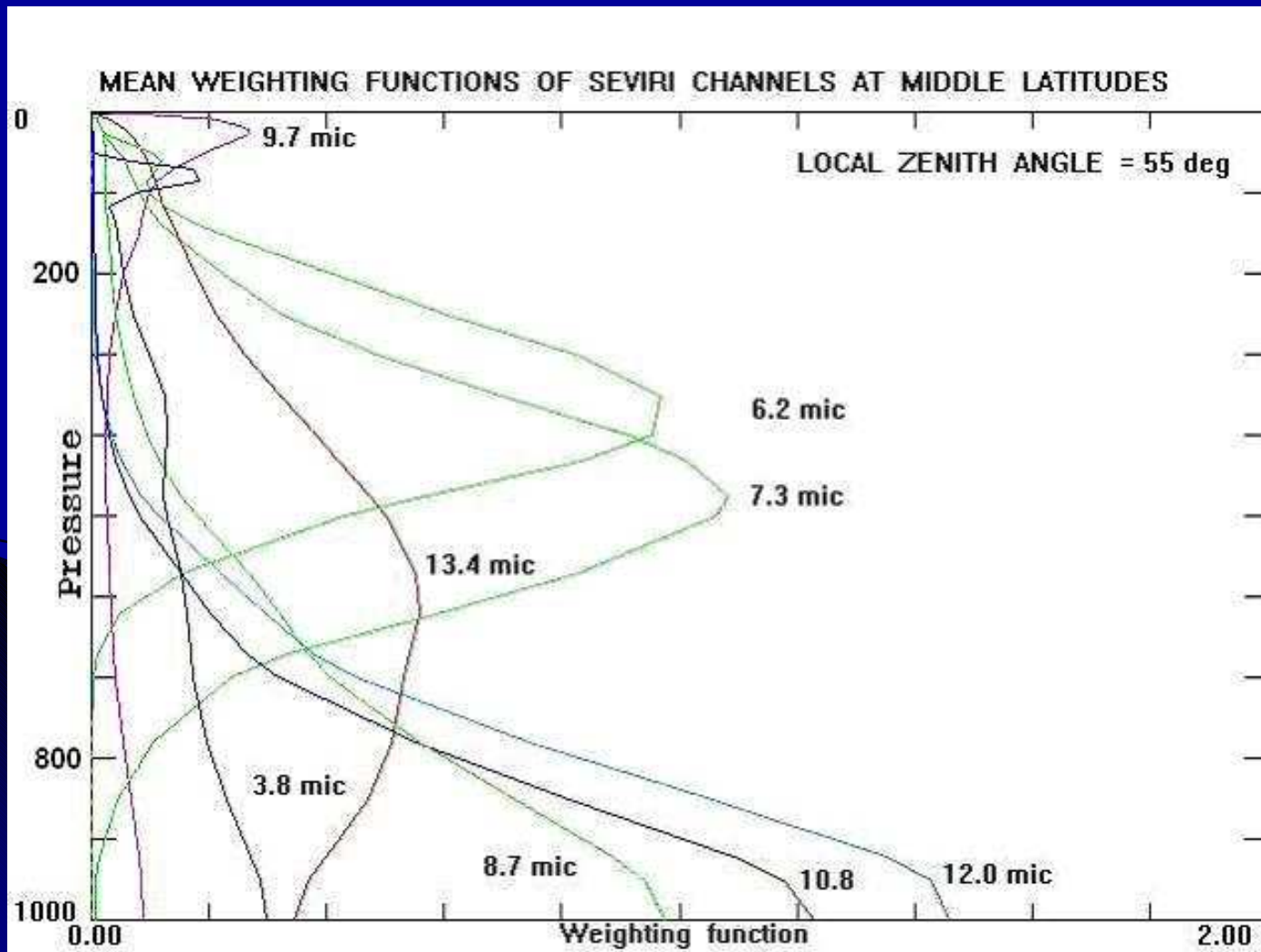
Характеристики радиометра SEVIRI спутника MSG

Basic	Band (μm)	Airmass	Band (μm)
VIS 0.6	0.56 - 0.71	WV 6.2	5.35 - 7.15
VIS 0.8	0.74 - 0.88	WV 7.3	6.85 - 7.85
IR 1.6	1.50 - 1.78	IR 8.7	8.30 - 9.10
IR 3.9	3.48 - 4.36	O ₃ 9.7	9.38 - 9.94
IR 10.8	9.80 - 11.80	CO ₂ 13.4	12.40 - 14.40
IR 12.0	11.00 - 13.00		
		High Res VIS	1 km sampling
		HRV	0.5 - 0.9

Basic + Airmass + Hi Res Vis Missions
3 km data sampling intervals at Sub-Satellite Point (SSP),
except 1 km High Resolution Visible (HRV)
Images each 15 minutes

- Повышение пространственного и временного разрешения спутниковых снимков позволяет улучшать качество восстановления полей ветра.
- Добавление новых частотных каналов радиометра позволяет расширить диапазон высот восстановления поля ветра.

Весовые функции ИК каналов радиометра SEVIRI

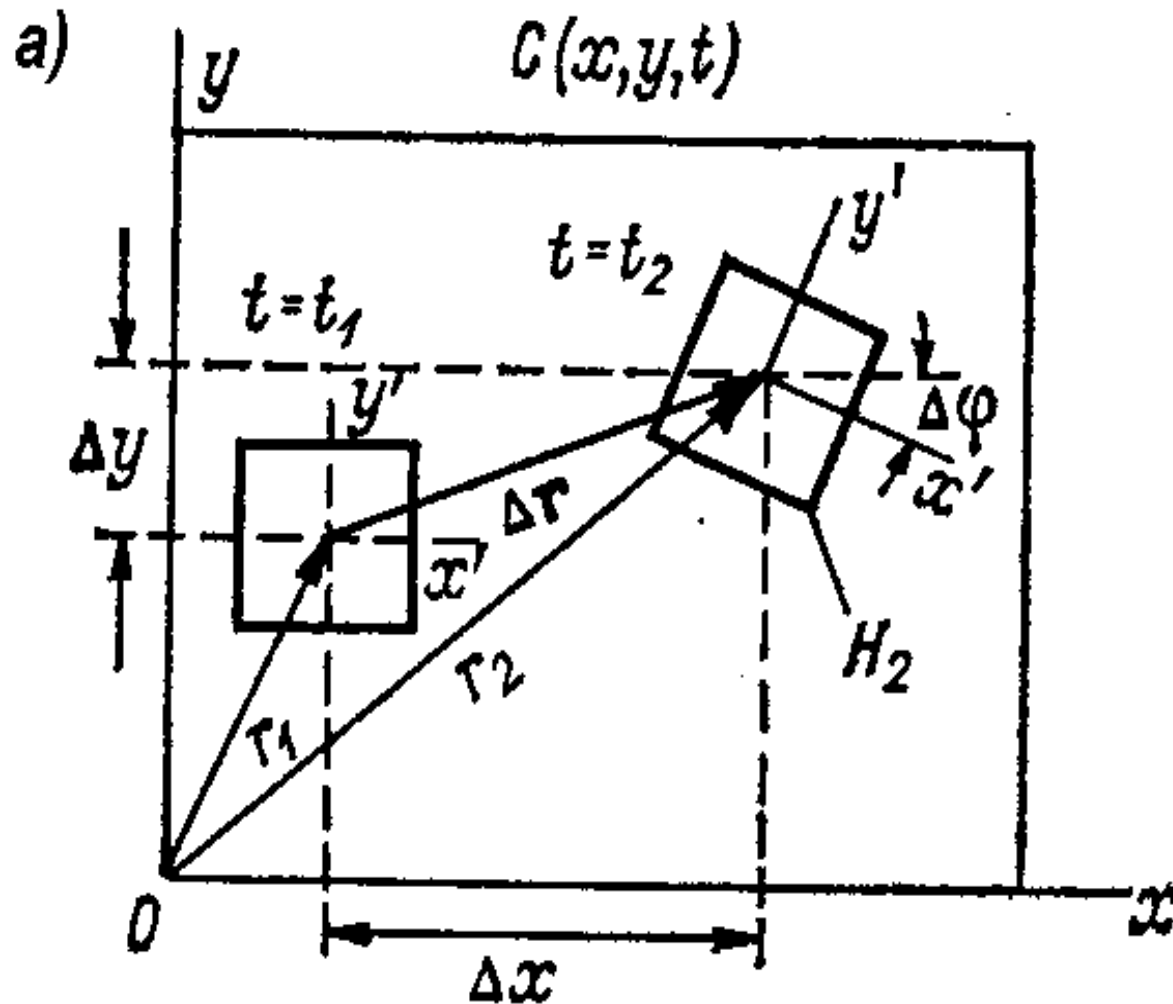


- Высоты максимумов весовых функций каналов водяного пара для средних широт:
- ~350 гПа (6.2 мкм),
- ~500 гПа (7.3 мкм)

Физико-математическая модель метода

- Суть рассматриваемого подхода состоит в определении кинематических характеристик случайного поля статистическими методами.
- В качестве атмосферных трассеров используются неоднородности поля концентрации консервативной примеси (водяного пара).
- Случайное поле – получаемое со спутника поле относительной влажности $U(x,y,t)$, где x, y - оси плоской декартовой системы координат, t - время.
- Двумерная (плоская) модель адекватна спутниковой информации, получаемой в каналах водяного пара.
- Физически это означает, что **влиянием вертикальных движений на поле U можно пренебречь.**

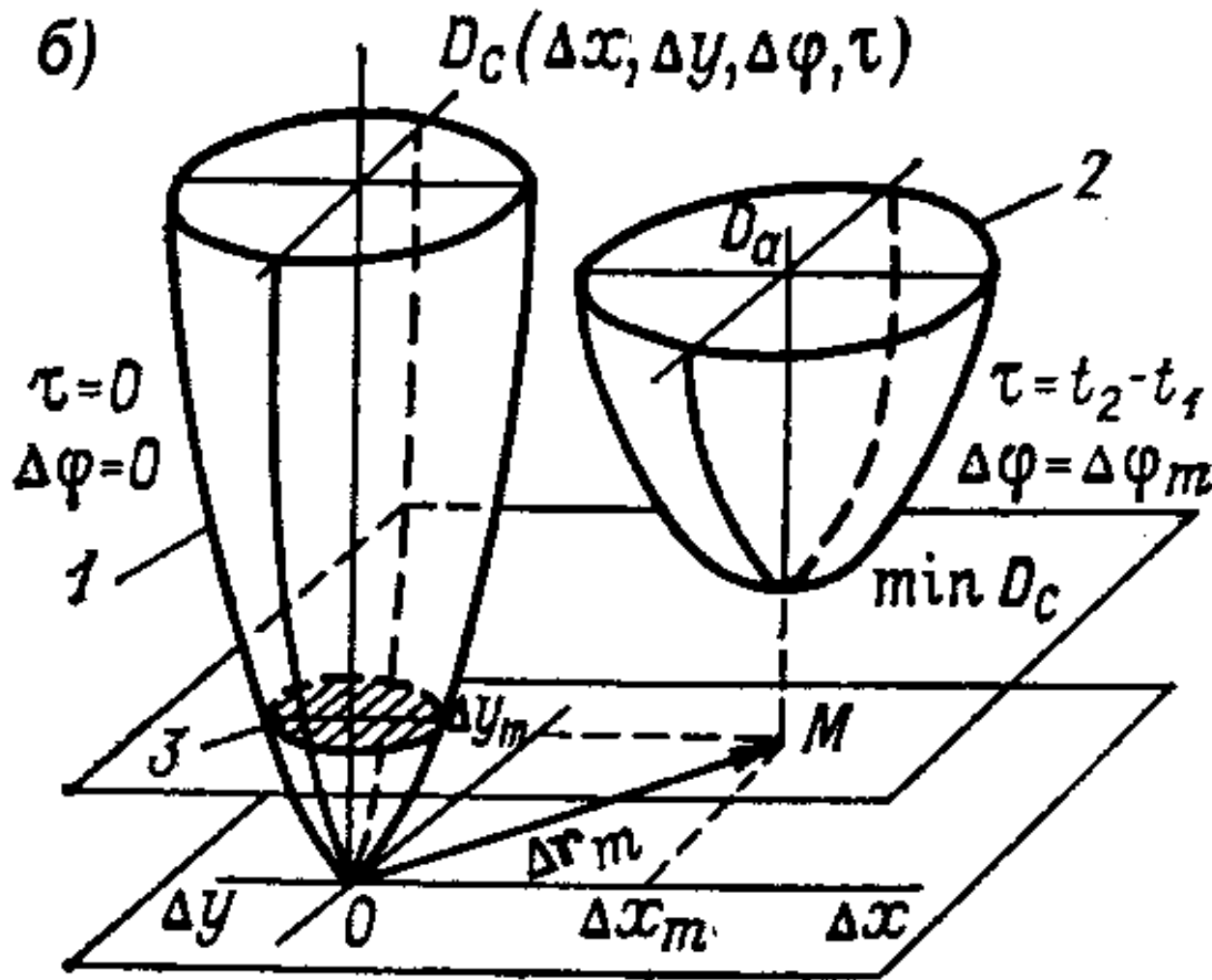
Физико-математическая модель метода



а) Движение поля $C(x, y, t)$:

- перенос (вектор горизонтальной скорости ветра V);
- вращение вокруг мгновенной оси, проходящей через ее центр ($\text{rot } V$);
- деформация, обусловленная диффузионными процессами.
- H_2 – оператор двумерной пространственной фильтрации.
- Δr – вектор перемещения центров областей относительно друг друга.
- $\Delta \varphi$ – угол вращения.

Физико-математическая модель метода



Двумерная обратная задача
статистического анализа
случайного поля

б) Вид структурной функции
 $D_c(\Delta x, \Delta y, \Delta \varphi, \tau)$

1 – пространственная структурная
функция.

2 – пространственно-временная
структурная функция.

3 – площадь сечения
пространственной D_c на уровне
 \min пространственно-временной
 D_c .

