

Двадцать первая международная конференция
**"СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО
ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА"**

РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

**Условия формирования орографических
атмосферных волн**

Федосеева Н.В., Симакина Т.Е., Соловых А.Д.

г. Москва

13-17 ноября 2023 г.

Введение

Горные районы занимают значительную часть континентов Земли и характеризуются специфическими метеорологическими явлениями, действующими в широком диапазоне масштабов.

Атмосферные волны в горах могут:

- замедлять глобальную атмосферную циркуляцию,
- влиять на температуру в полярной стратосфере и озоновый слой,
- являться источником турбулентности ясного неба.

Актуальность

Горные волны 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.

Одним из возможных способов обнаружения «невидимых» волн в тропосфере является использование спутниковой съемки в каналах водяного пара.

Цель работы

Определить критерии формирования горных волн различной структуры, возникающих на подветренной стороне Атласских гор.

Катастрофы, вызванные турбулентностью ясного неба



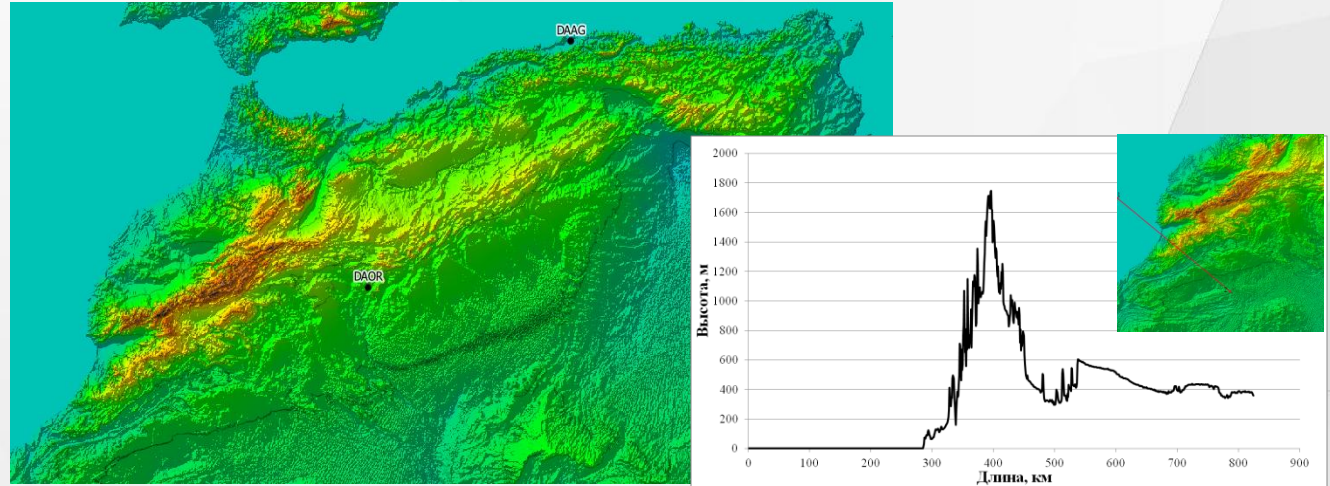
Катастрофа Boeing 707 на Фудзи



Инцидент Boeing 777 Москва - Бангкок

Северное побережье Африки. Атласские горы

Горная система Атлас на северной оконечности африканского континента служат барьером, отделяющим пустыню Сахара от средиземноморского бассейна. Простирается от Атлантического океана с запада на восток вдоль побережья Средиземного моря почти на 2300 км, через Марокко, Алжир и Тунис. Ширина гор более тысячи км, высота самой высокой точки 4165 м (гора Тубкаль).



