

# Расчет потенциала перспективного радара НР-МСТ при исследовании нижней и средней атмосферы

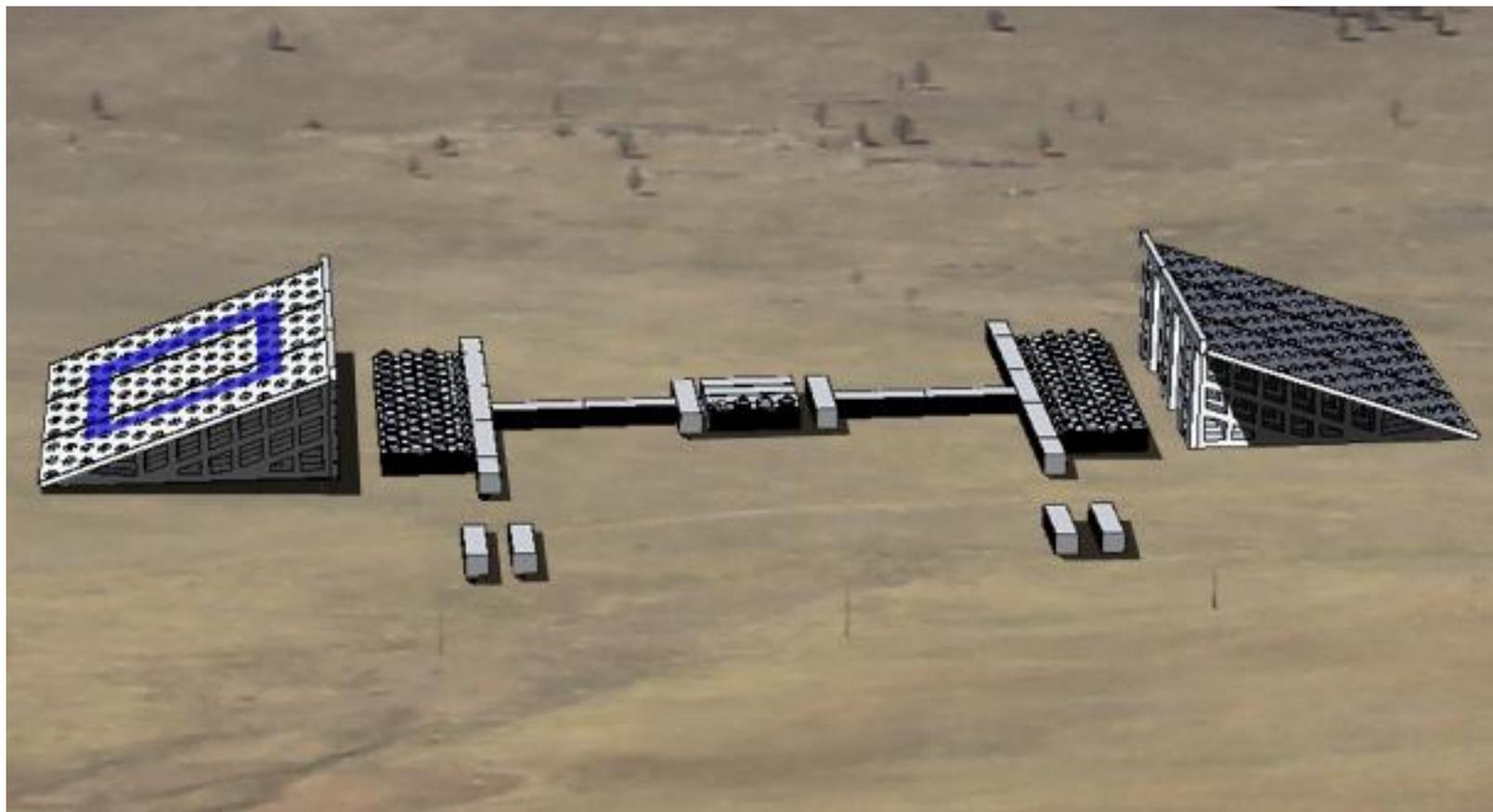
Сетов А.Г., Медведев А.В., Лебедев В.П., Кушнарев Д.С.

