

Российский государственный  
гидрометеорологический университет (РГГМУ),  
Санкт-Петербург

Федосеева Н.В., Симакина Т.Е., Делиева М.Ю.

# Анализ условий формирования горных волн, обнаруживаемых на спутниковых снимках

Двадцать вторая международная конференция "СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО  
ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА» 11-15 ноября 2024

# Актуальность



Горные волны (ГВ) являются опасным видом атмосферных движений при эксплуатации воздушных судов. Особенно это относится к условиям недостаточной влажности, когда облачные полосы не формируются, и волны остаются невидимыми как для пилота, так и для радиолокатора. ГВ - один из главных источников турбулентности ясного неба (ТЯН), природа которых до конца не изучена. Более 700 рейсов в год попадают в ситуацию ТЯН. Область турбулентности в 2–3 раза превышает высоту гор.

## Катастрофы, вызванные турбулентностью ясного неба



Катастрофа Boeing 707 на Фудзи

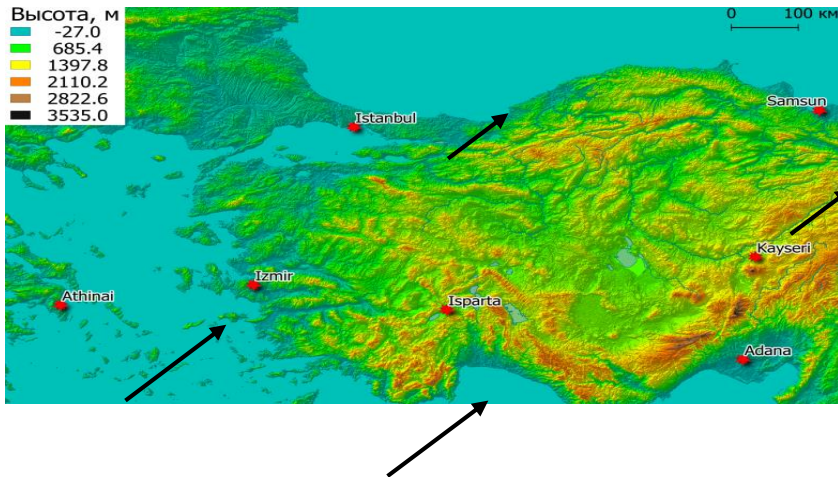


Инцидент Boeing 777 Москва - Бангкок

# Материалы. Районы исследования

7 случаев

Регион: Малоазиатское нагорье

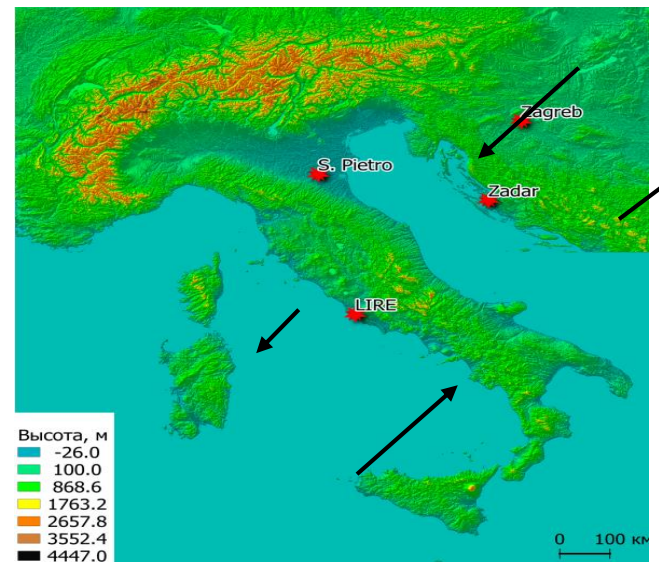


Широтный пояс: 35 – 42 °с.ш.  
Характерные высоты: 1300 – 2000 м  
Максимальная высота: 5137 м (Арарат)

Количество рассмотренных ситуаций:

17 случаев (8 над Динарскими Альпами, 9 над Апенниннами)

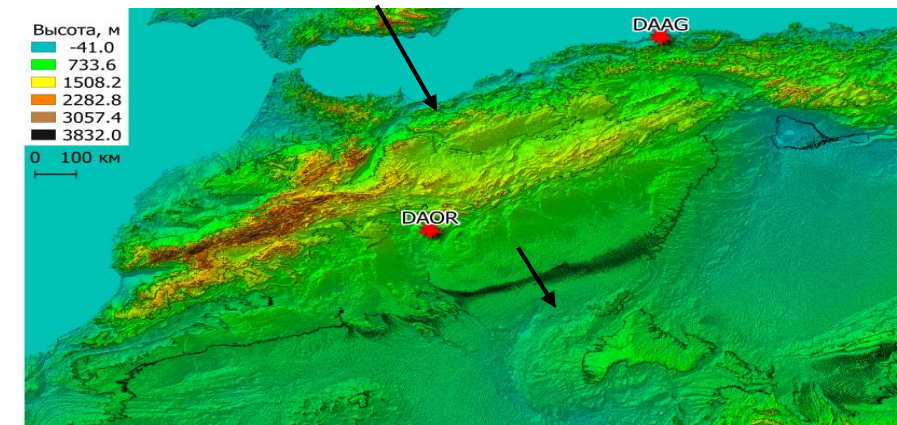
Регион: Адриатика  
(Динарские Альпы и Апеннины)



Широтный пояс: 37 – 47 °с.ш.  
Характерные высоты: 1200 – 1800 м  
Максимальная высота: 2912 м  
(у Апеннин) и 2694 м (у Динарских Альп)