Цифровая модель рельефа. Профиль высот

Аэрологические станции на наветренной и подветренной стороне Атласских гор

Станция 60390 DAAG Dar-El-Beida

- широта: 36.68°
- долгота: 3.21°
- высота станции: 29.0 м



Станция 60571 DAOR Bechar

- широта: 31.50°
- долгота: -2.25°
- высота станции: 816.0 м

Каналы водяного пара в ИК диапазоне для обнаружения «невидимых» горных волн

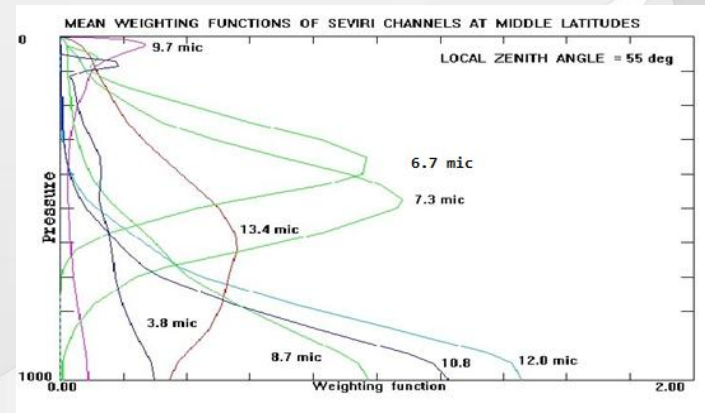
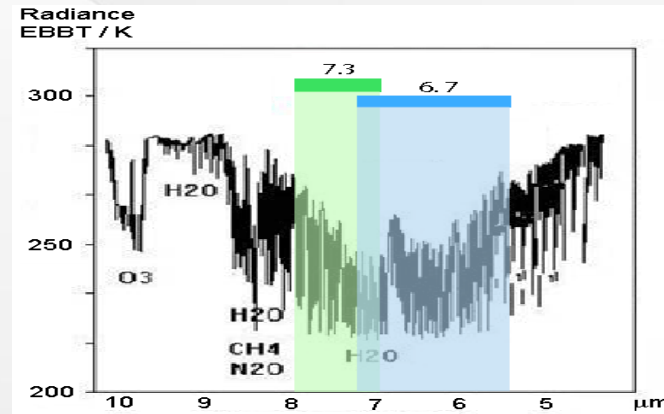
Водяной пар имеет широкие и интенсивные полосы поглощения в ИК области спектра.

Широкая полоса поглощения водяного пара приходится на каналы MODIS (спутники Terra и Aqua) Emissive 27 и 28 (6.7 и 7.3 мкм, соответственно).

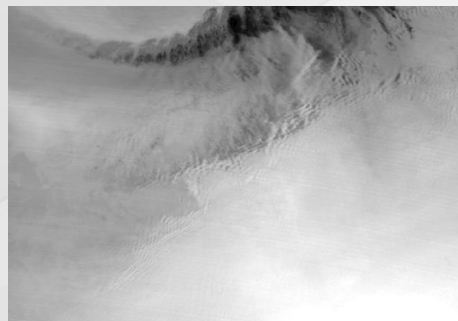
Высоты максимумов весовых функций каналов водяного пара для средних широт приходятся на:

350 гПа (6.7 мкм) – излучение водяного пара в верхней тропосфере,

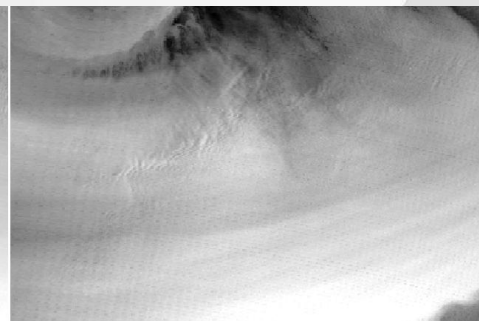
500 гПа (7.3 мкм) – излучение водяного пара в средней тропосфере.