Институт солнечно-земной физики

# Перспективный радар НР-МСТ

- Фазированная антенная решетка
- 2 панели 40 х 40 м разнесенные на 100 м
- Сектор обзора каждой панели: 45
- Диапазон частот: 154-162.7 МГц
- Тип антенн: крест-вибратор, 3072 шт
- Общая мощность : 2 МВт
- Общая эффективная площадь: 2500 м<sup>2</sup>
- Минимальное разрешение по высоте: 480 м

# Вид радара НР-МСТ



# Задача

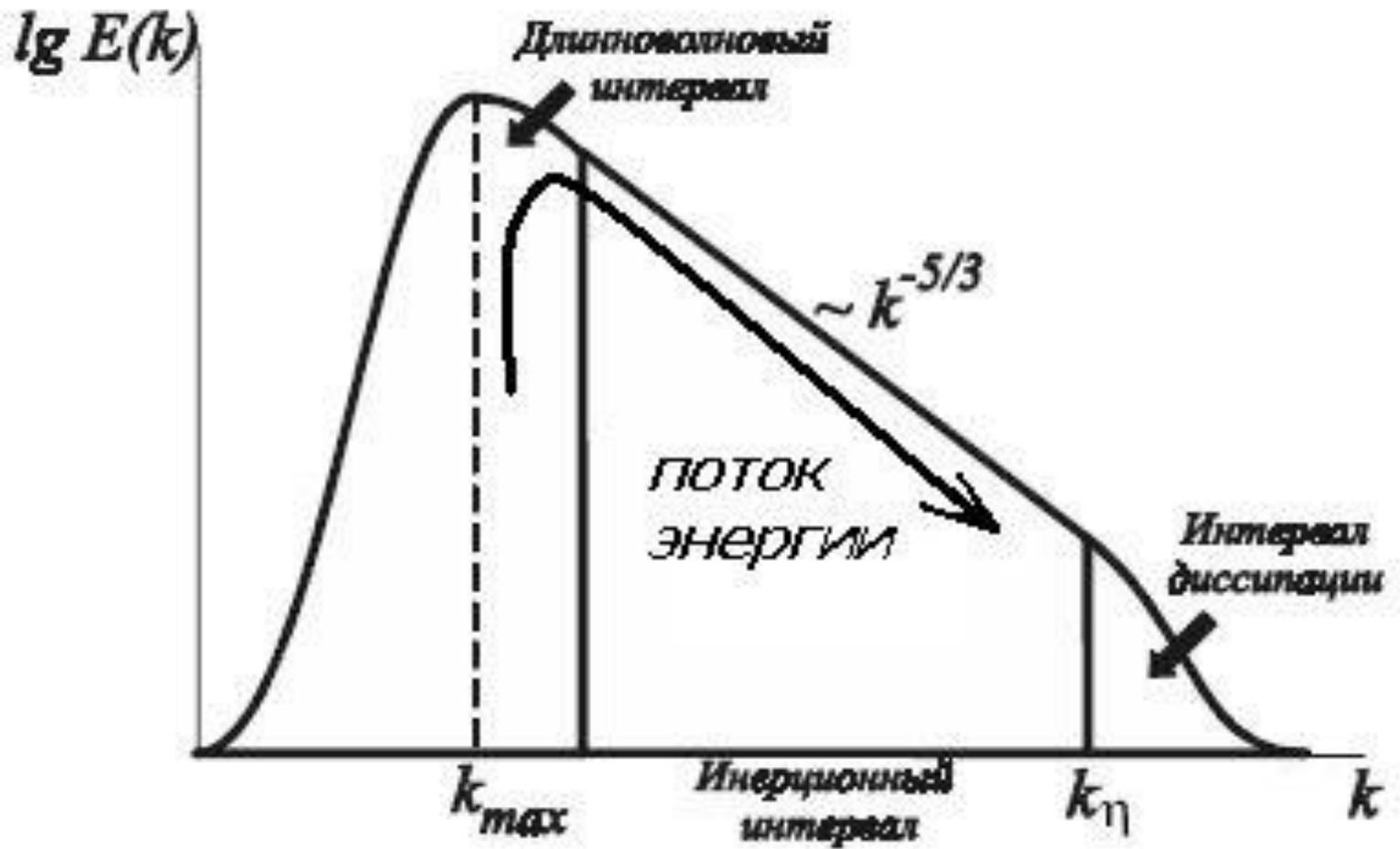
- В настоящее время для исследования ионосферы ИСЗФ СО РАН используется радар ИРНР
- ИРНР не позволяет изучать атмосферу на высотах до 200 км
- Многофункциональный радар НР-МСТ создается для диагностики атмосферы в широком диапазоне высот – от тропосферы до плазмосферы
- Необходимо оценить диагностические возможности радара НР-МСТ при изучении тропосферы, стратосферы, мезосферы