21 случай

Регион: Атласские горы на севере  
Африки

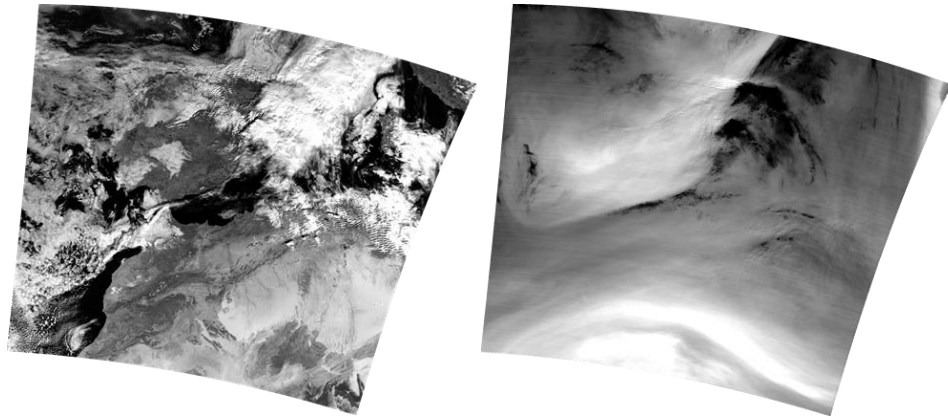


Широтный пояс: 30 – 40 °с.ш.  
Характерные высоты: 1200 – 1500 м  
Максимальная высота: 4165 м (Тубкаль)

# «Невидимые» горные волны

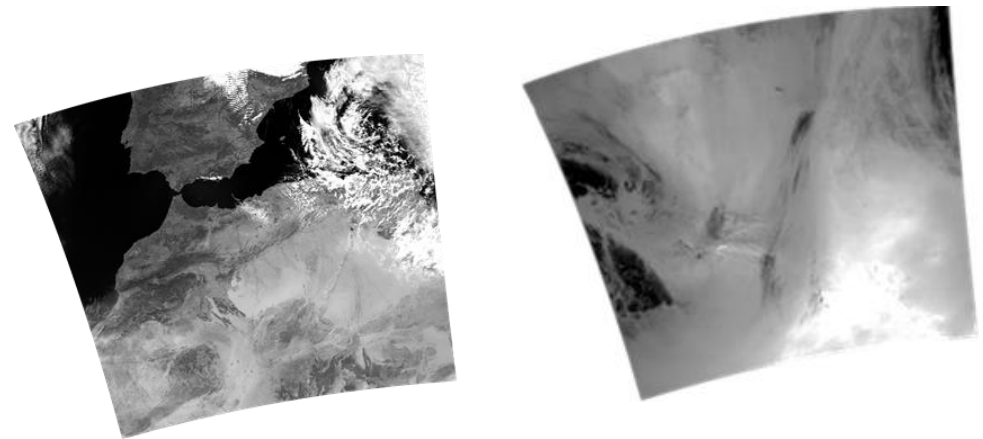
НЕВИДИМЫЕ ЗАХВАЧЕННЫЕ ГОРНЫЕ ВОЛНЫ – 25.01.2004

$SR=2,8 \cdot 10^{-6}$      $\lambda_z=3,7$  КМ     $RI=0,16$



НЕВИДИМЫЕ ВЕРТИКАЛЬНЫЕ ГОРНЫЕ ВОЛНЫ – 10.04.2005

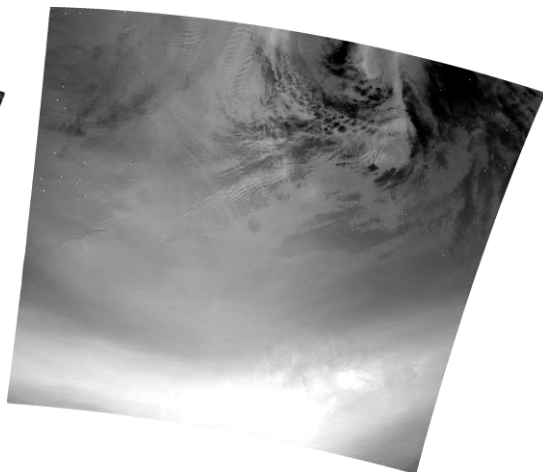
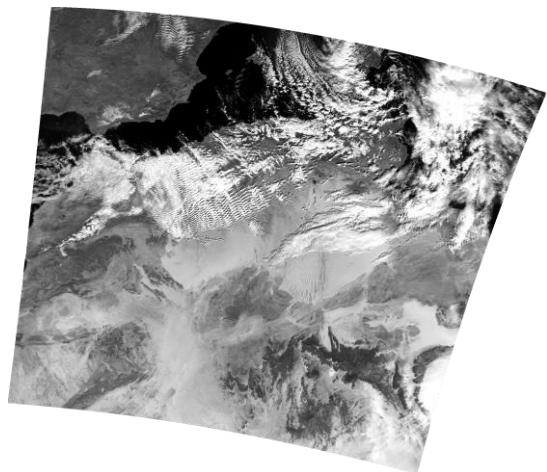
$SR=1,3 \cdot 10^{-8}$      $\lambda_z=54,5$  КМ     $RI=0,42$