Весовые функции ИК каналов



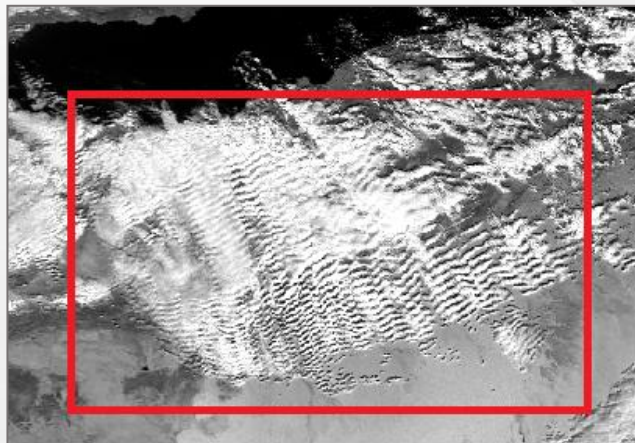
Пароводяной канал 7.3 мкм



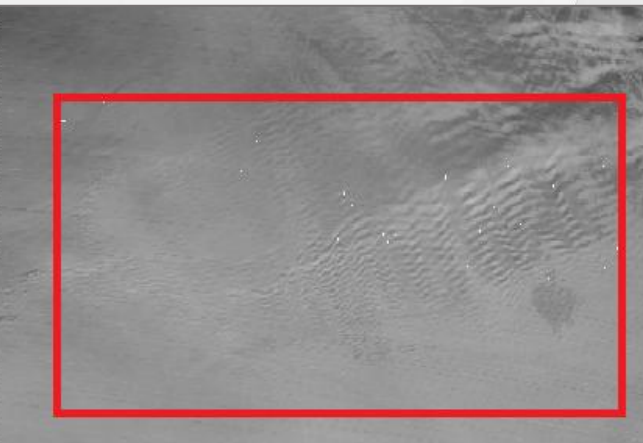
Пароводяной канал 6.7 мкм

«Видимые» орографические волны

Видимый диапазон (0.86 мкм)



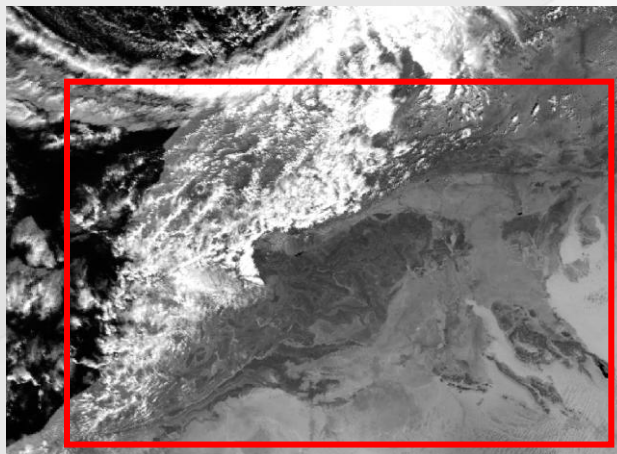
Пароводяной канал (7.3 мкм)



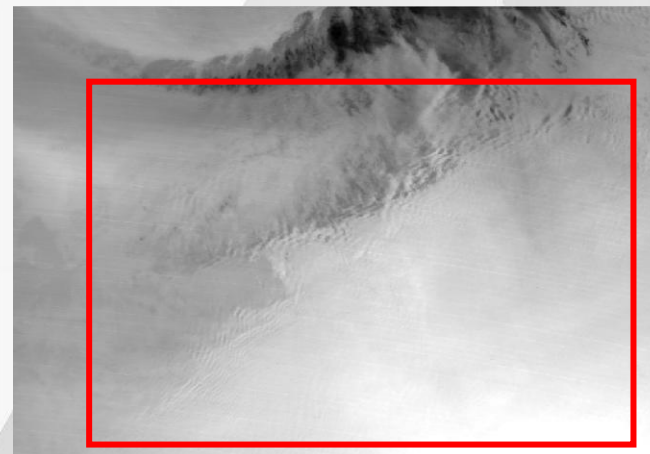
Пример волн за горами Атлас
29.12.2004 10:35 UTC

«Невидимые» орографические волны

Видимый диапазон (0.86 мкм)



Пароводяной канал (7.3 мкм)



Пример волн за горами
Атлас 16.03.2011 11:00 UTC

Число Фруда

Число Фруда определяется по формуле:

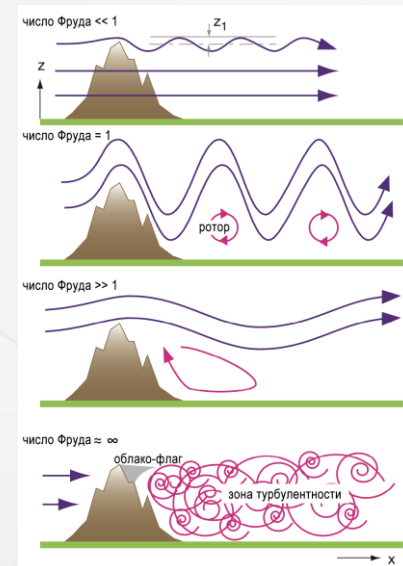
$$Fr = \frac{V}{NH}$$

где V – средняя скорость ветра [м/с], H – высота барьера [м] относительно высоты воздушного потока и N – частота Брента-Вяйсяля [c^{-1}].