# Рассеяние на турбулентных флуктуациях

- Крупномасштабные потоки и волны приводят к образованию турбулентностей
- Из-за турбулентностей в атмосфере происходят флуктуации параметров среды
- Рассеяние происходит на компоненте пространственного спектра флуктуаций показателя преломления  $n(\mathbf{k})$ , соответствующей половине длины волны радара (условие Брэгга):

$$\lambda/2 \approx 0.95 \text{ м}$$

# Колмогоровский спектр



# Измеряемые параметры

- Мощность принятого сигнала
  - => интенсивность турбулентности
- Доплеровское смещение
  - => полный вектор скорости нейтрального ветра
- Доплеровское уширение спектра
  - => скорость турбулентных флуктуаций
  - => интенсивность турбулентности
- Направление прихода сигнала
  - => ракурсная чувствительность и структура неоднородности
- Полученные параметры позволяют изучать волновые процессы

# Методика расчета потенциала

- Необходимо сравнить чувствительность радара с ожидаемым уровнем сигнала рассеяния
- Уровень сигнала рассеяния зависит не только от среды, но и от характеристик радара
- Проще использовать удельную эффективную площадь рассеяния единичного объема среды (УЭПР)  $\sigma_{\text{ср}}$ , которая зависит только от параметров среды
- Тогда чувствительность радара – минимальная УЭПР  $\sigma_{\text{мин}}$ , которой должна обладать среда для оценки параметров с заданной точностью
- Если  $\sigma_{\text{ср}}/\sigma_{\text{мин}} > 1$ , то проведение измерений возможно.

# Методика расчета потенциала

- УЭПР для турбулентных флуктуаций [Lübken, 2014]:

$$\sigma_{\kappa} = 10.4\pi^2 k^4 \chi_n \varepsilon^{-1/3} \eta_K^{11/3} \left( y^{-11/3} + y^{-3} \right) \exp \left[ -\frac{0.2}{Sc} \left( \frac{3}{2} y^{4/3} + y^2 \right) \right]$$

$$y = 2.83\eta_K k$$

- Важные параметры
  - $\varepsilon$  – скорость диссипации турбулентной энергии
  - $Sc$  – число Шмидта
  - $\eta_K$  – микроразмер Колмогорова
  - $\chi_n$  – включает градиент показателя преломления

# Чувствительность радара

- Минимальная УЭПР, которой должна обладать среда

$$\sigma_{\min} = 18.2 \frac{\pi R^2 k T_{\text{sys}} B \text{SNR}_{\min}}{P_t L_c \tau A_e}$$

- $\text{SNR}_{\min}$  определяется качеством оценок параметров и способом оценки
- Рассмотрим оценки параметров по первой задержке АКФ:

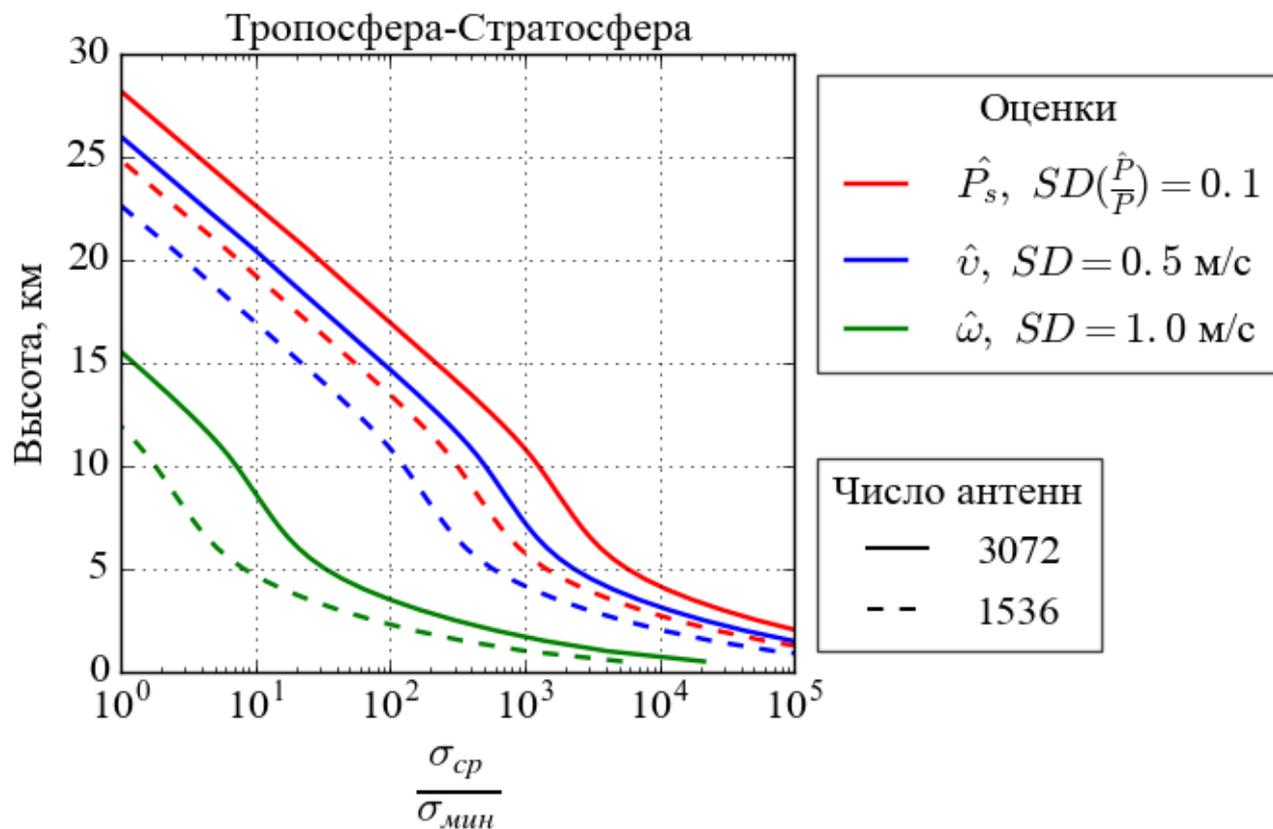
$$\hat{P}_s = \hat{R}(0) - N \quad \hat{v}_{\text{рад}} = \frac{\lambda}{4\pi T_s} \arg\left(\hat{R}(T_s)\right) \quad \hat{\sigma}_f = \frac{1}{\sqrt{2\pi T_s}} \left| \ln \left( \frac{\hat{P}_s}{|\hat{R}(T_s)|} \right) \right|^{1/2}$$

- Дисперсии оценок приводятся в [Довиак, Зрнич, 1988]

# Параметры модели

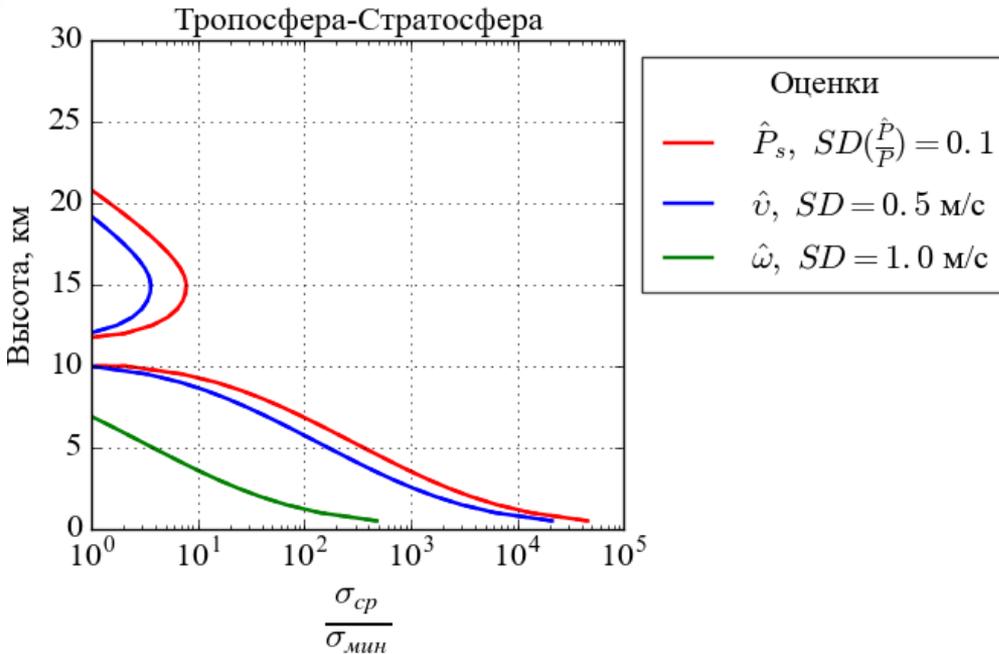
Параметр	Значение
Нейтральная атмосфера	MSIS
Частота повторения импульсов	1000 Гц
Число когерентных сложений	4
Длина импульса	7 мкс
Ширина полосы приемника	150 кГц
Время накопления	20 секунд
Скорость диссипации турбулентной энергии	$10^{-4} - 10^{-6}$ Вт/кг
Ширина спектра среды	2 м/с