# «Видимые» горные волны

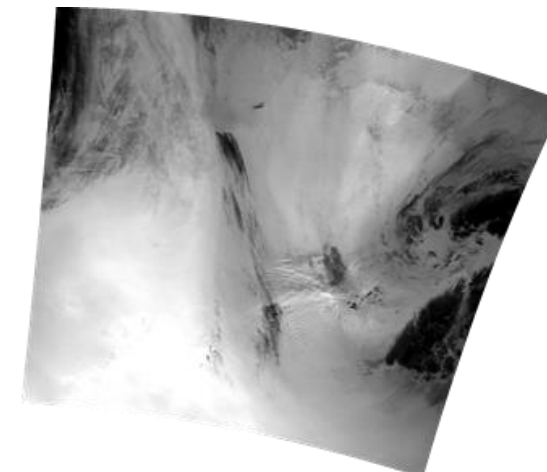
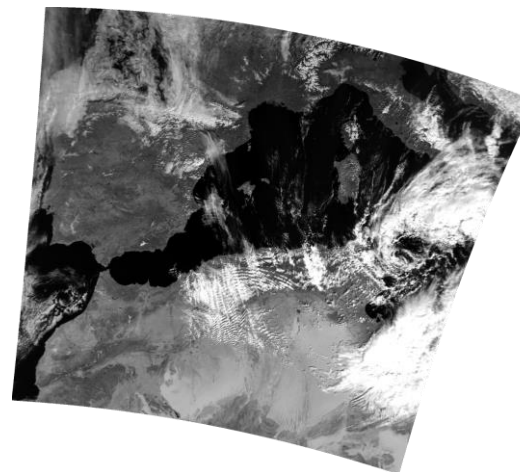
ВИДИМЫЕ ВЕРТИКАЛЬНЫЕ ГОРНЫЕ ВОЛНЫ – 29.12.2004

SR=  $2,0 \cdot 10^{-8}$      $\lambda_z=45$  KM    RI=0



ВИДИМЫЕ ЗАХВАЧЕННЫЕ ГОРНЫЕ ВОЛНЫ – 23.02.2011

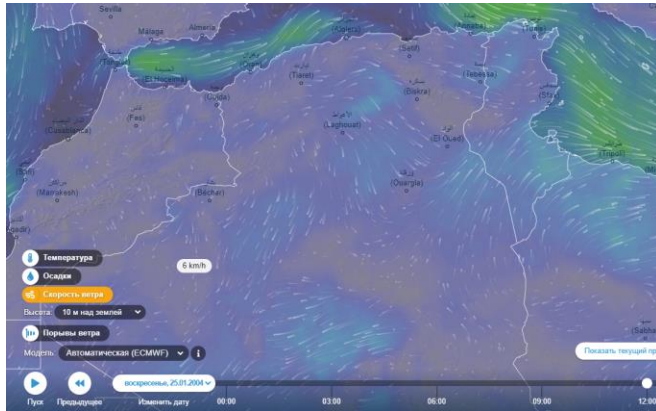
SR= $3,8 \cdot 10^{-7}$      $\lambda_z=10,2$  KM    RI=0, 69