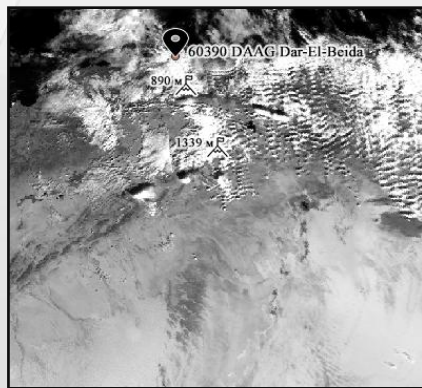
Частота Брента-Вяйсяля:

$$N = \sqrt{\frac{g \, d\theta}{\theta \, dz}}$$

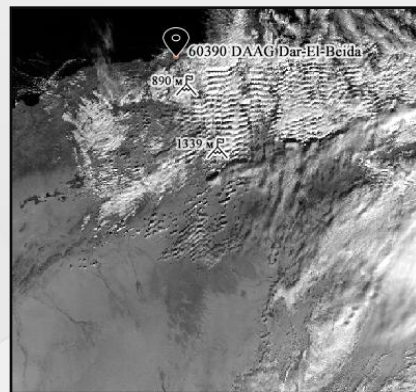
где θ – потенциальная температура [К], g – ускорение свободного падения [m/c^2], z – высота [м].



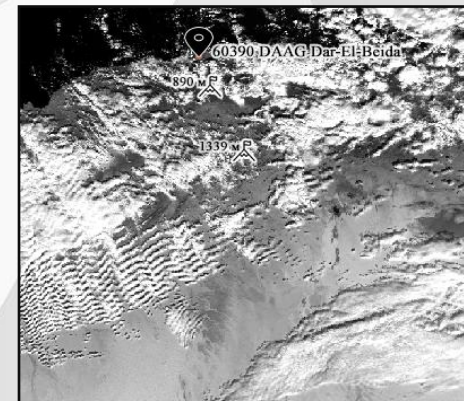
Разница распространения орографических волн при разных числах Фруда



Fr < 1
(25.01.2004)



Fr = 1
(21.01.2004)



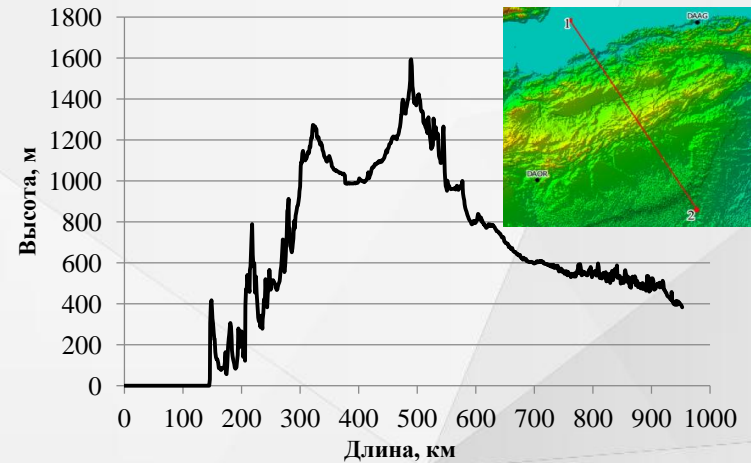
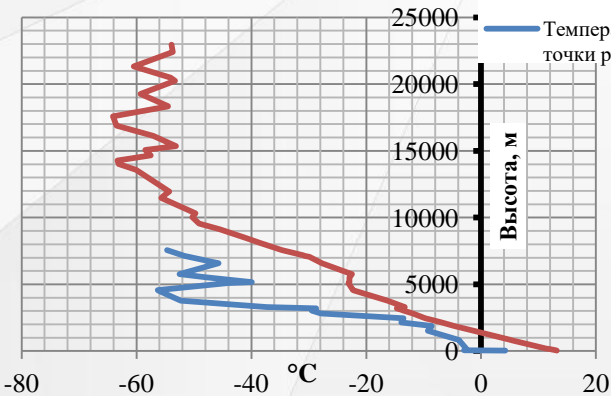
Fr >> 1
(29.12.2004)

При числе Фруда < 1 наблюдаются малые амплитудные колебания, облака плотно сбиты в кучу, часть потока не может пересечь вершину, горные волны слабо распространены с подветренной стороны.