Физико-математическая модель метода

- По сдвигам Δx , Δy , $\Delta \varphi$, при которых достигается глобальный минимум пространственно-временной структурной функции

$$\min D_c = D_c(\Delta x_m, \Delta y_m, \Delta \varphi_m, T = t_2 - t_1),$$

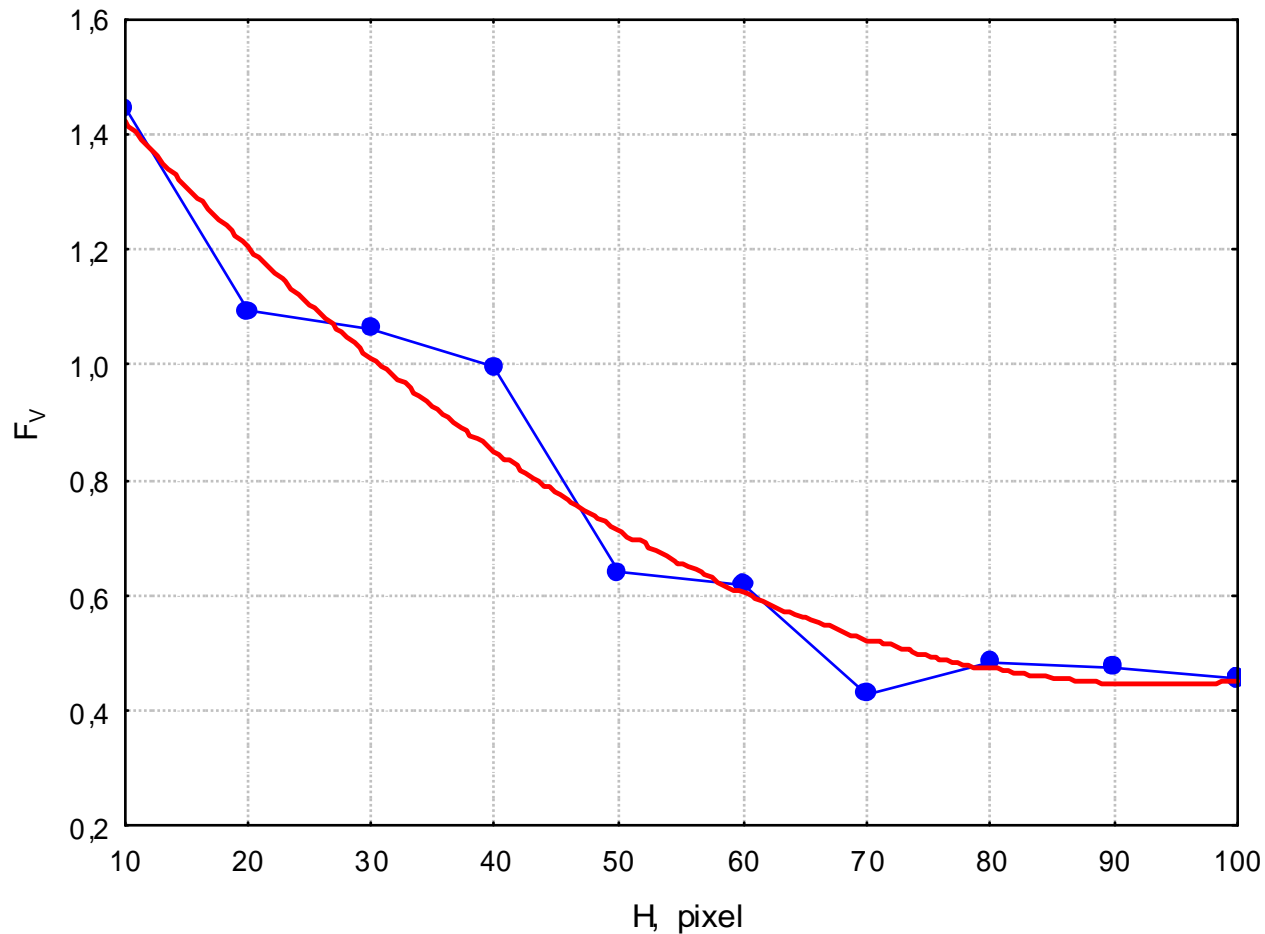
вычисляются (V_x и V_y), завихренность ($\text{rot } \mathbf{V}$) и скорость временной эволюции (V_{te}), характеризующая «незамороженность» поля U :

$$V_x = \Delta x_m / (t_2 - t_1), \quad V_y = \Delta y_m / (t_2 - t_1),$$
$$\text{rot } \mathbf{V} = \Delta \varphi_m / (t_2 - t_1); \quad V_{te} = r_e / (t_2 - t_1) .$$

- На основе двумерной модели диффузии

$$K_d = a \cdot V_{te} \cdot r_e, \quad \text{где } a \cong 1$$

Выбор размера «рабочего окна» (оператор H)



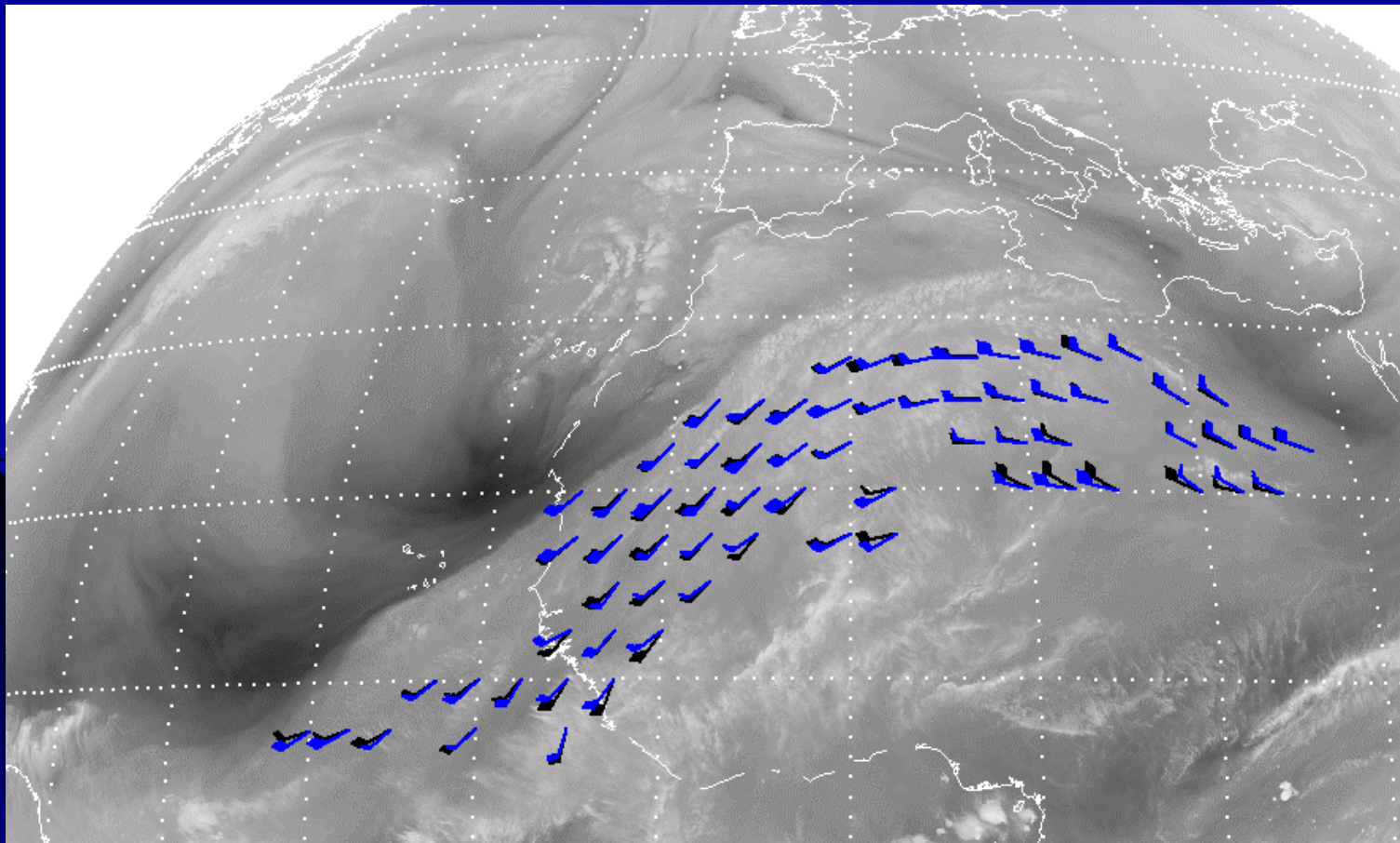
Средняя оценка точности
расчета модуля V
при разных линейных размерах
 H .

6.2 мкм канал водяного пара.
Meteosat-8. Апрель 2005.
 $t = 12:00$ UTC, $\Delta t = 15$ мин.

$$F_V = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|(V_H)_i - (V_{mean})_i|}{SD_i}$$

SD – стандартное отклонение
($N=50$)

Результаты расчетов скорости ветра в узлах регулярной сетки 2.5 x 2.5 градусов



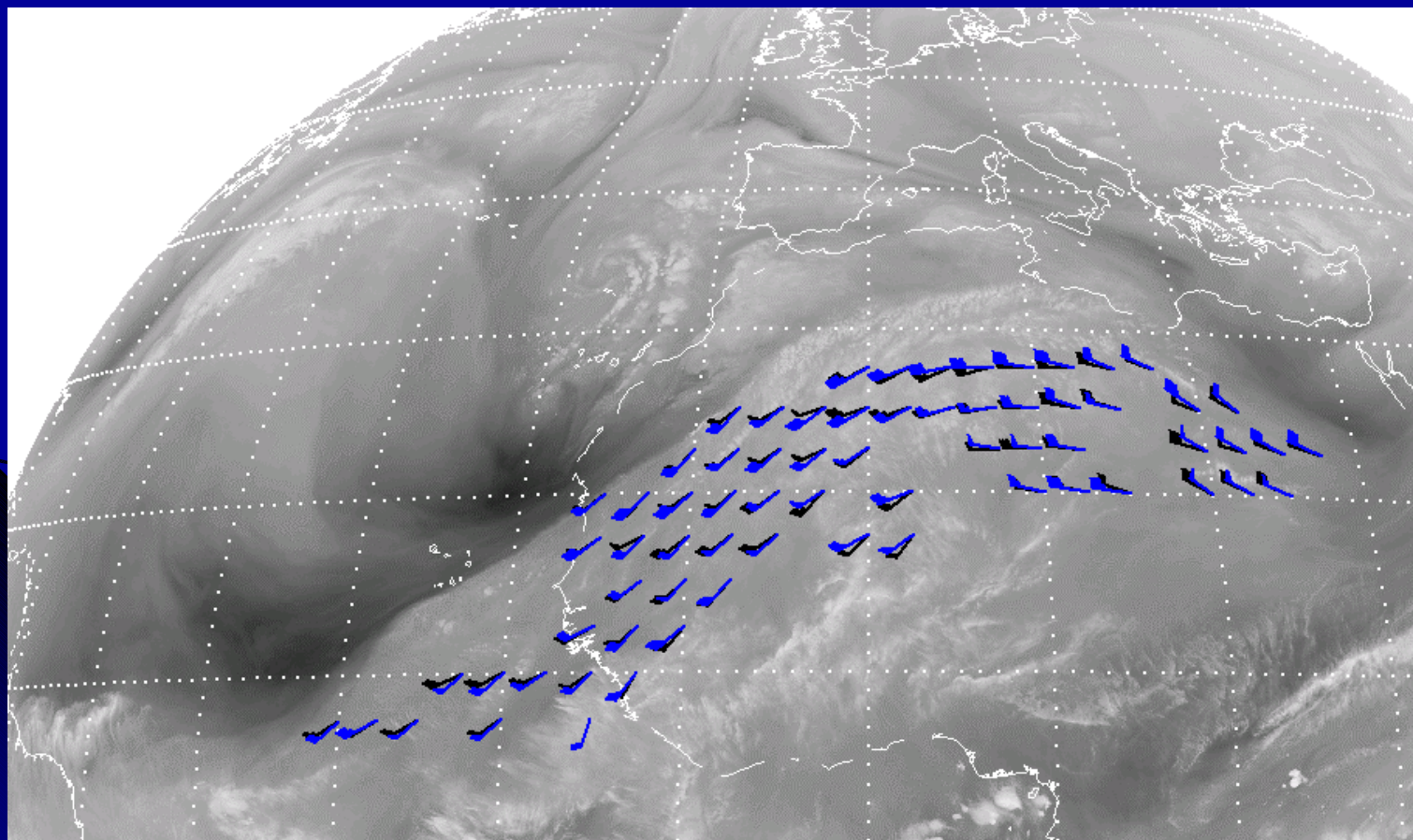
10 февраля 2006.

6.2 мкм канал
водяного пара.

Синие флажки –
результаты
расчета

Черные флажки –
данные
объективного
анализа на уровне
300 гПа
(Гидрометцентр
РФ).