# Поля приземного ветра

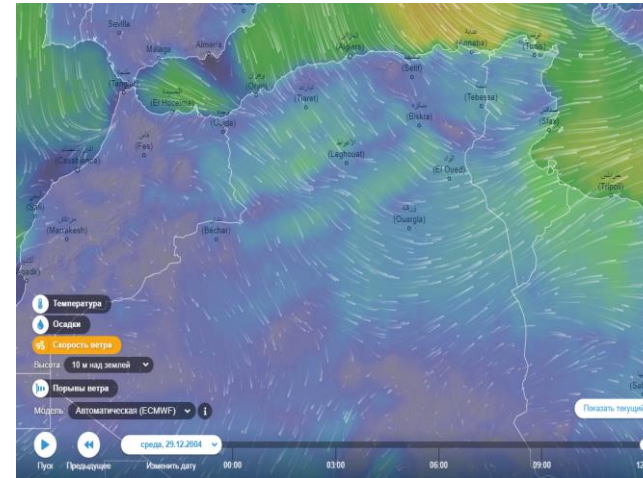
НЕВИДИМЫЕ

25.01.2004



ВИДИМЫЕ

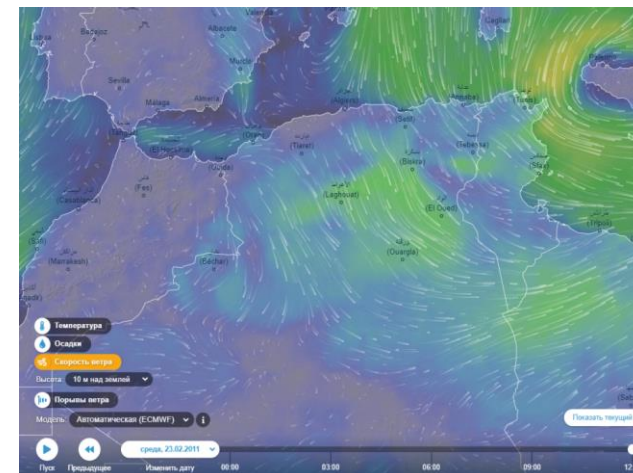
29.12.2004



10.04.2005



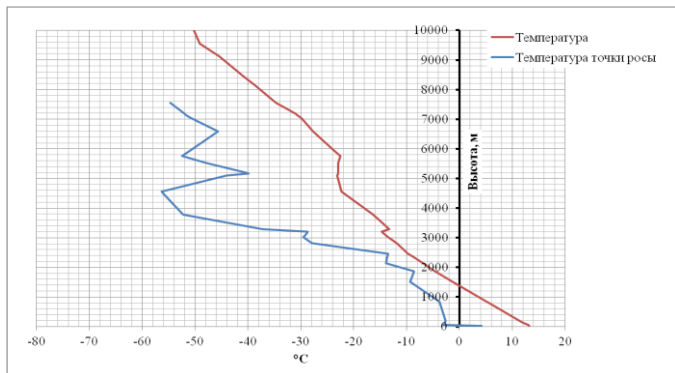
23.02.2011



# Профили температуры и температуры точки росы

ВИДИМЫЕ

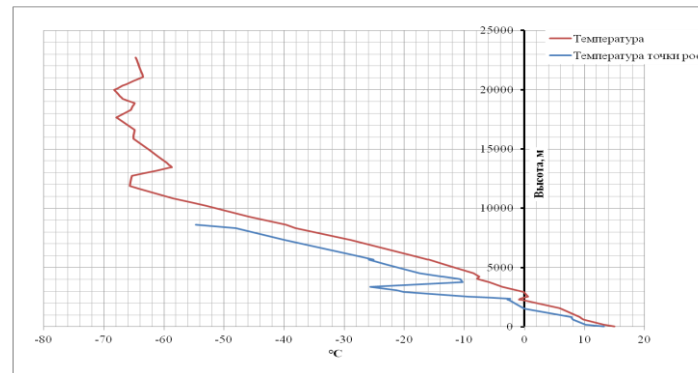
29.12.2004



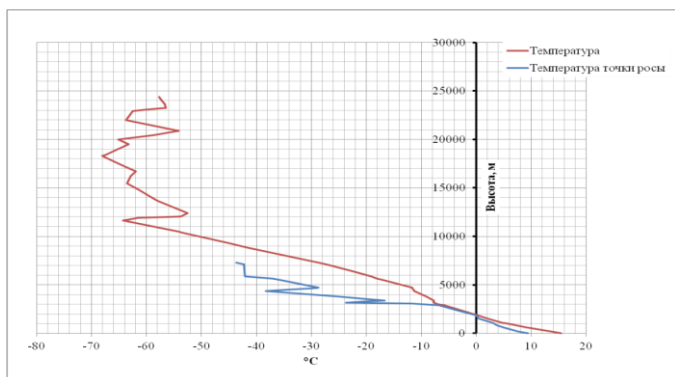
НЕВИДИМЫЕ

25.01.2004

Захваченные



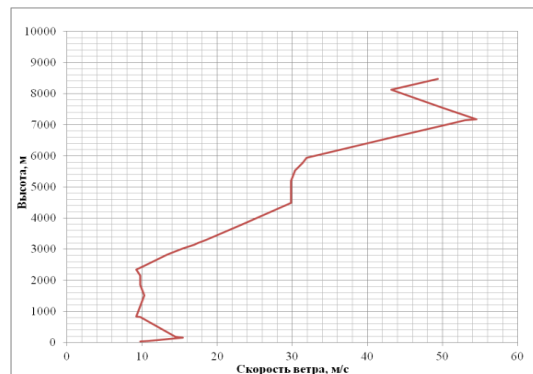
23.02.2011



# Профили скорости ветра

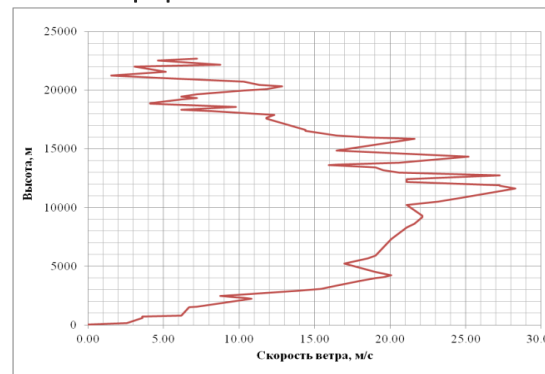
ВИДИМЫЕ

29.12.2004

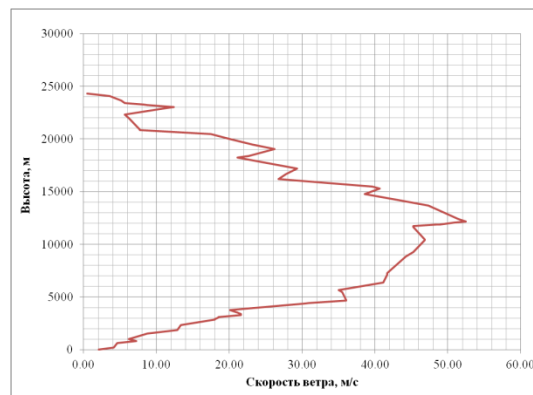


НЕВИДИМЫЕ

25.01.2004 Захваченные



23.02.2011

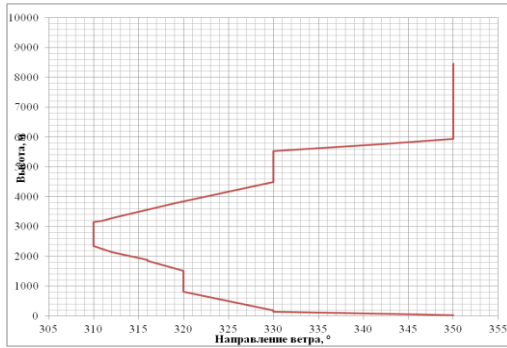