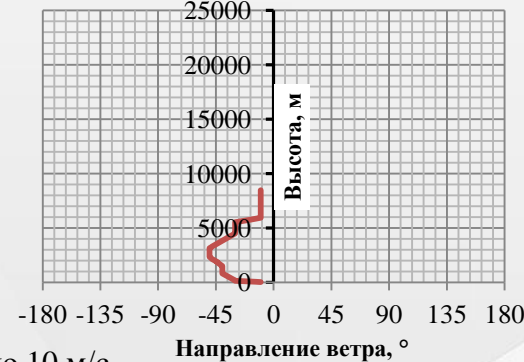
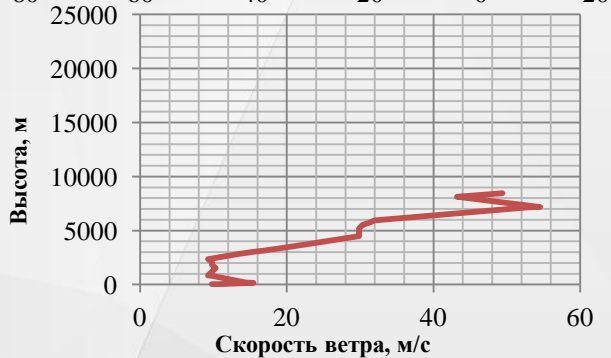
При Числе Фруда $= 1$ амплитудные колебания равномерны и совпадают с шириной горного хребта. С подветренной стороны горные волны продолжают распространяться.

При Числе Фруда $>> 1$ воздушный поток длиннее ширины горного хребта и свободно проходит через него. С подветренной стороны возможно образование области обратного потока ветра.

Вертикальные профили метеопараметров при наблюдении «видимых» волн *Пример за 29.12.2004*



Высотный профиль



Скорость ветра у горной вершины около 10 м/с.

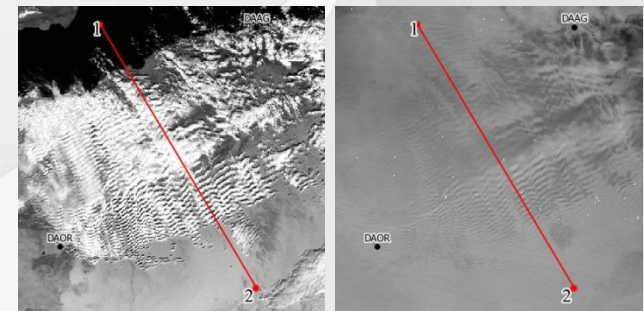
Температура на высоте горной вершины около -5°C . На высоте 3200 м наблюдается приподнятая температурная инверсия и более мощный слой изотермии между 5000 и 5800 м.

Два влажных слоя на высотах 1.8 км и 2.4 км ($>70\%$), с более сухой прослойкой $<60\%$ на высоте 2.1 км. Дефицит точки росы над горным хребтом близок к нулю.

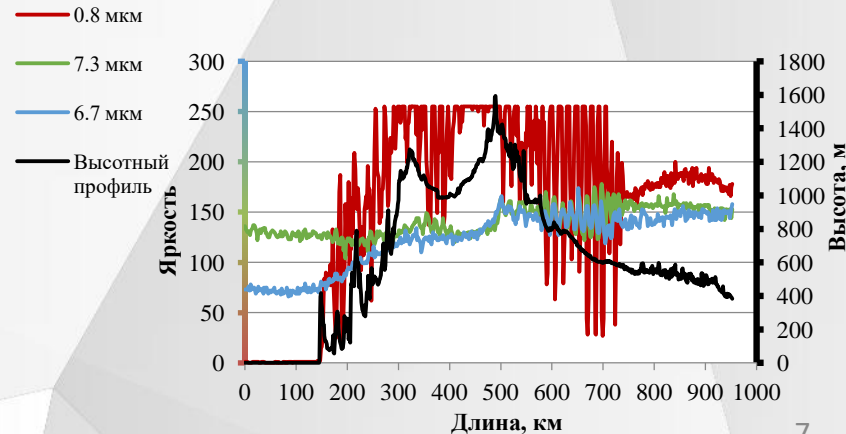
Направление ветра СЗ-С - перпендикулярное к горному хребту, что является необходимым условием для возникновения ГВ.

Число Фруда для этого случая равно 5 ($Fr \gg 1$).

Высокие значения яркости в видимом спектральном канале (красная кривая) свидетельствуют о высокой отражаемости оптически плотных облаков. Невысокие значения яркости и низкая амплитуда их колебаний в пароводяных каналах (зеленая и синяя кривые) свидетельствуют о малой вертикальной мощности распространения волновых движений и об отсутствии влияния горного хребта на среднюю и верхнюю тропосферу.