Результаты расчетов скорости ветра в узлах регулярной сетки 2.5 x 2.5 градусов



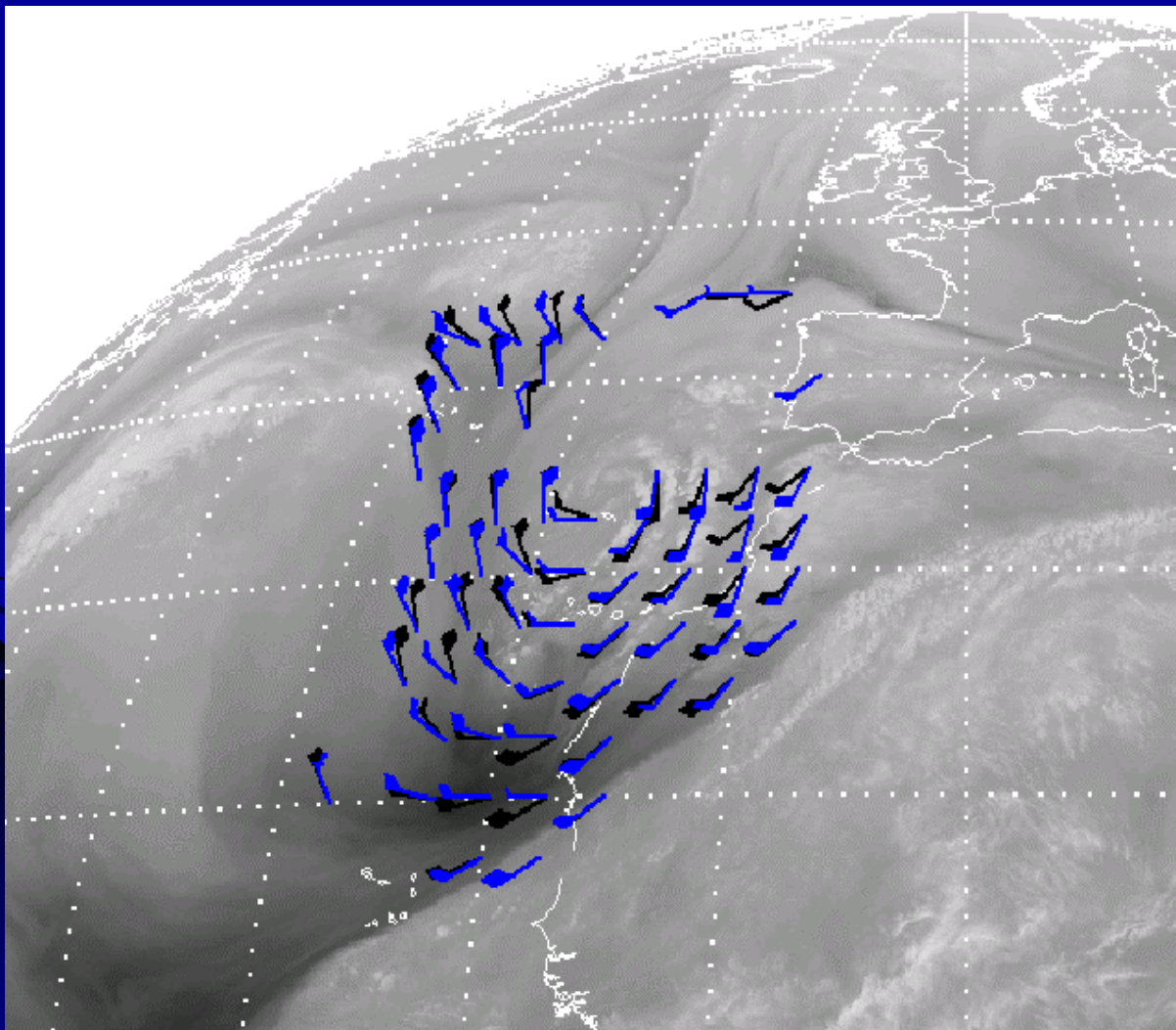
10 февраля 2006.

7.3 мкм канал
водяного пара.

Синие флажки –
результаты
расчета.

Черные флажки –
данные
объективного
анализа на уровне
500 гПа
(Гидрометцентр
РФ).

Пример расчета скорости ветра в области с циклонической циркуляцией

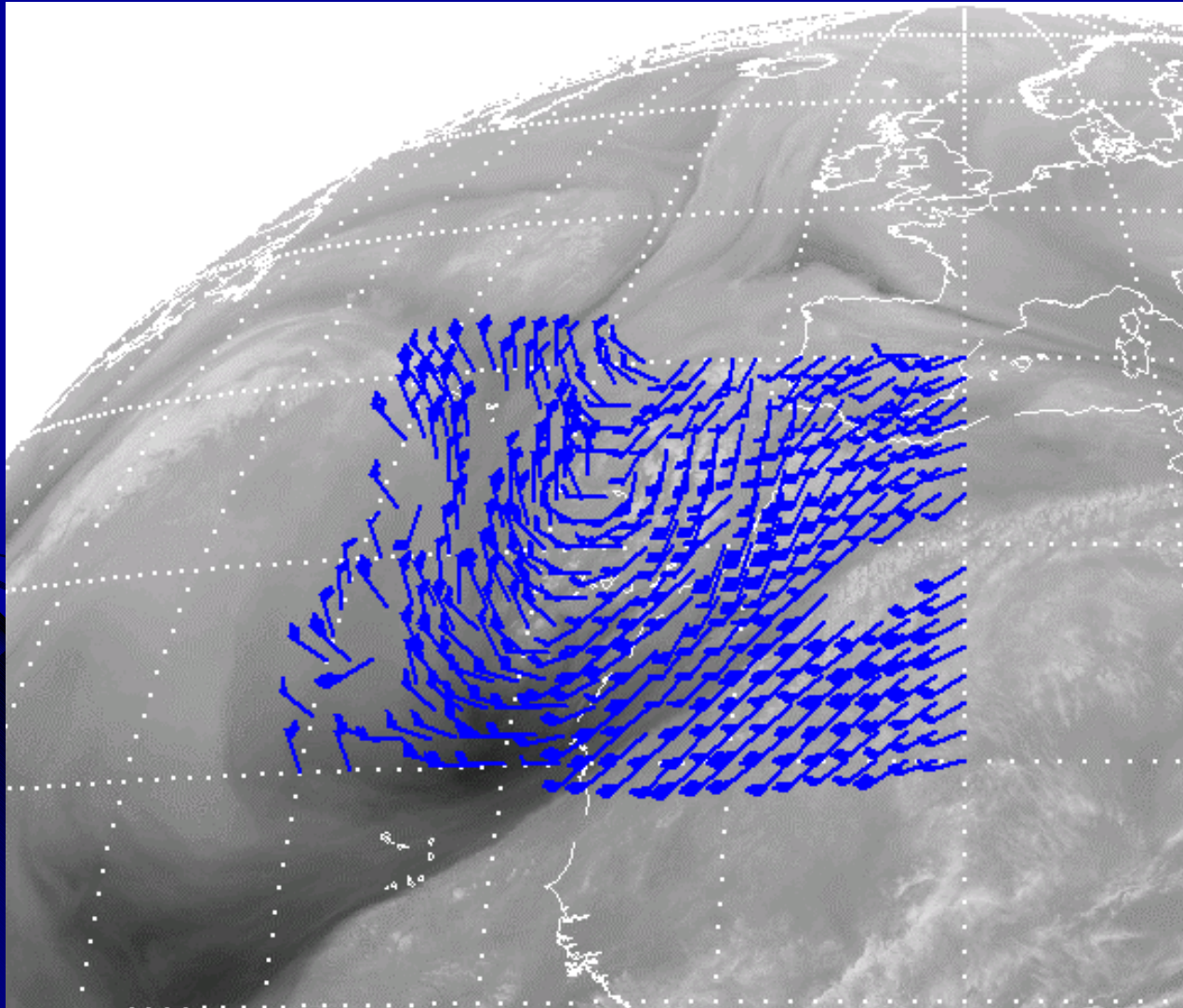


10 февраля 2006.
6.2 мкм канал
водяного пара.

Синие флажки –
результаты расчета

Черные флажки –
данные объективного
анализа на уровне 300
гПа (Гидрометцентр
РФ).

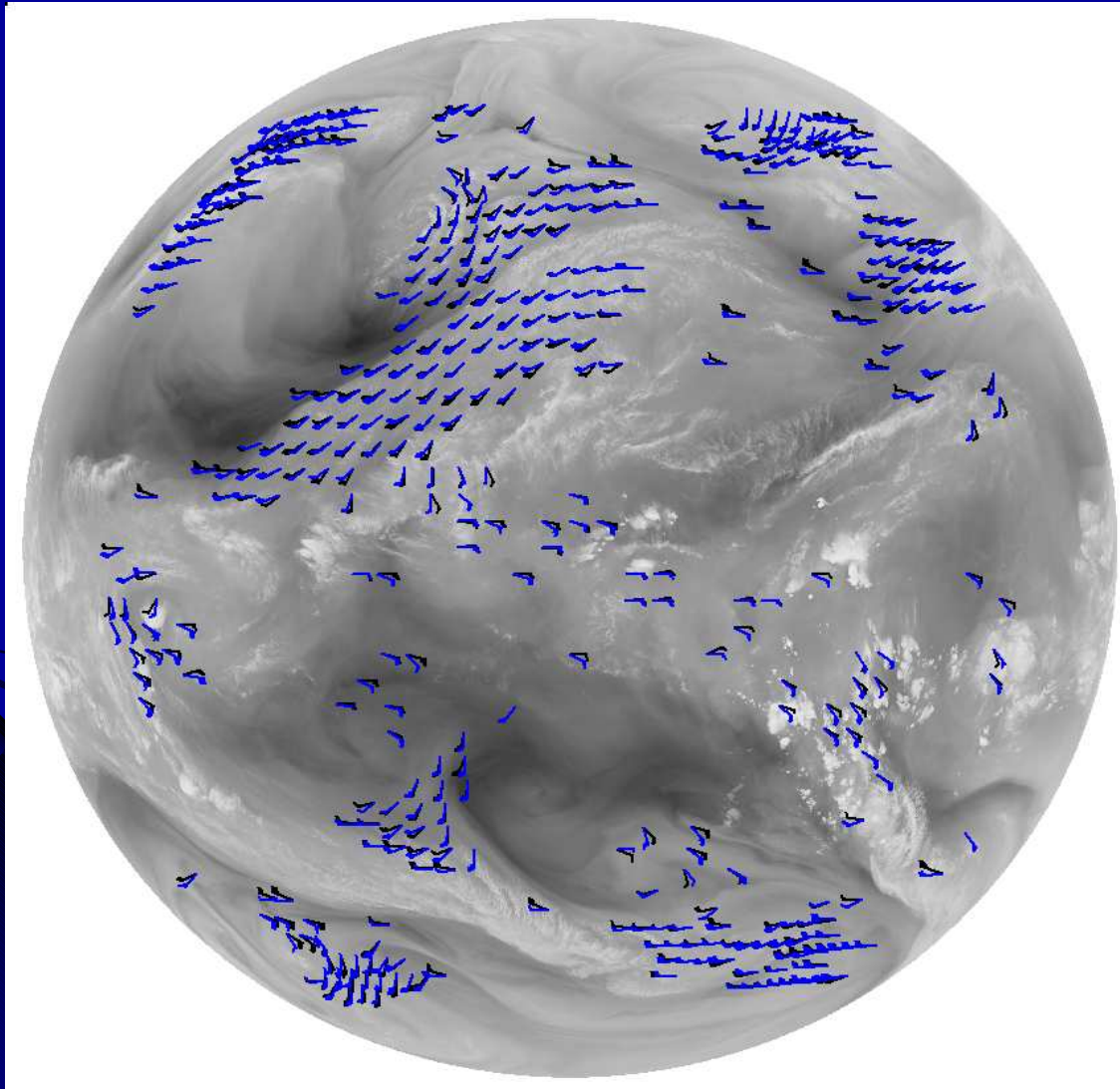
Результаты расчетов скорости ветра в узлах регулярной сетки $1.25^{\circ} \times 1.25^{\circ}$



10 февраля 2006.

6.2 мкм канал
водяного пара.

Результаты расчетов скорости ветра в узлах регулярной сетки $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ по всему диску



10 февраля 2006.

6.2 мкм канал водяного
пара.

Количество векторов $N = 434$

Черные флажки – данные
объективного анализа на
уровне 400 гПа.

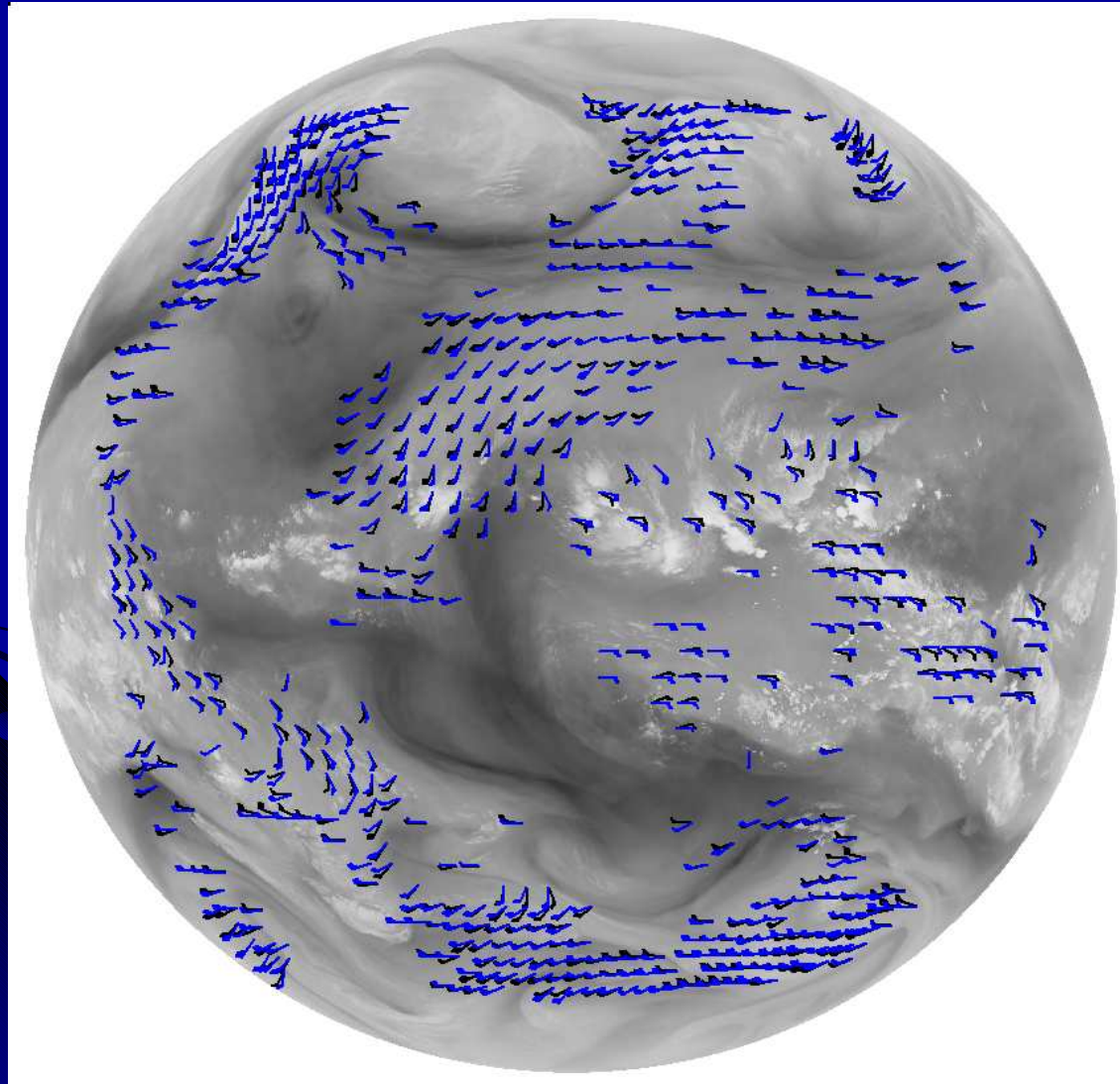
$$\langle |V| \rangle = 24.2 \text{ м/с.}$$

$$(\langle |V| \rangle)_{\text{об.ан.}} = 22.7 \text{ м/с.}$$

$$\text{Ср. квад. отк.} = 9.7 \text{ м/с.}$$

$$\text{Ср. ариф. отк.} = 1.5 \text{ м/с.}$$

Результаты расчетов скорости ветра в узлах регулярной сетки $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ по всему диску



10 марта 2006.