# Профили направления ветра

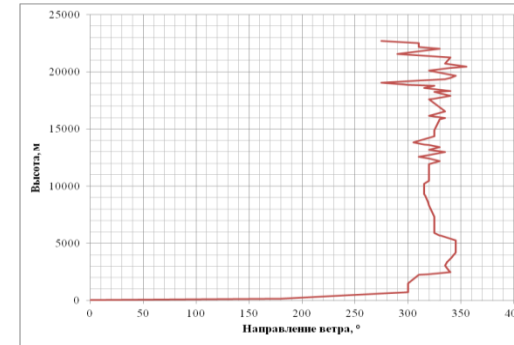
ВИДИМЫЕ

29.12.2004

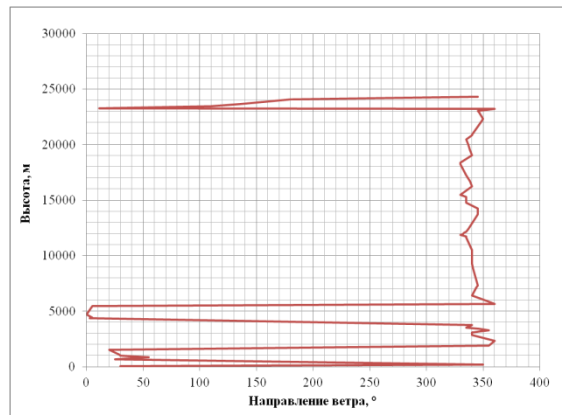


НЕВИДИМЫЕ

25.01.2004



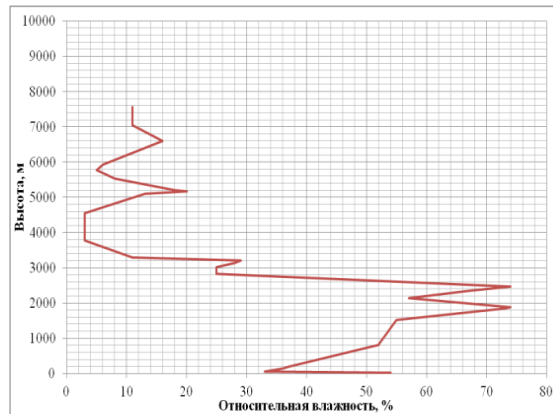
23.02.2011



# Профили относительной влажности

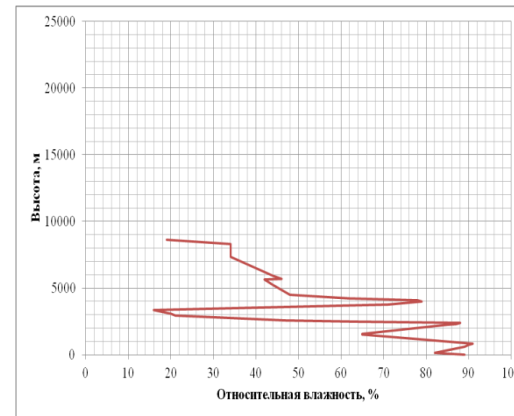
ВИДИМЫЕ

29.12.2004

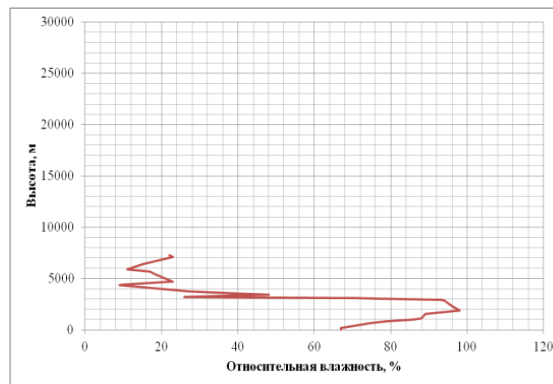


НЕВИДИМЫЕ

25.01.2004 Захваченные

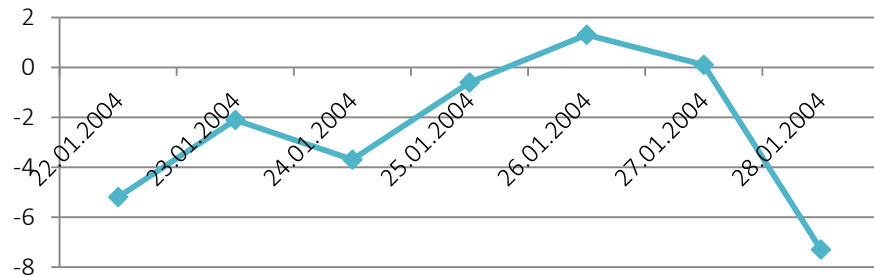


23.02.2011

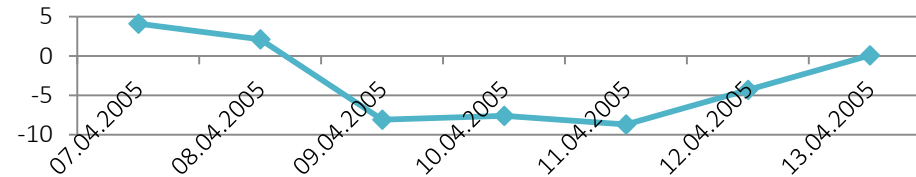


# Временной ход разницы потенциальных температур на наветренном и подветренном склоне Атласских гор

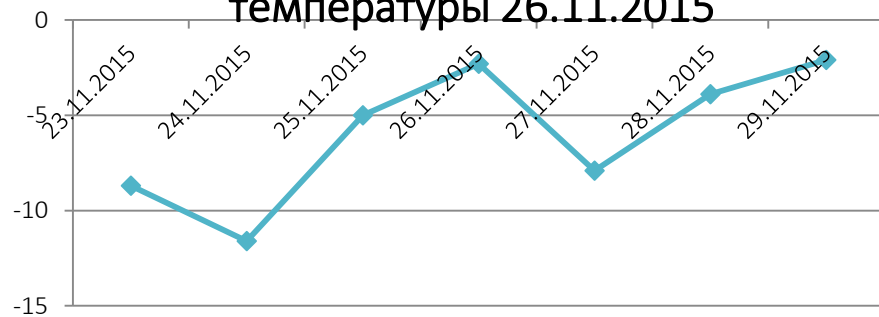
Временной ход потенциальной температуры 25.01.2004