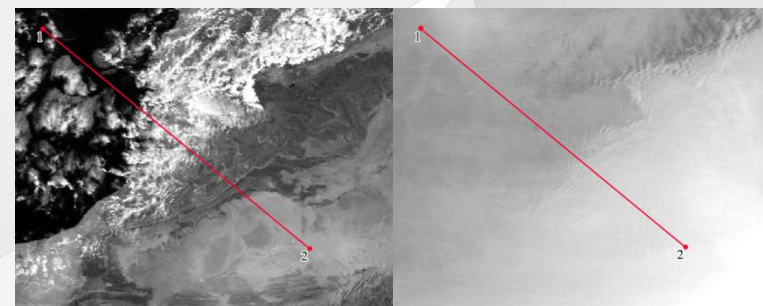
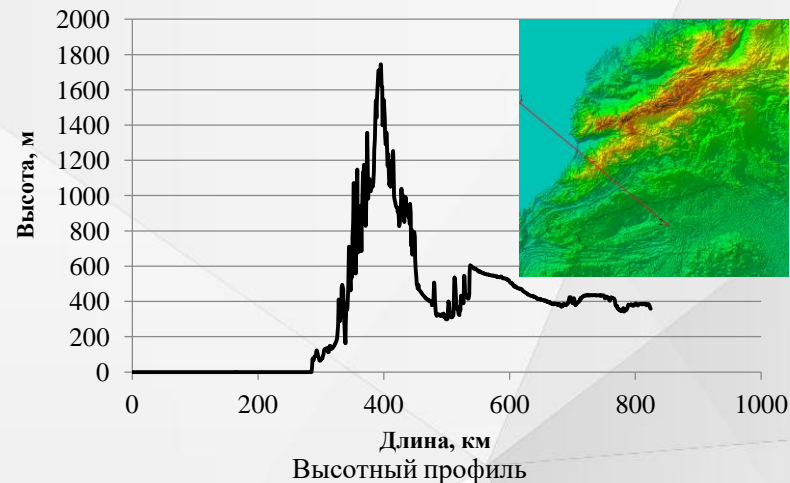
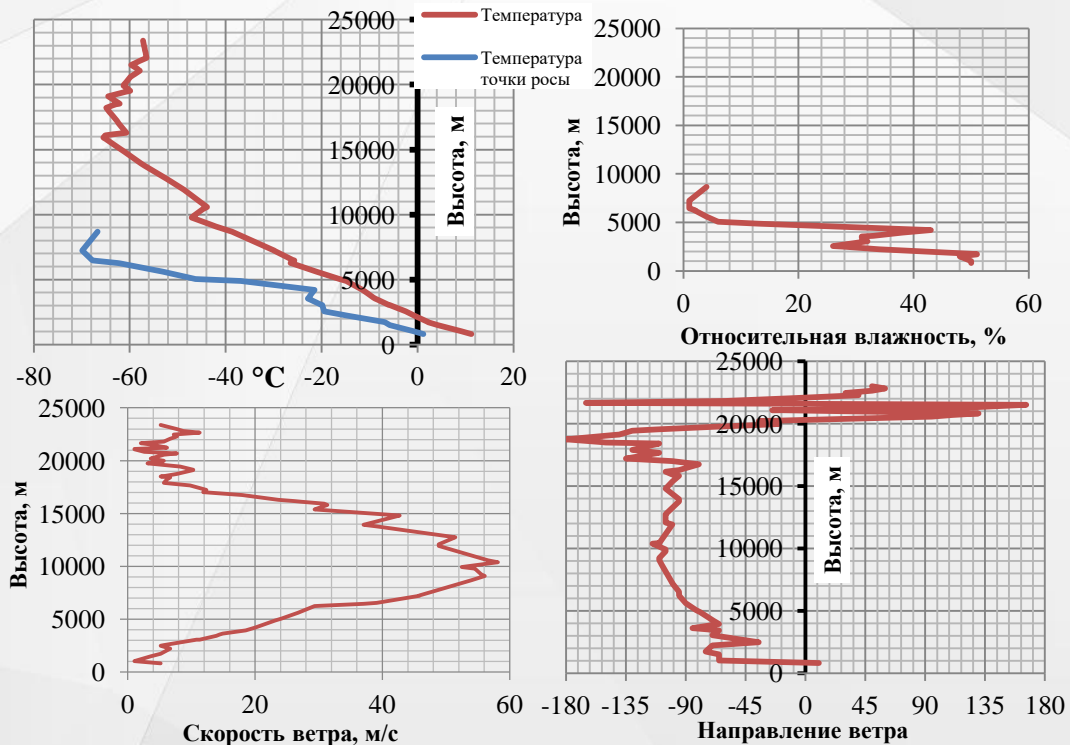


Видимый и пароводяной канал MODIS



Фотометрические разрезы яркости (0.86, 6.7, 7.3 мкм)

Вертикальные профили метеопараметров при наблюдении «невидимых» волн *Пример за 16.03.2011*



Видимый и пароводяной канал MODIS

При влажности набегающего потока менее 65% и ненулевом дефиците точки росы над горами облачность не формируется.