7.3 мкм канал водяного
пара.

Количество векторов $N = 514$

Черные флажки – данные
объективного анализа на
уровне 500 гПа.

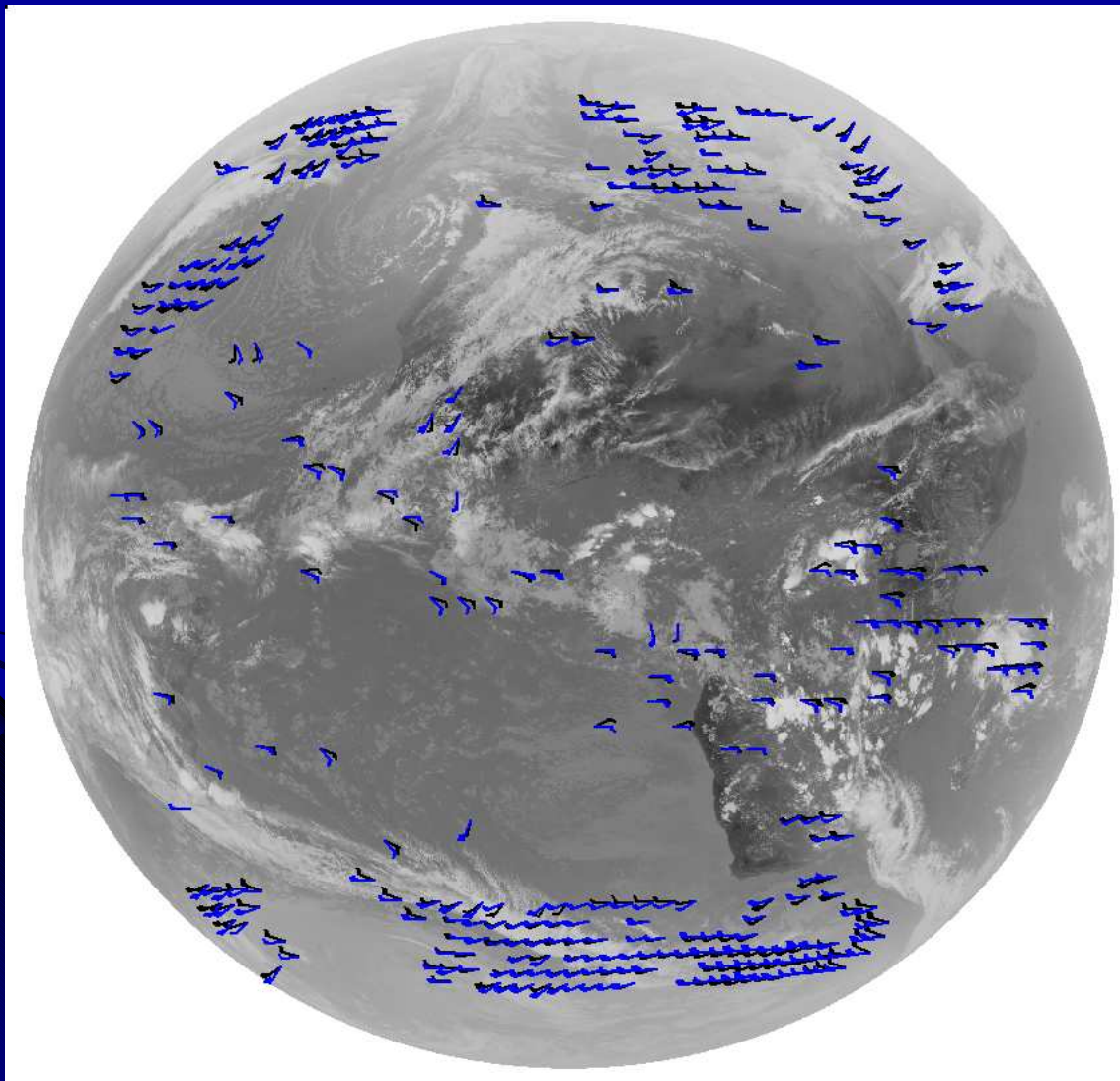
$$\langle |V| \rangle = 21.4 \text{ м/с.}$$

$$(\langle |V| \rangle)_{\text{об.ан.}} = 18.3 \text{ м/с.}$$

$$\text{Ср. квад. отк.} = 9.0 \text{ м/с.}$$

$$\text{Ср. ариф. отк.} = 3.3 \text{ м/с.}$$

Результаты расчетов скорости ветра в узлах регулярной сетки $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ по всему диску



10 февраля 2006.
Канал 9.7 мкм.

Количество векторов $N = 325$

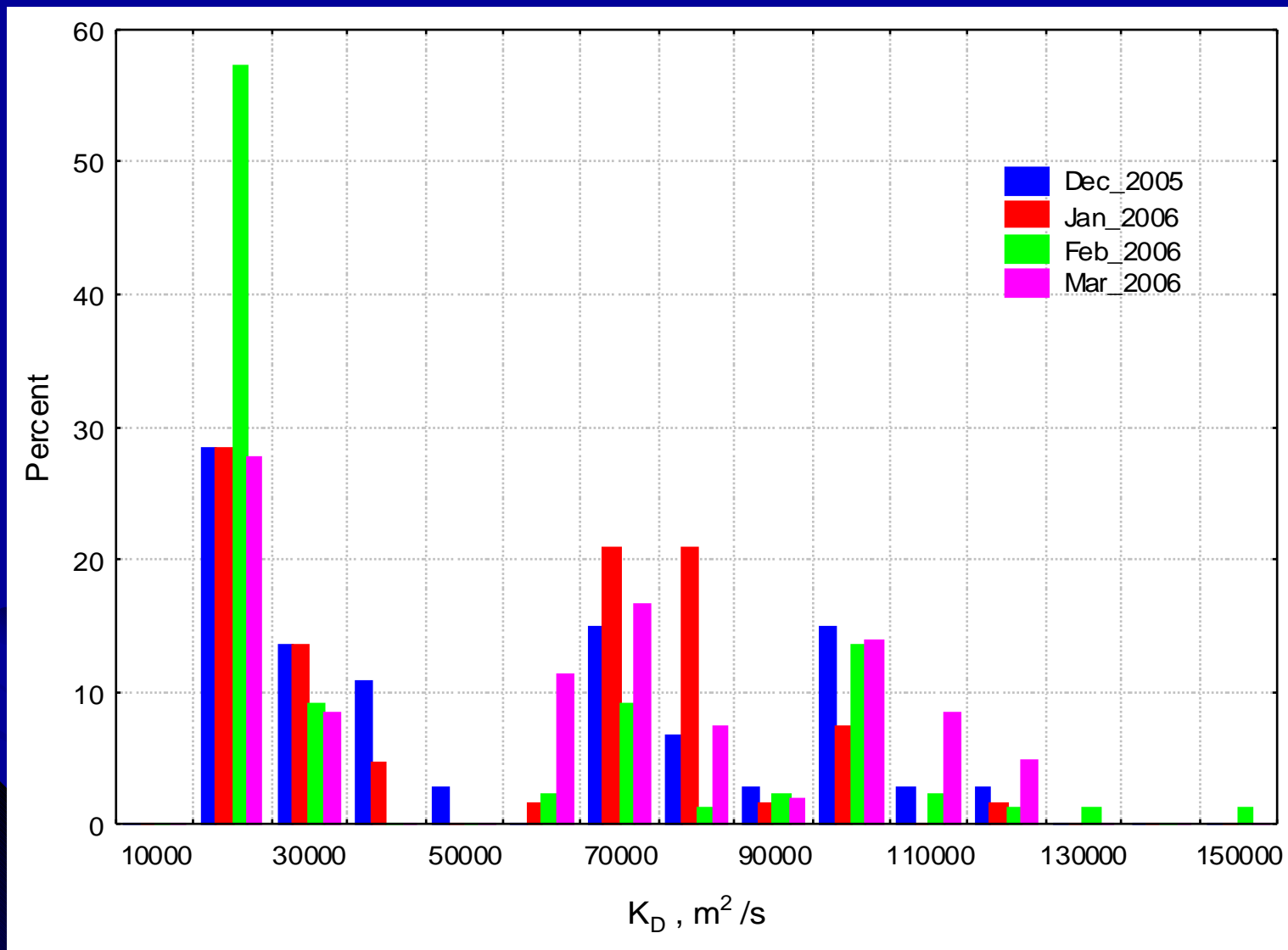
Синие флажки – результаты
расчета

Черные флажки – данные
объективного анализа на
уровне 100 гПа.

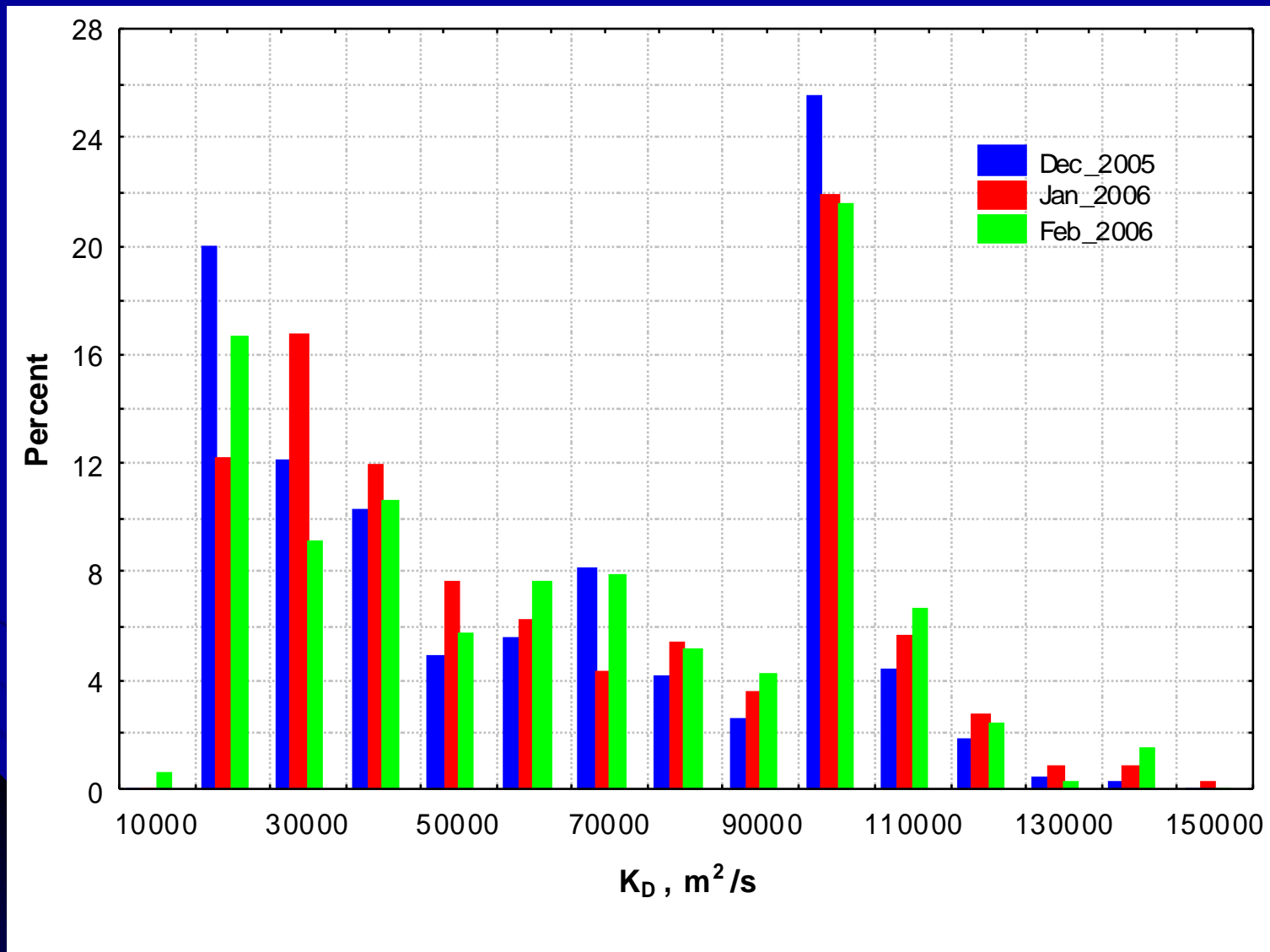
Статистические характеристики сравнения результатов расчетов с данными объективного анализа

Дата	Канал	Кол-во векторов	Уровень гПа	Модуль V , м/с		Азимут V , град	
				Ср. квад. Отклон.	Ср. ариф. Отклон.	Ср. квад. Отклон.	Ср. ариф. Отклон.
10.02. 2006	6.2	434	400	9.7	1.5	7.9	10.6
	6.2	514	300	11.6	-2.5	8.5	11.1
	7.3	439	500	10.3	3.3	8.5	11.7
10.03. 2006	6.2	565	400	7.9	2.3	8.3	10.4
	6.2	600	300	8.7	-2.8	9.0	10.5
	7.3	514	500	9.0	3.3	8.5	11.4