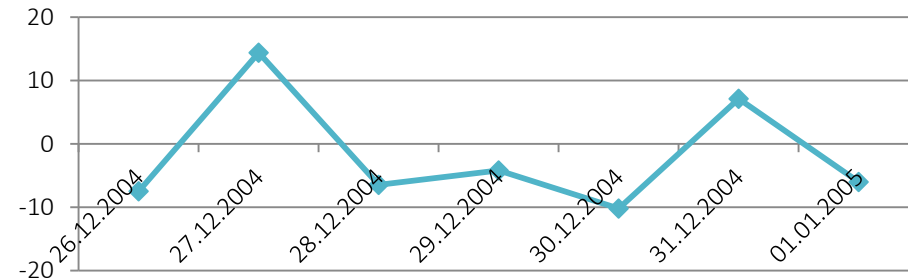
Временной ход разницы потенциальной температуры 10.04.2005



Временной ход потенциальной температуры 26.11.2015



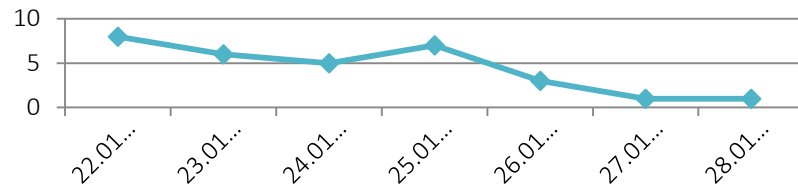
Временной ход потенциальной температуры 29.12.2004



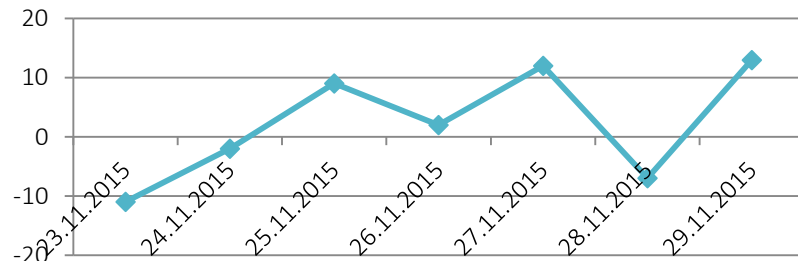
# Временной ход разницы давления на наветренном и подветренном склоне Атласских гор