Скорость ветра у горной вершины около 10 м/с.

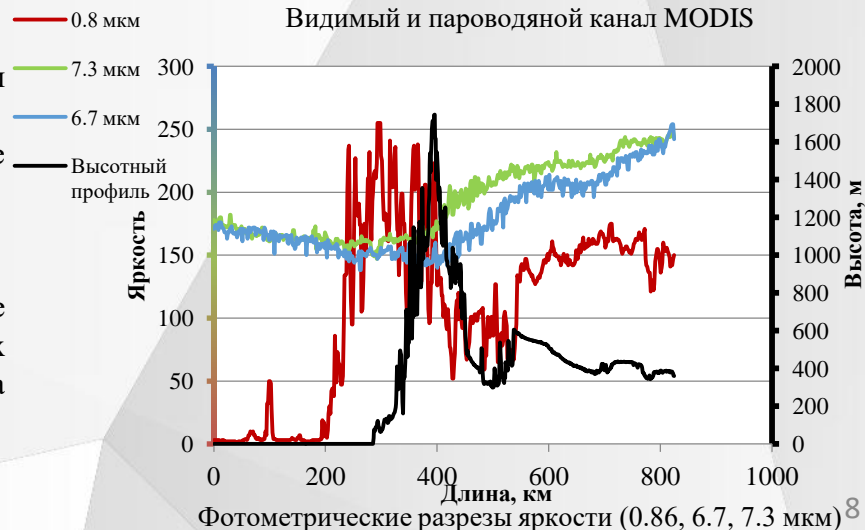
Приподнятая температурная инверсия на высоте 6.5 км выражена слабо.

Направление ветра вблизи вершины СЗ-ССЗ - перпендикулярное к горному хребту.

Температура на высоте горной вершины около 0°C.

Число Фруда для этого случая равно 5 ($Fr \gg 1$).

Высокие значения яркости в пароводяных каналах (кривые зеленого и синего цвета) свидетельствуют о мощных волновых движениях, занимающих всю тропосферу, влияние горного хребта прослеживается до высоты 7 км.