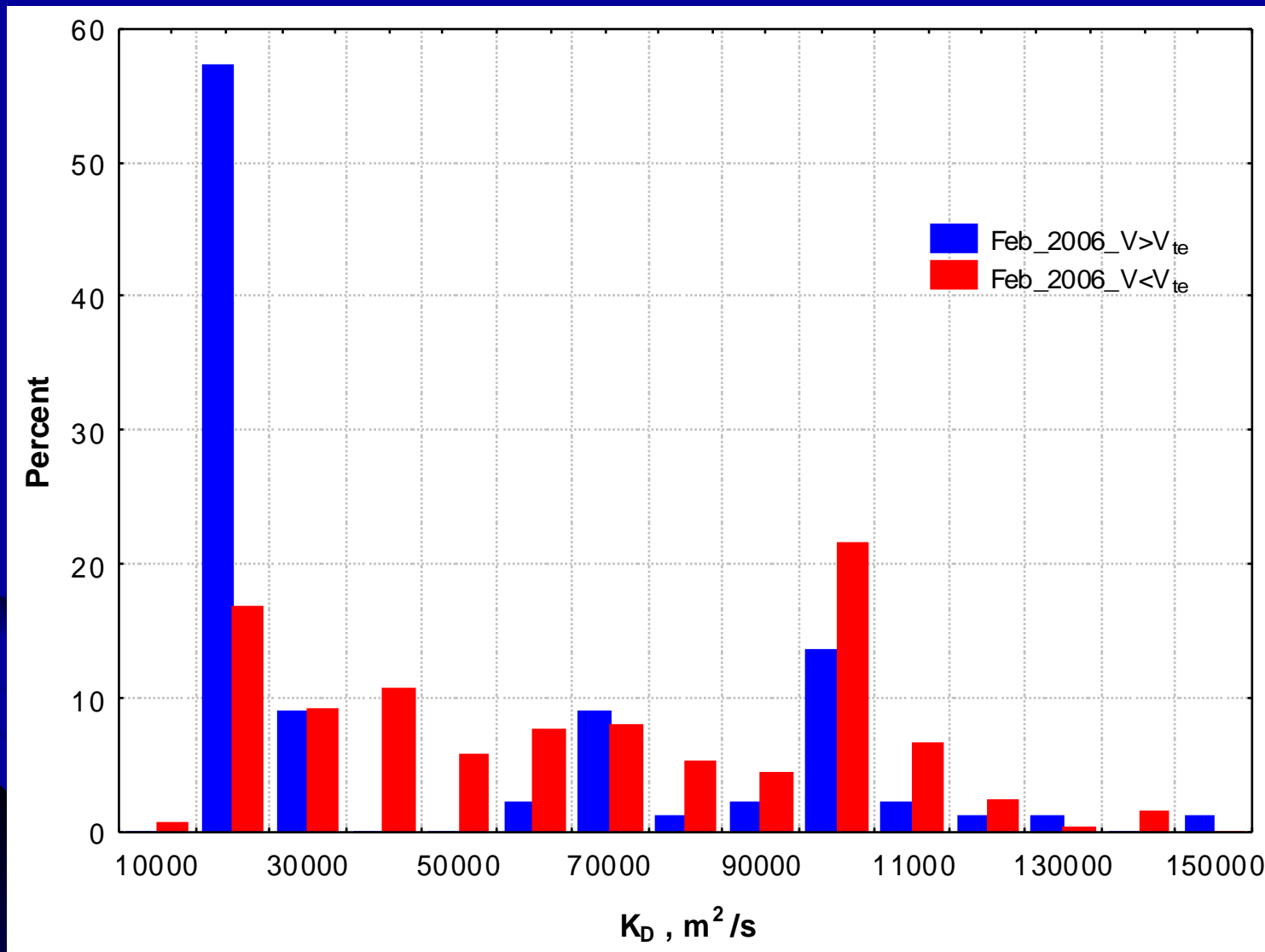
K_D в области с преимущественно ламинарным течением воздушных масс



K_D в областях с $V_{te} > |V|$

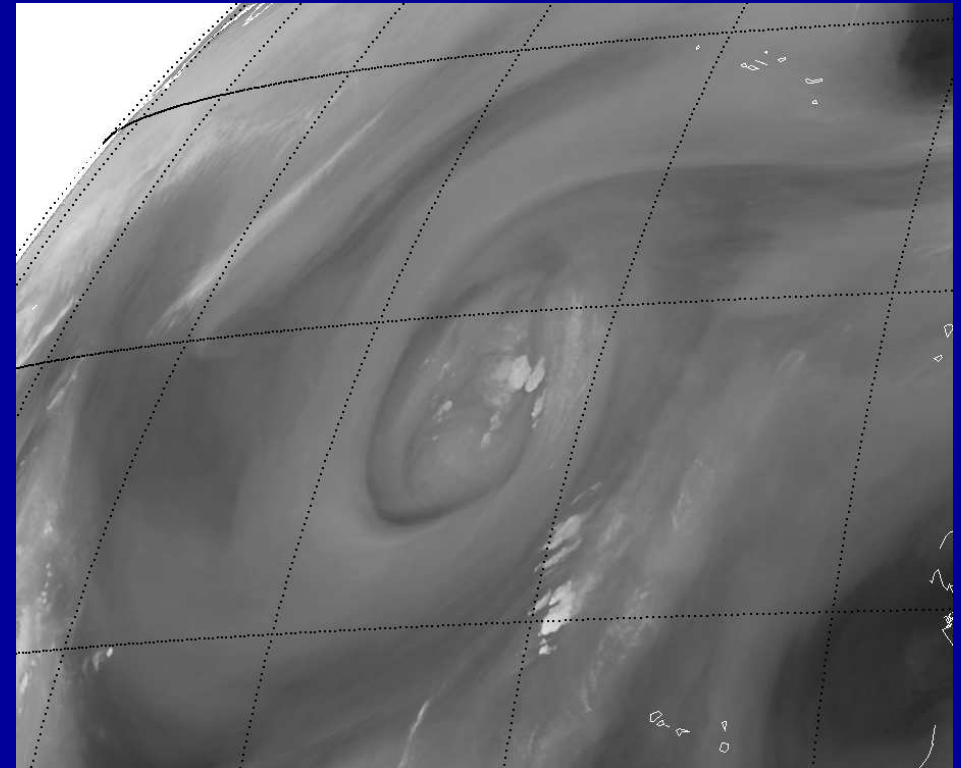
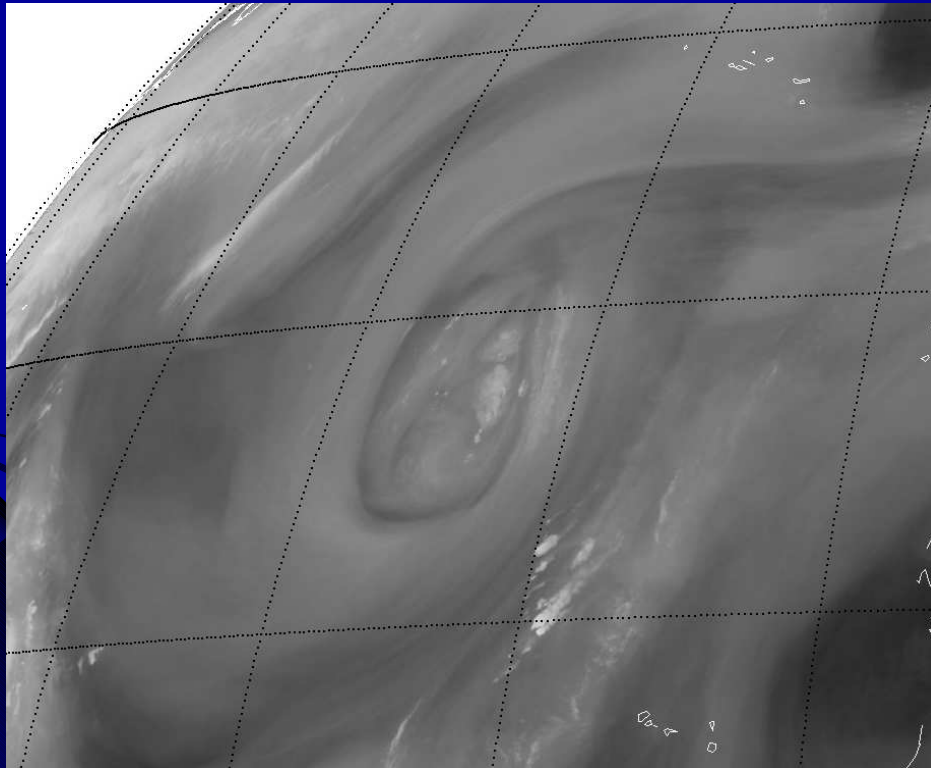


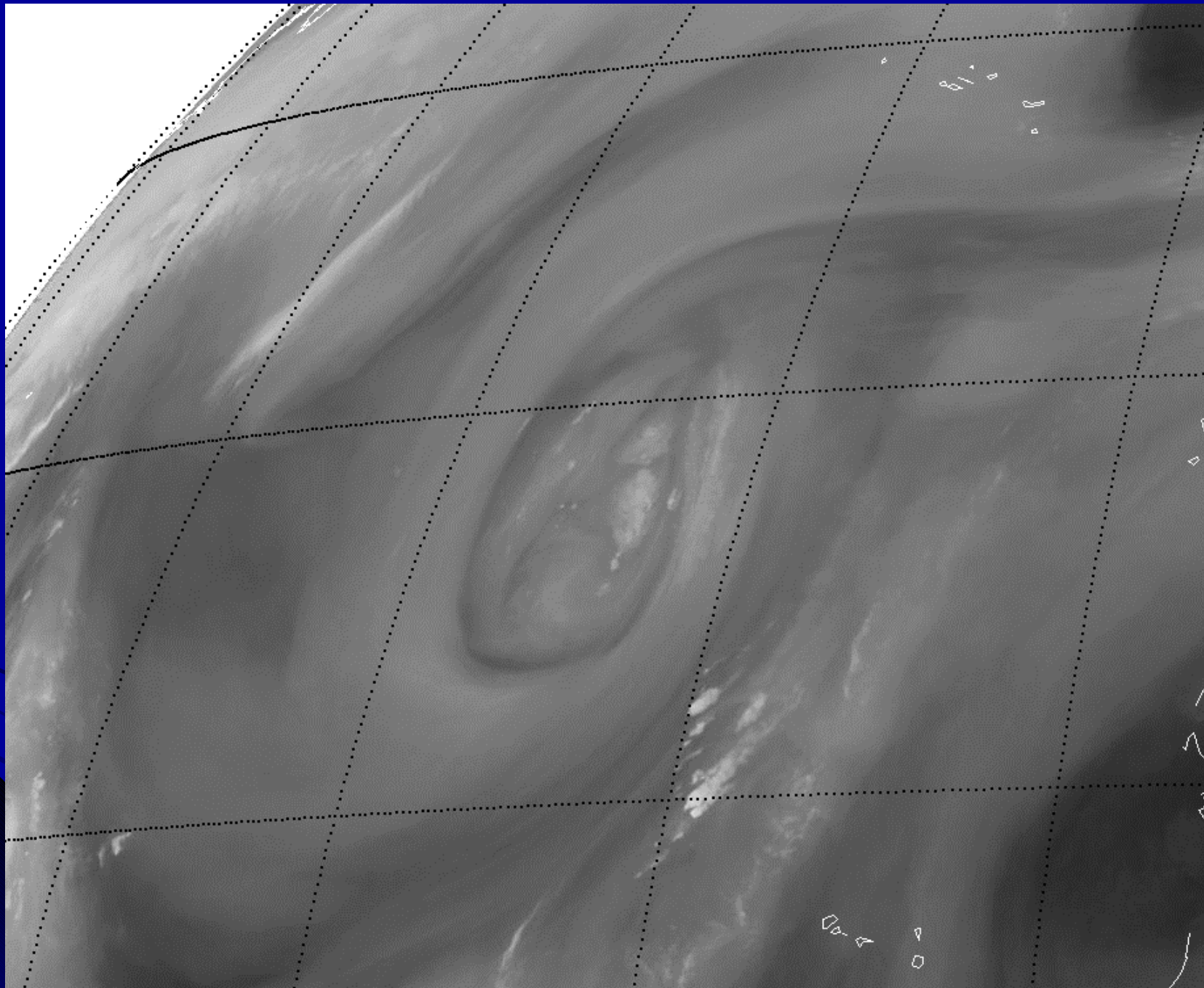
Сравнение K_D для областей с преимущественно ламинарным ($|V| > V_{te}$) и турбулентным ($|V| < V_{te}$) течением воздушных масс