ВИДИМЫЕ

Временной ход разницы давления 25.01.2004

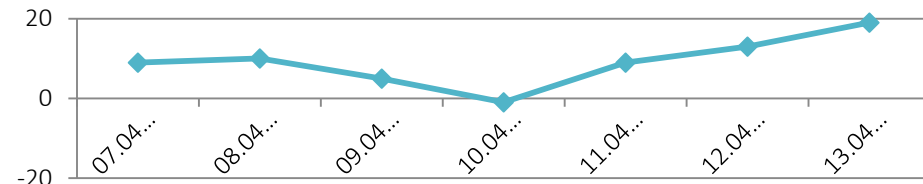


Временной ход разницы давления 26.11.2015

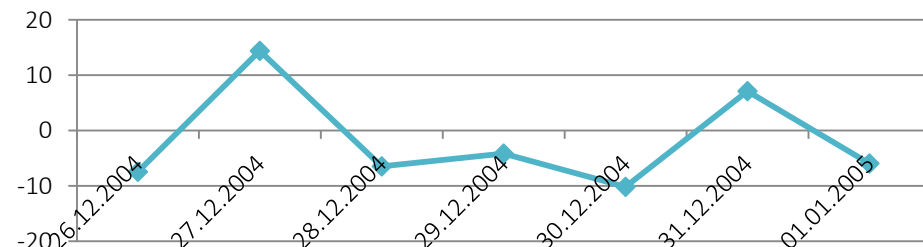


НЕВИДИМЫЕ

Временной ход разницы давления 10.04.2005



Временной ход разницы давления 29.12.2004



# Гистограммы распределения значений индексов

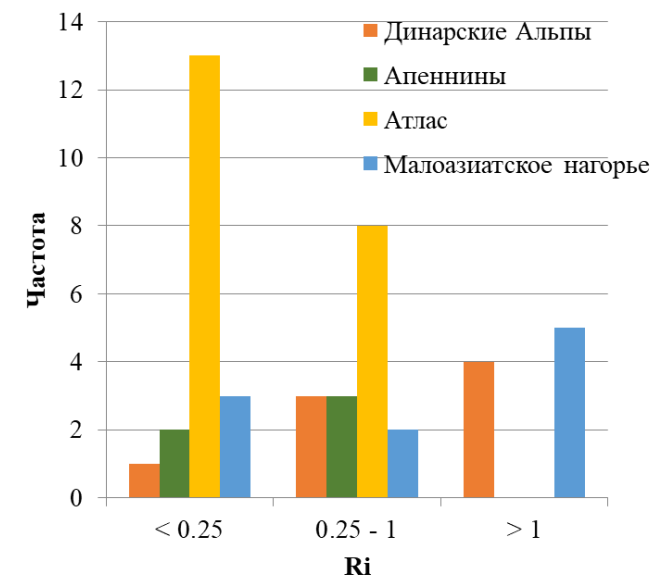
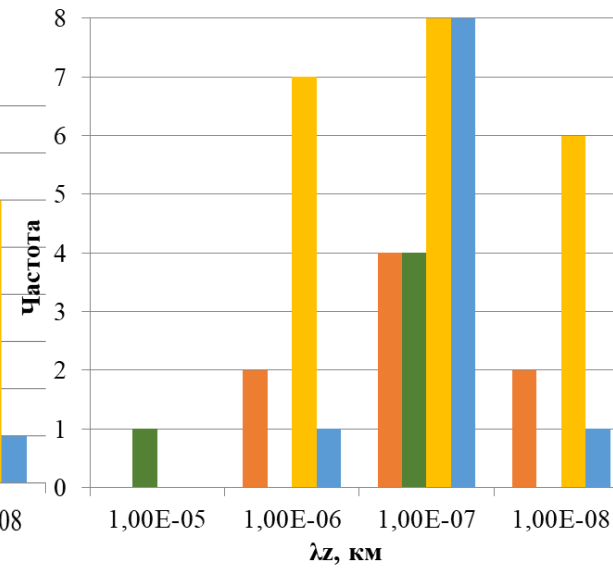
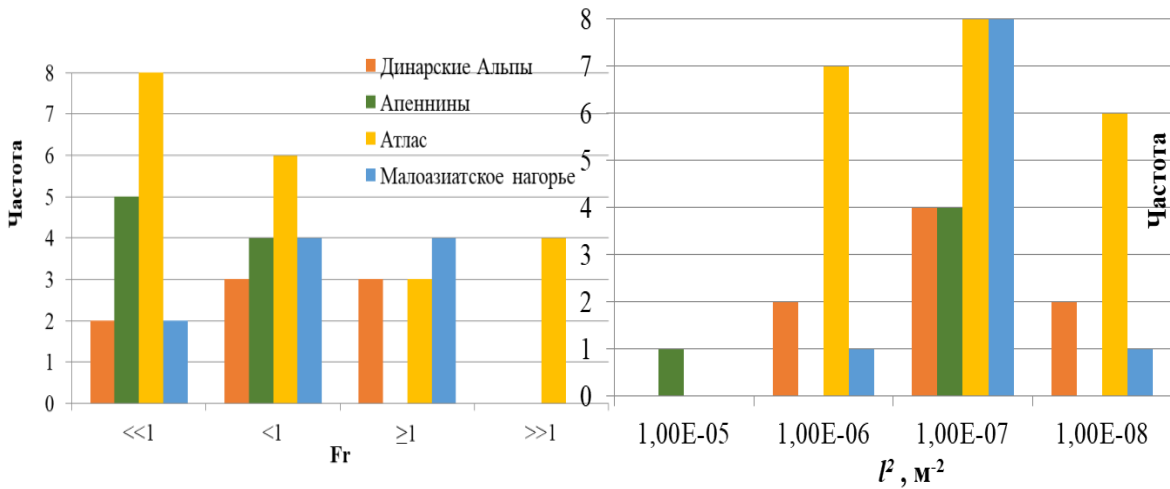
(по 45 случаям: 7 - Малоазиатское нагорье, 8 - Динарские Альпы, 9 - Апеннины, 21 - Атласские горы)