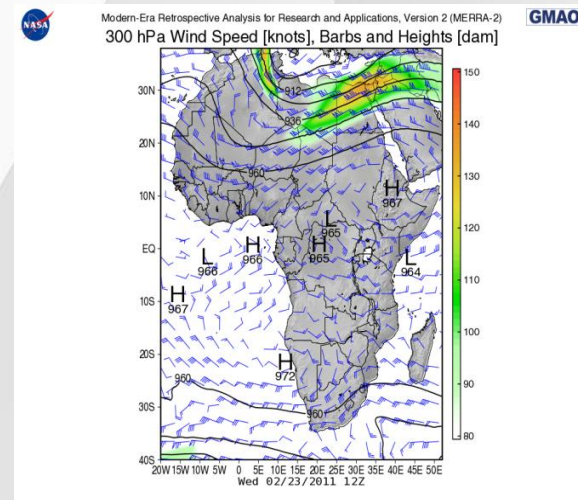
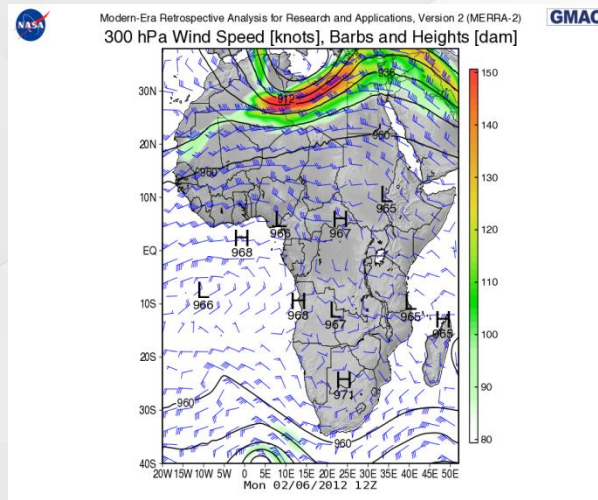
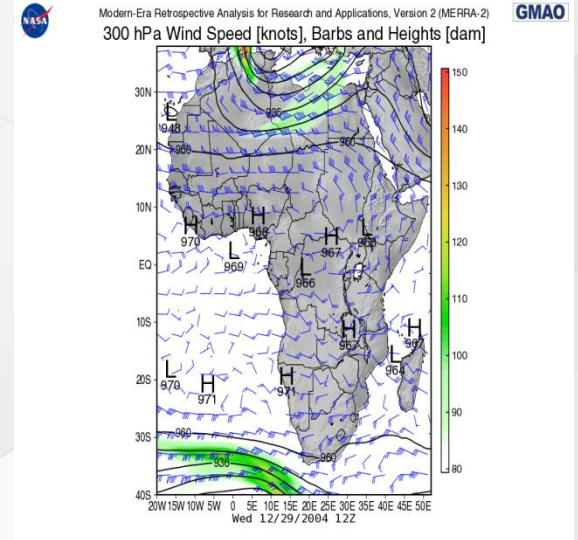
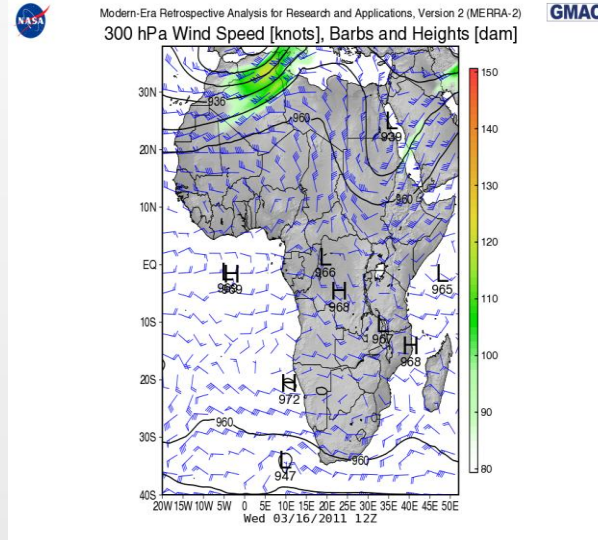


Влияние струйного течения

Примеры АТ-300 для случаев, когда наблюдались горные волны в горах Атласа

В формировании волновых возмущений в тропосфере важную роль играют ветра, так как струйное течение (СТ) возбуждает генерацию ветровых порывов над земной поверхностью, способствуя возникновению внутренних гравитационных волн (ВГВ). В таком случае генерация ВГВ вблизи гор схожа с возникновением возмущений в областях холодных фронтов, циклонов, над которыми постоянно присутствует ветер.

На всех АТ-300 можно наблюдать выраженные струйные течения с очень сильным ветром (до 70 м/с), направленным перпендикулярно к горным склонам Атласа. Также известно, что орографические волны часто наблюдаются в высотной барической ложбине, где проходят СТ.



Заключение

Необходимыми условиями образования атмосферных горных волн в горах Атлас на севере Африки являются

- скорость ветра более 10 м/с у вершины горного хребта;
- направление ветра должно быть перпендикулярным по отношению к горному хребту;
- выраженная стратификация атмосферы по влажности над горами;
- наличие приподнятой инверсии температуры над горным гребнем. В случае «невидимых» волн приподнятая температурная инверсия выражена слабее, чем для видимых. В случае, когда в Атласских горах орографические волны не наблюдались, инверсия полностью отсутствовала.

Для формирования видимых волн кроме достаточно влажной атмосферы (более 65%) необходим близкий к нулю дефицит точки росы над горным хребтом.

Для формирования ГВ число Фруда должно быть больше 1.

Присутствие струйного течения на высоте 300 гПа над северным побережьем Африки является необходимым, но не достаточным условием возникновения орографических волн в Атласских горах.

Список литературы

1. Федосеева Н.В., Ефимова Ю.В. Применение спутниковой съемки в каналах водяного пара при дешифрировании горных волн.// Материалы V научно-технической конференции «Проблемы военной геофизики и контроля состояния природной среды». СПб, 23-25 мая 2018 г. С. 736-739.
2. Fedoseeva N.V., Simakina T.E. THE GABOR FILTER APPLICATION IN SATELLITE ANALYSIS OF “INVISIBLE” OROGRAPHIC WAVES. В сборнике: Physics of the Atmosphere, Climatology and Environmental Monitoring. Modern Problems of Atmospheric Physics, Climatology and Environmental Monitoring. Сер. "Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences" 2022. С. 149-156.

Спасибо за внимание