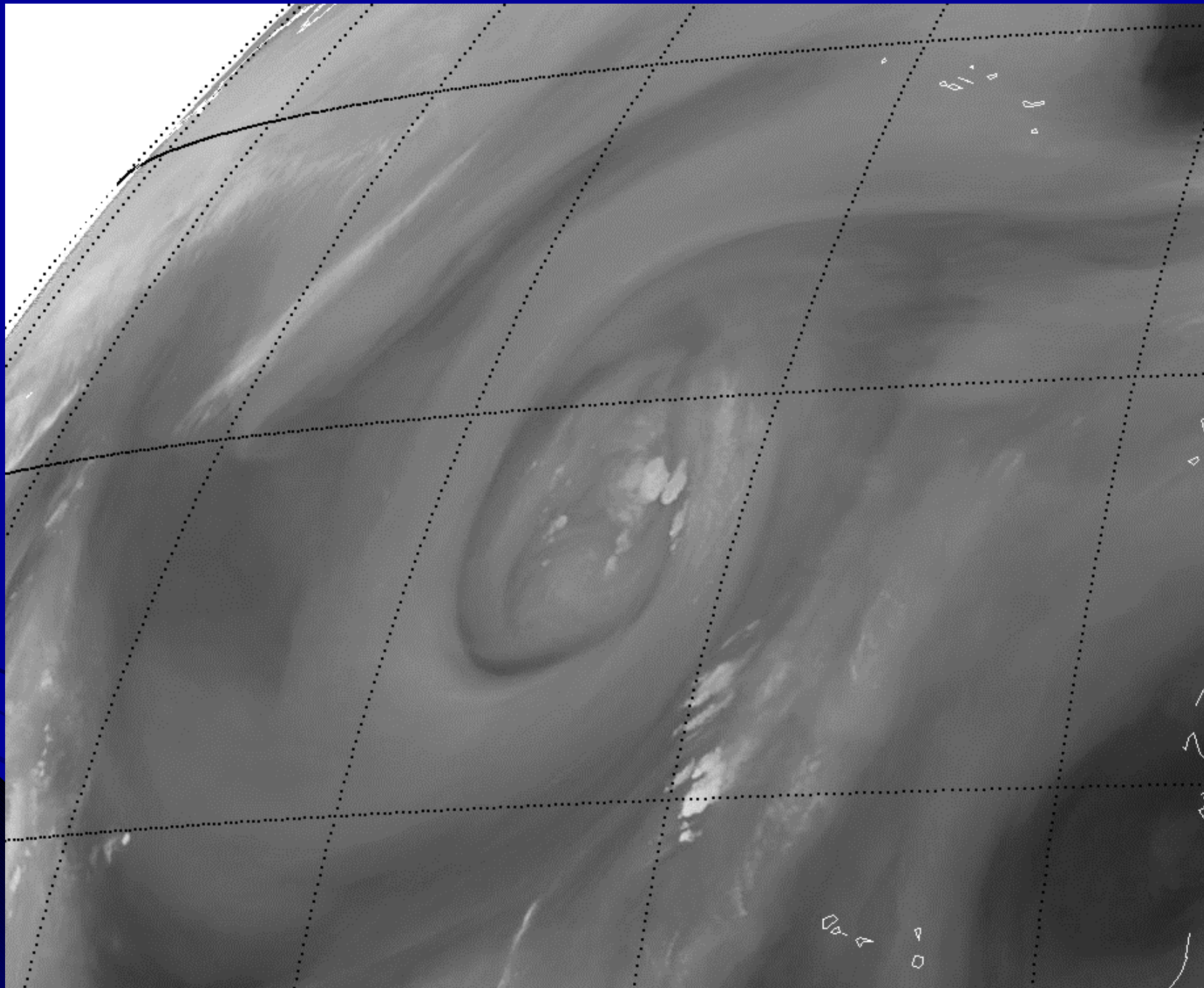


Завихренность ($\text{rot } \mathbf{V}$)

$H = 1000 \times 1000$; $\Delta t = 1 \text{ час}$; $\text{rot } \mathbf{V} = - 1.45 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$





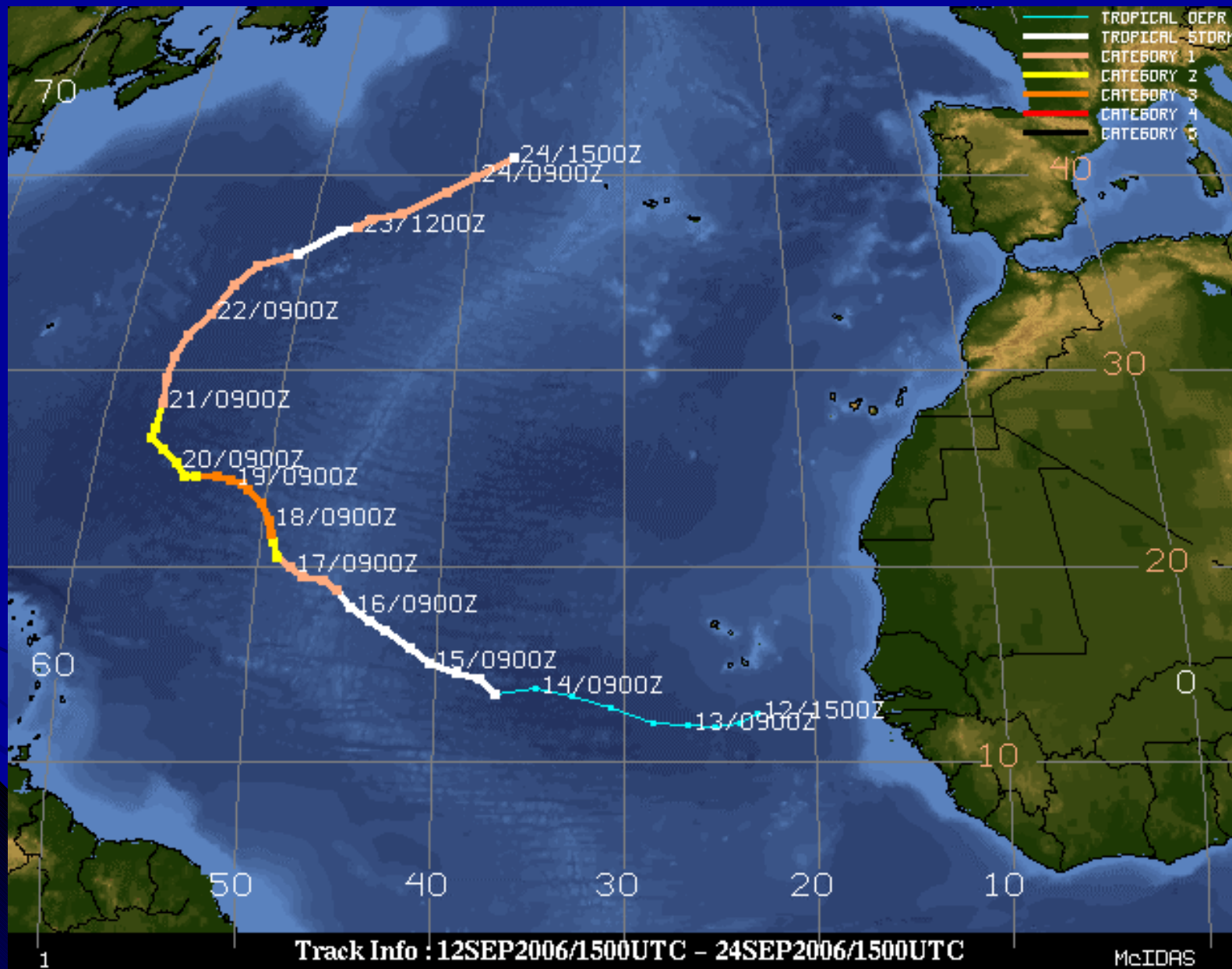


07.02.2007

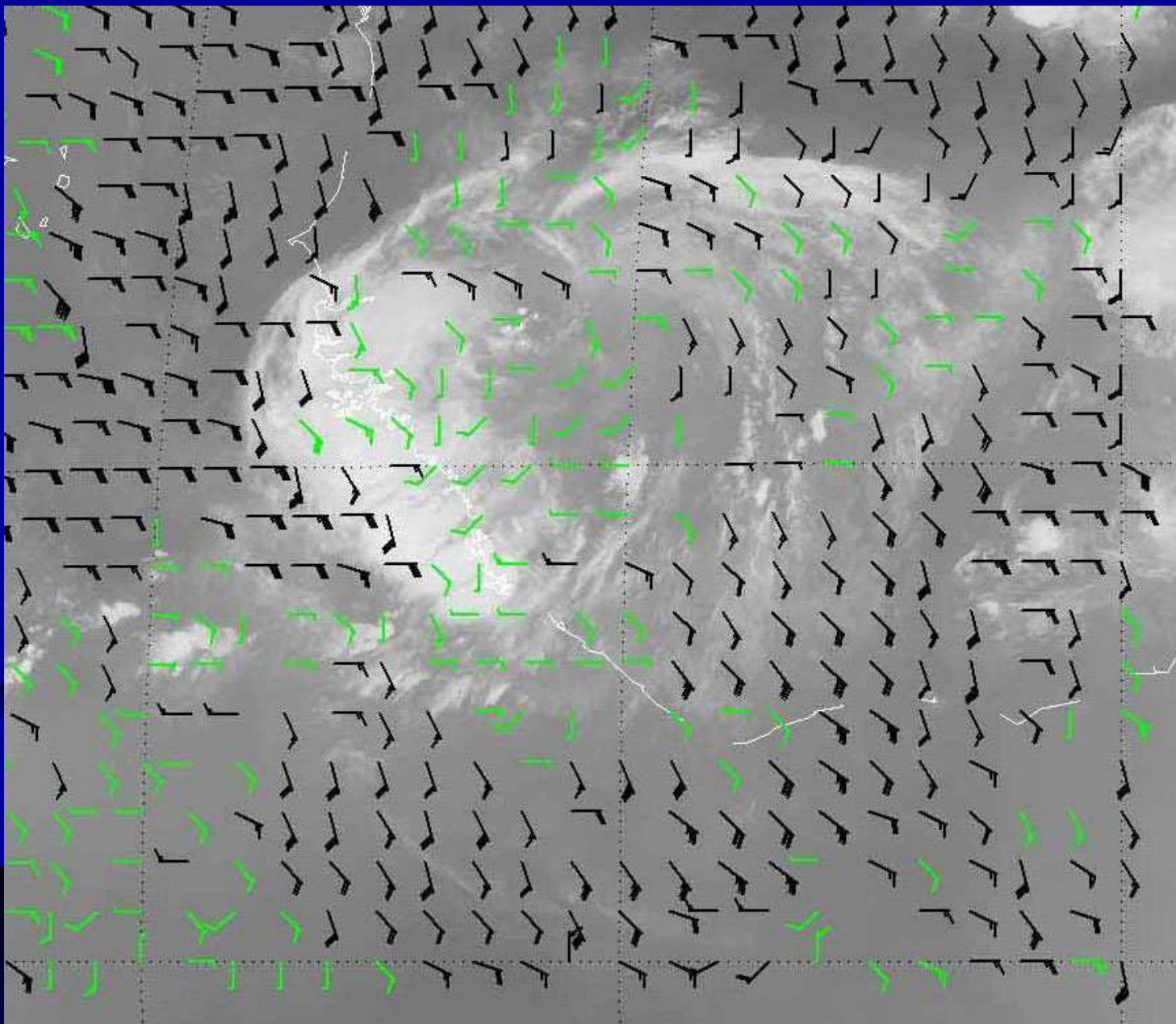
Москва, ИКИ РАН, 13-17 ноября 2006 г.