Число Фруда

Параметр Скорера

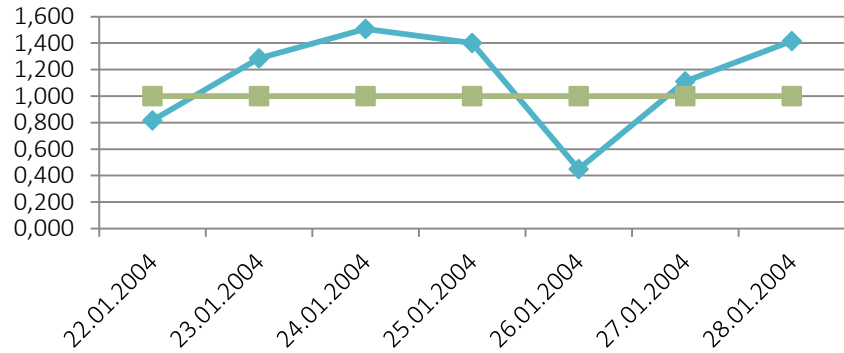
Масштаб Лира

Число Ричардсона

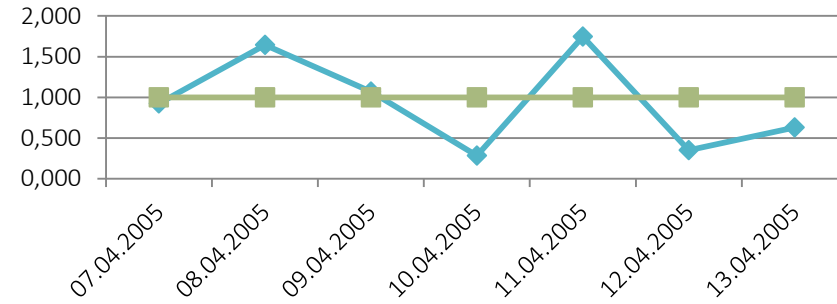


# Временной ход числа Бюргера

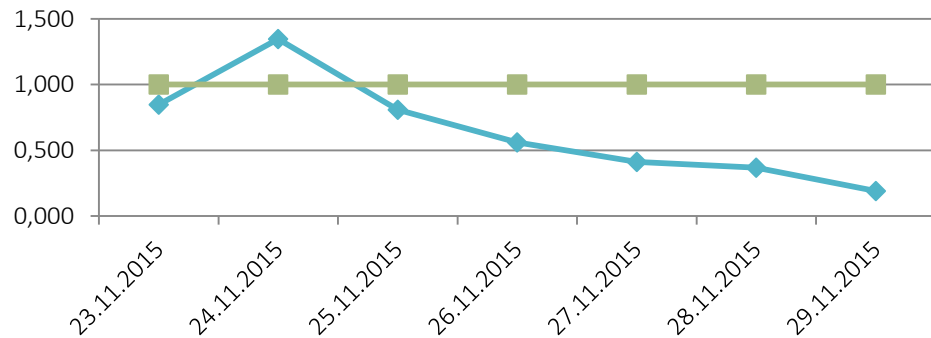
Невидимые захваченные горные волны  
 $L_{max}=195,4$



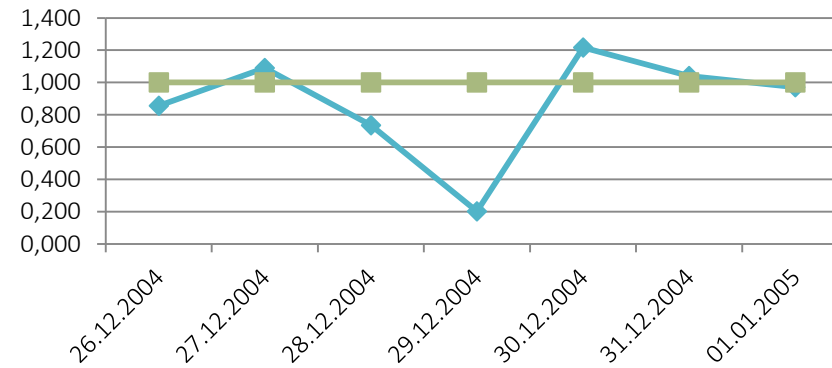
Невидимые вертикальные горные волны  
 $L_{max}=27,9$



Невидимые вертикальные горные волны  
 $L_{max}=72,5$



Видимые горные волны  $L_{max}=29$



# ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- В 60% случаев возникновения ГВ над горными хребтами наблюдалось **струйное течение**, в 36% – струйное течение наблюдалось на расстояниях 1000 – 2000 км и всего в 4% отсутствовало. Скорости струйного течения не превышали 60 м/с (в 68% случаев)
- ГВ возникали над Атласом **при направлении ветра перпендикулярном к хребту**  $\pm 50^\circ$ , над Малоазиатским нагорьем  $\pm 40^\circ$ , над Апенниннами  $\pm 30^\circ$ , над Динарскими Альпами  $\pm 30^\circ$  (за исключением случая 07.04.2017, когда отклонение составило  $65^\circ$ ).
- Характерным состоянием атмосферы, способствующим образованию ГВ является наличие **слоя инверсии**, **расслоенность по влажности**, усиление ветра после преодоления вершины, перпендикулярное направление ветра. При недостаточно влажной атмосфере ( $\leq 65\%$ ) и слабом ветре орографические облачные полосы не формируются;
- Несмотря на то, что при числе Фруда  $< 1$ , считается, что часть потока заблокирована с наветренной стороны, во всех регионах большинство горных волн наблюдалось при  $Fr < 1$ . При этом максимальные значения  $Fr \gg 1$  были получены только для Атласских гор (до  $Fr = 5.0$ ); Число Бюргера, таким образом, представляется более адекватным показателем для детектирования ситуации блокирования. Во всех случаях его значения превышали 1.
- Наибольшее число случаев, когда поток мог считаться турбулентным ( $Ri < 1$ ), было получено для Атласа;

# ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- **Захваченные волны** наблюдались в 34 случаях, а **вертикально распространяющиеся** в 11 случаях, причём из них в 6 случаях над Атласом.
- Наиболее часто **параметр Скорера** при захваченных волнах находился в диапазоне  $10^{-7} - 10^{-6}$ , при вертикальных -  $10^{-8} \text{ м}^{-2}$ . Чем меньше параметр Скорера, тем вероятнее, что волны будут вертикально распространяющимися
- Масштаб Лира  $\lambda_z$ , характеризующий длину горных волн, в регионе Малой Азии составлял от 4 до 25 км, над Апенниннами 2 – 15 км, над Атласом 3 – 55 км. Над Динарским нагорьем при направлении воздушного потока с юго-запада  $\lambda_z = 5 - 12$ , а при направлении с северо-востока  $\lambda_z = 6 - 30$ . Меньшие  $\lambda_z$  значения в случаях переноса с юго-запада обусловлены более сильным ветром. Большие значения  $\lambda_z$  и малые  $l_2$  могут быть индикатором вертикально распространяющихся волн;
- Фактическое расстояние  $L$ , на котором ощущается влияние хребта, уменьшается при усилении натекающего потока. Минимальное расстояние было получено над Атласом  $L \sim 0$ , для случаев с большими скоростями ветра как на приземном уровне ( $>8 \text{ м/с}$ ), так и на вершине ( $>10 \text{ м/с}$ ). Также во всех этих случаях  $Fr \gg 1$ .