24

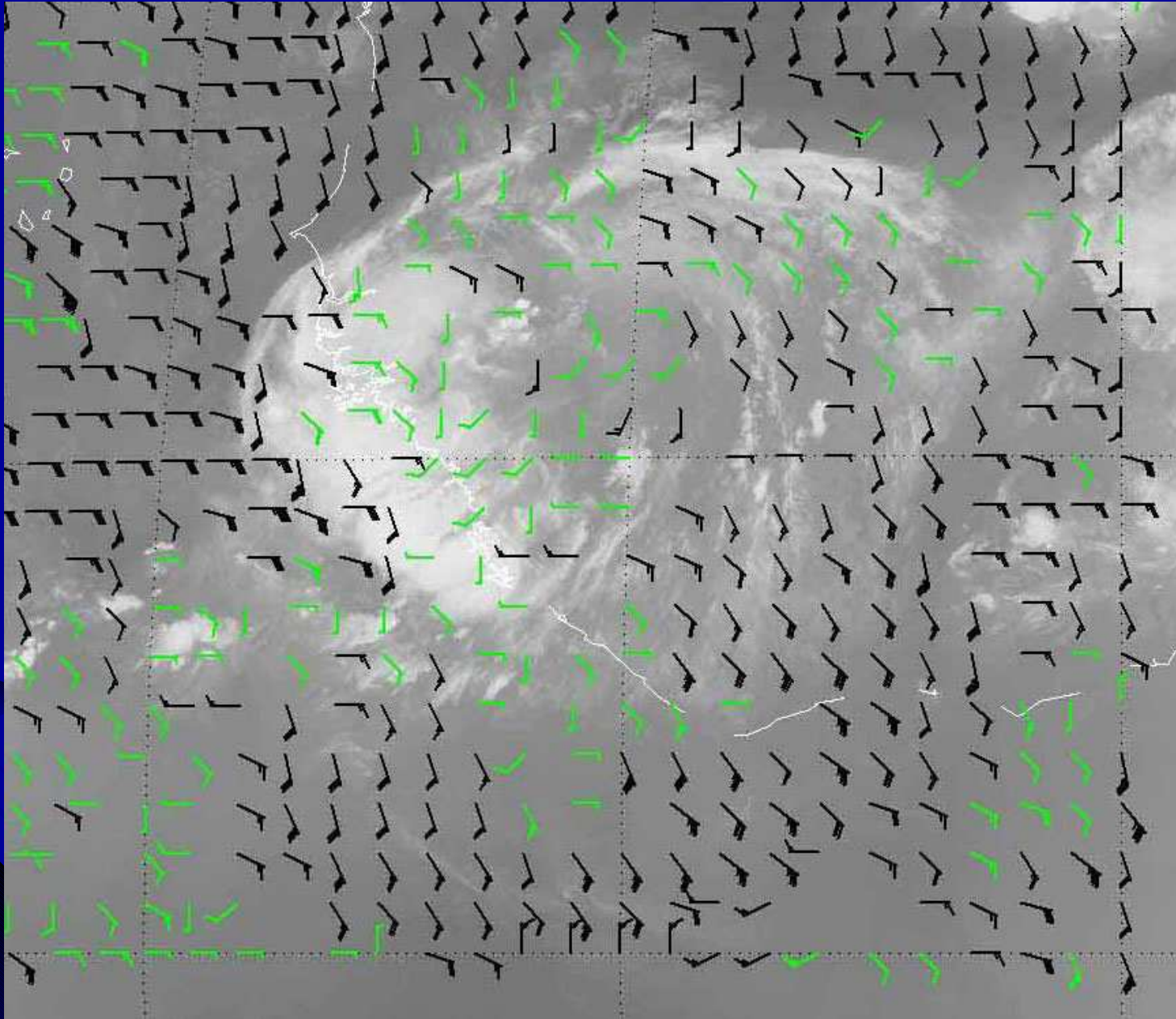
ТЦ HELENE (12-24). 09. 2006



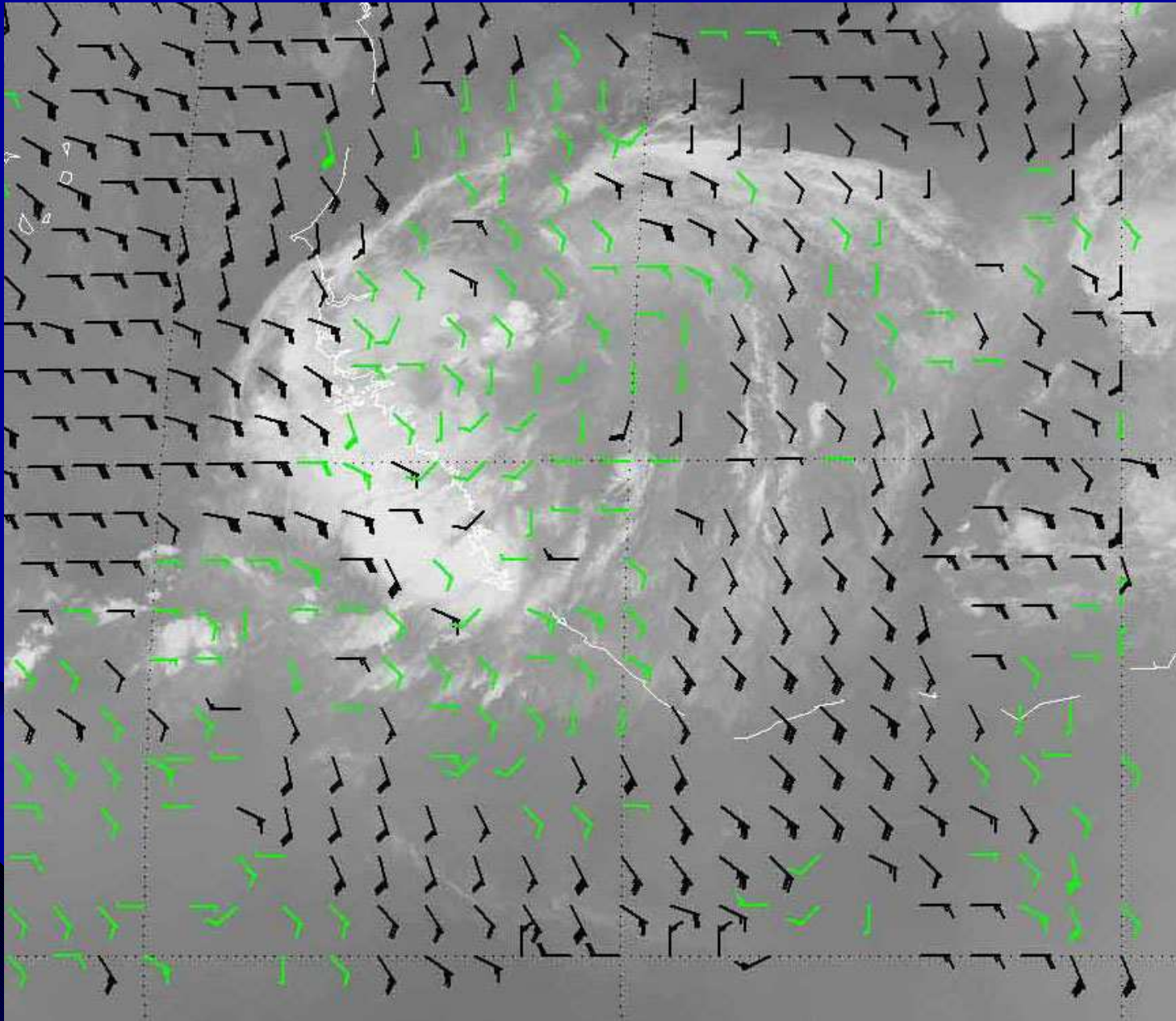
Ветер в узлах сетки $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ (11.09. 00:00-00.15)



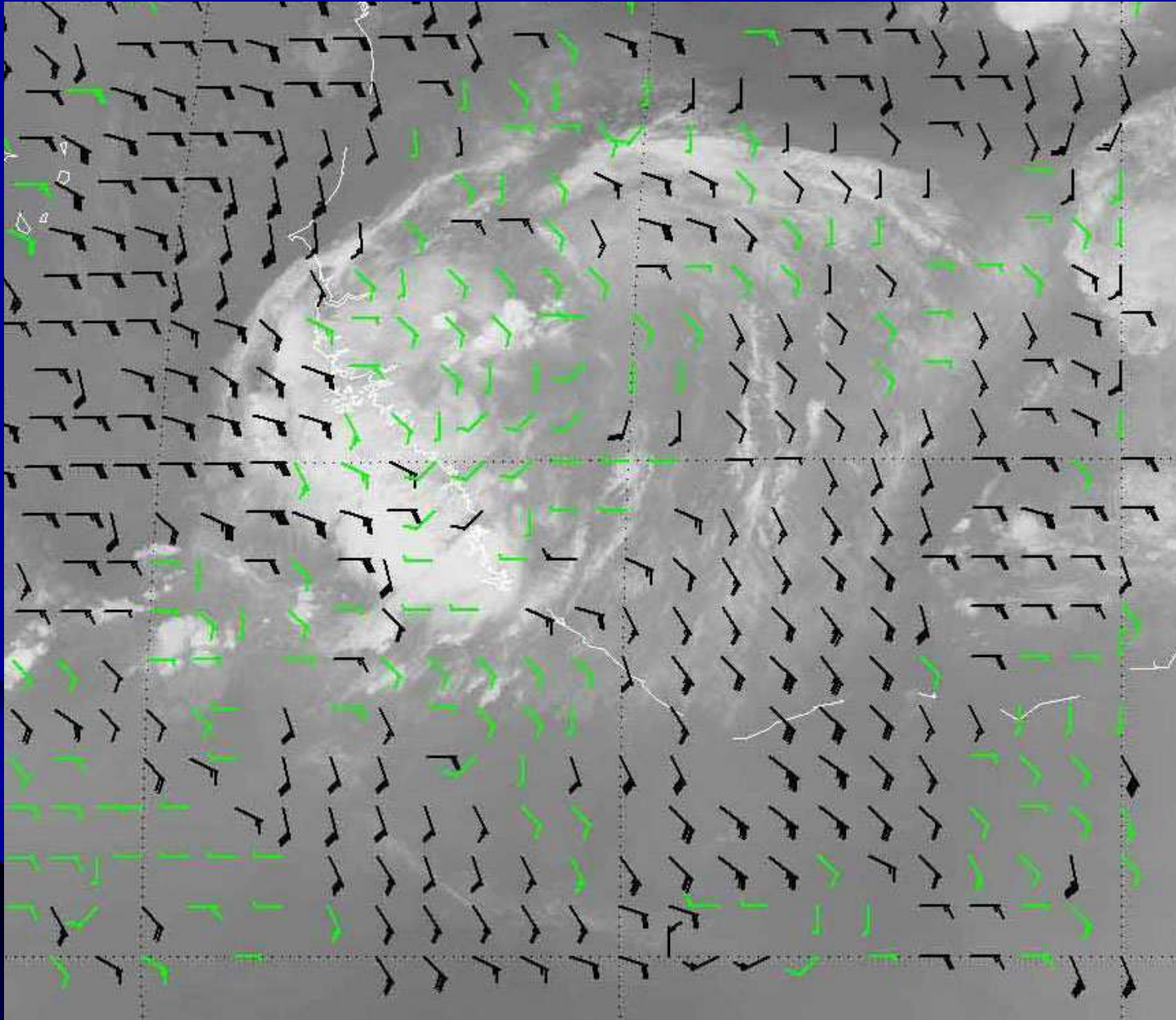
Ветер в узлах сетки $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ (11.09. 00:15-00.30)



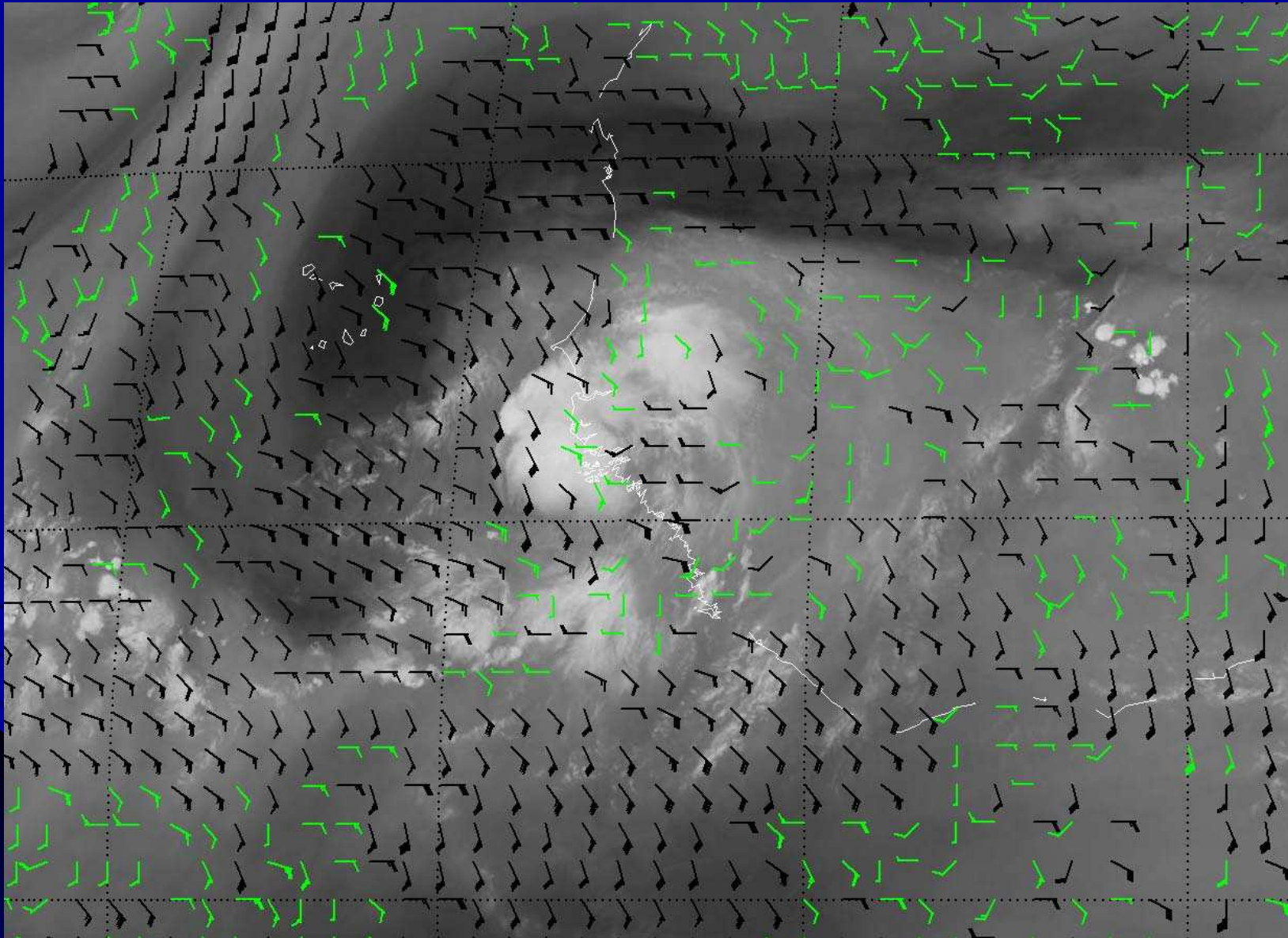
Ветер в узлах сетки $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ (11.09. 00:30-00.45)



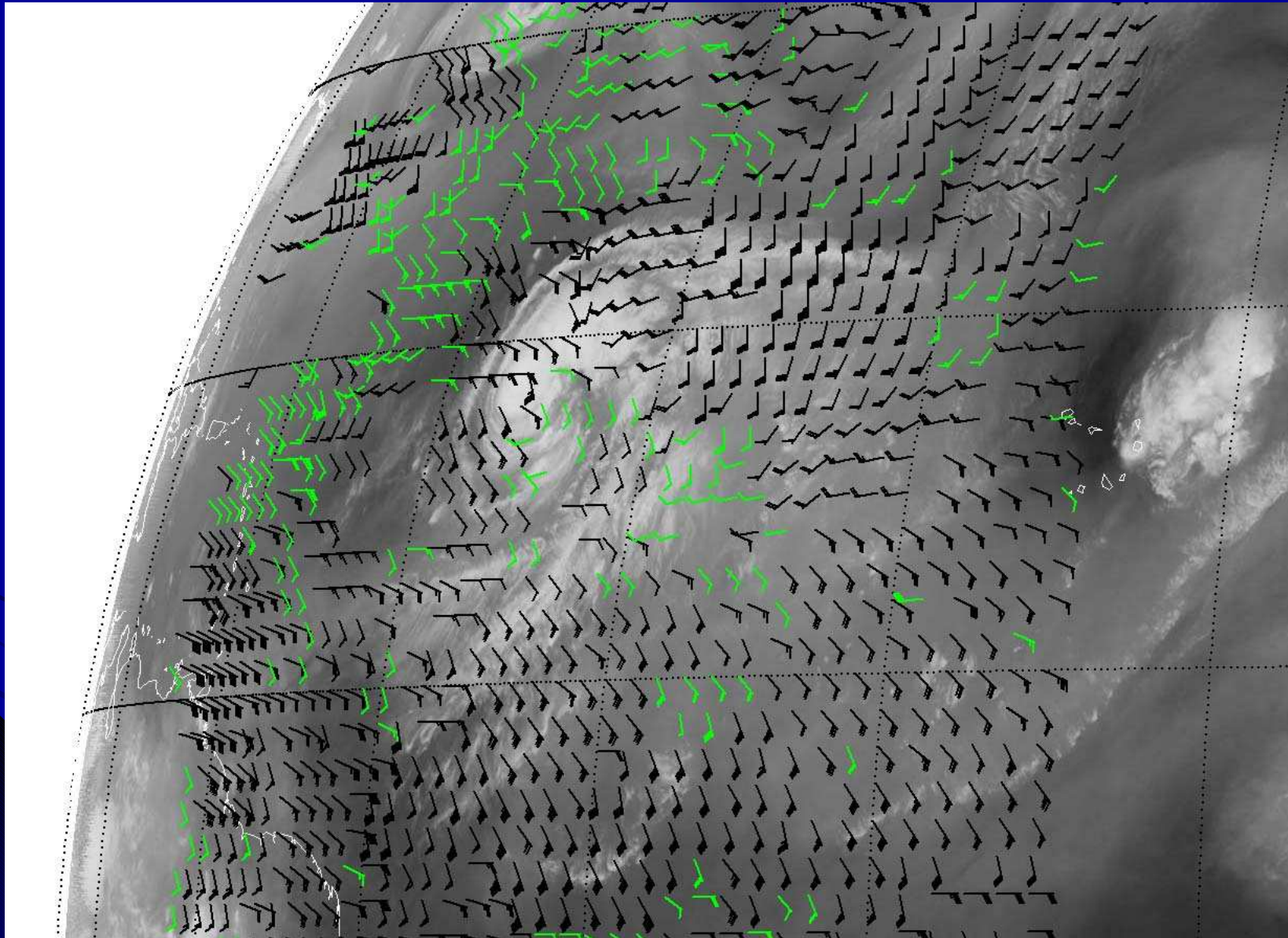
Ветер в узлах сетки $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ (11.09. 00:45-01.00)



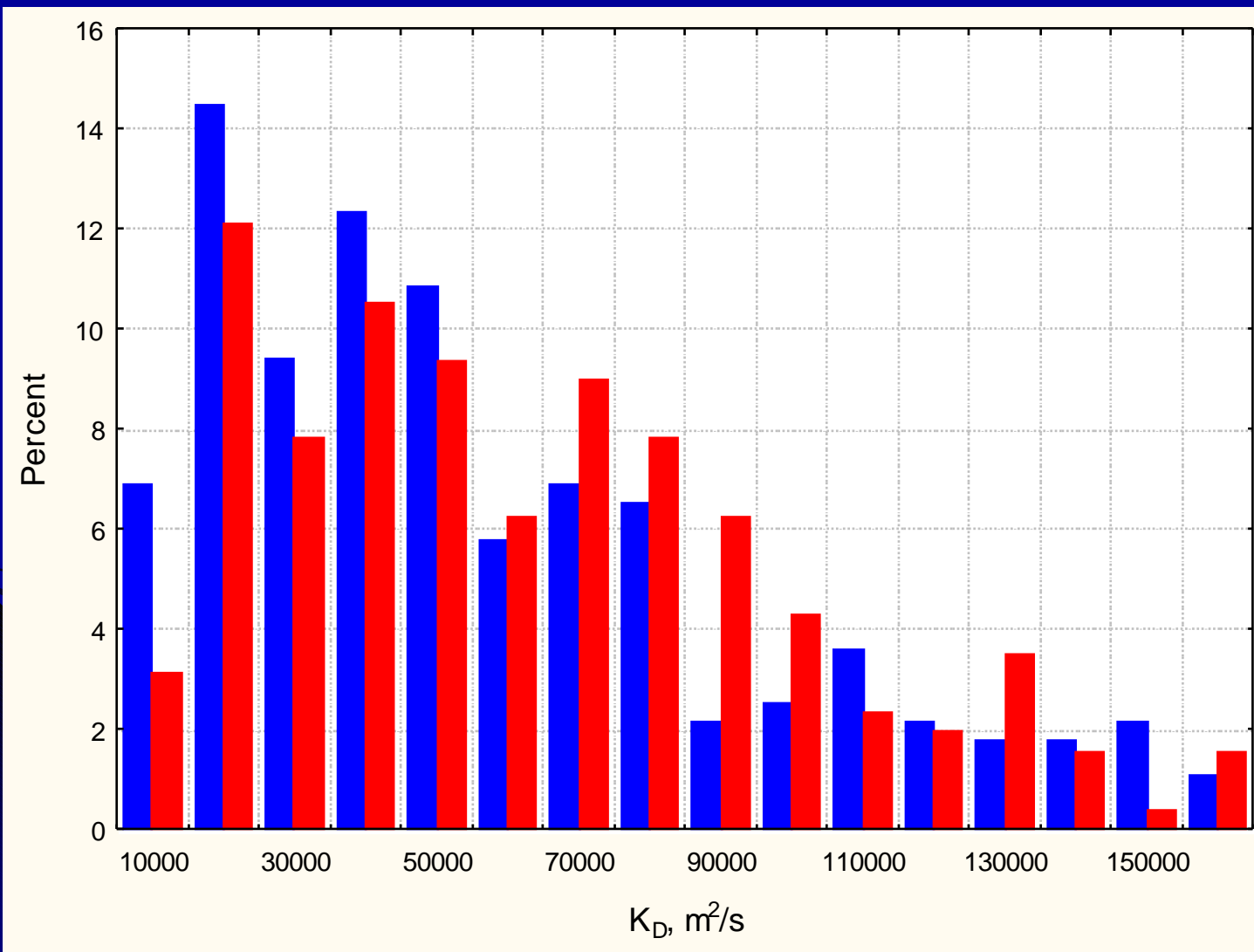
Ветер в узлах сетки $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ (11.09. 12:00-12.15)



Ветер в узлах сетки $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ (16.09. 12:00-12.15)



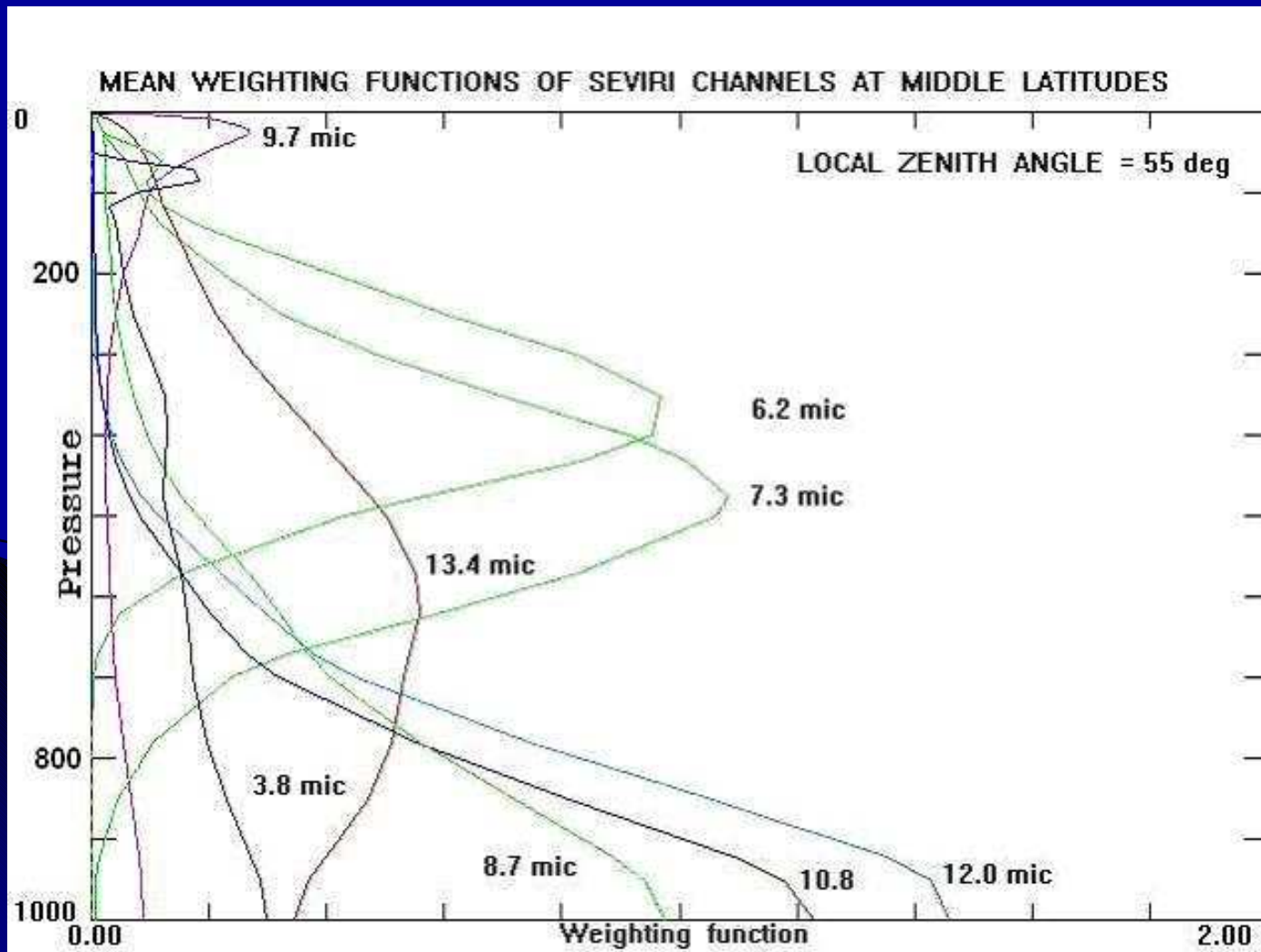
K_D на разных стадиях развития ТЦ



Синий – 11.09 –
облачное
скопление.

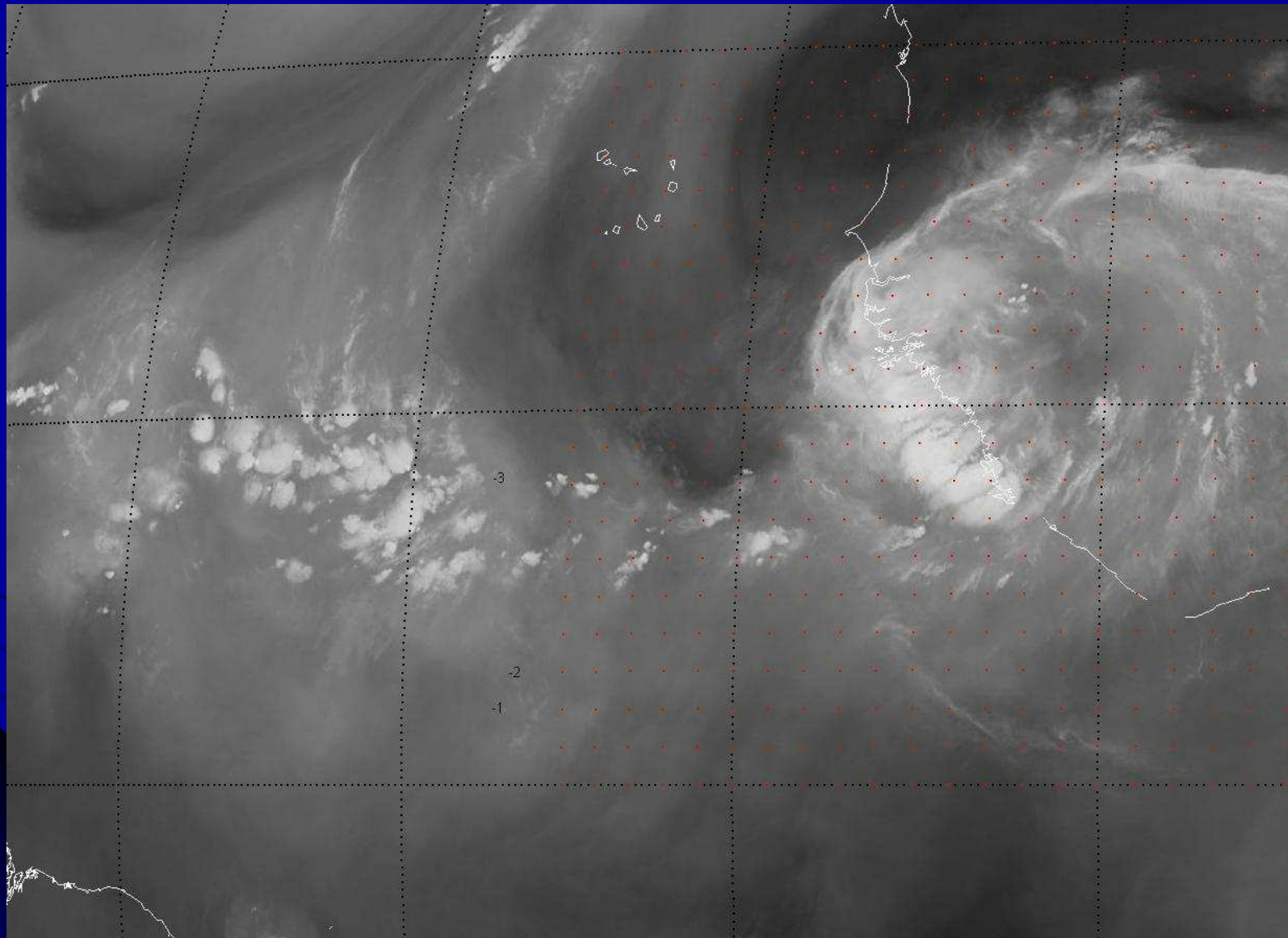
Красный – 17.09 –
ураган (H1)

Возможность определения вертикальной скорости



- Высоты максимумов весовых функций каналов водяного пара для средних широт:
- 6.2 мкм: ~350 гПа (~ 9 км),
- 7.3 мкм: ~500 гПа (~ 6 км)

11.09.2006. $\Delta t = 15$ мин.
 $w_1 \cong 0.3$ м/с; $w_2 \cong 0.6$ м/с; $w_3 \cong 1$ м/с



Заключение и перспективы

- Изложенный подход позволяет одновременно определять не только вектор горизонтальной скорости ветра, но также другие важные динамические характеристики атмосферы: **завихренность и коэффициент турбулентной диффузии.**
- Дальнейшее развитие метода может позволить по данным зондирования атмосферы на нескольких длинах волн определять **вертикальную компоненту скорости ветра и коэффициент вертикальной турбулентной диффузии.** Однако это потребует решения уже не двумерной, а **трехмерной обратной задачи статистического анализа случайного поля.**
- Разработанный метод в перспективе может быть применен для выявления по данным дистанционного зондирования областей интенсивной турбулентности в **опасных атмосферных явлениях** таких, как циклоны тропических и умеренных широт, фронтальные зоны и др.