# Нижняя атмосфера



# Equatorial Atmospheric Radar (EAR)

Equatorial Atmospheric Radar (EAR)  
15/06/2016



Частота: 47 МГц

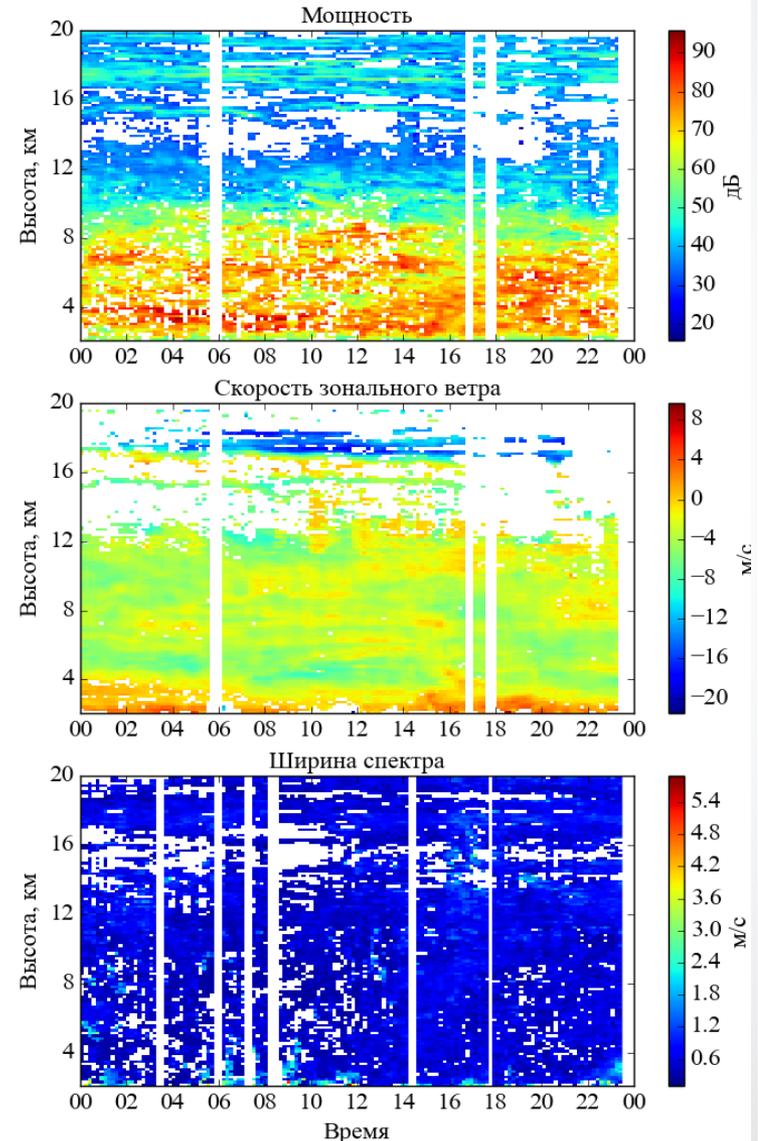
Мощность: 100 кВт

Фазированная решетка 560 элементов

Ширина луча: 3.4

Другой режим работы

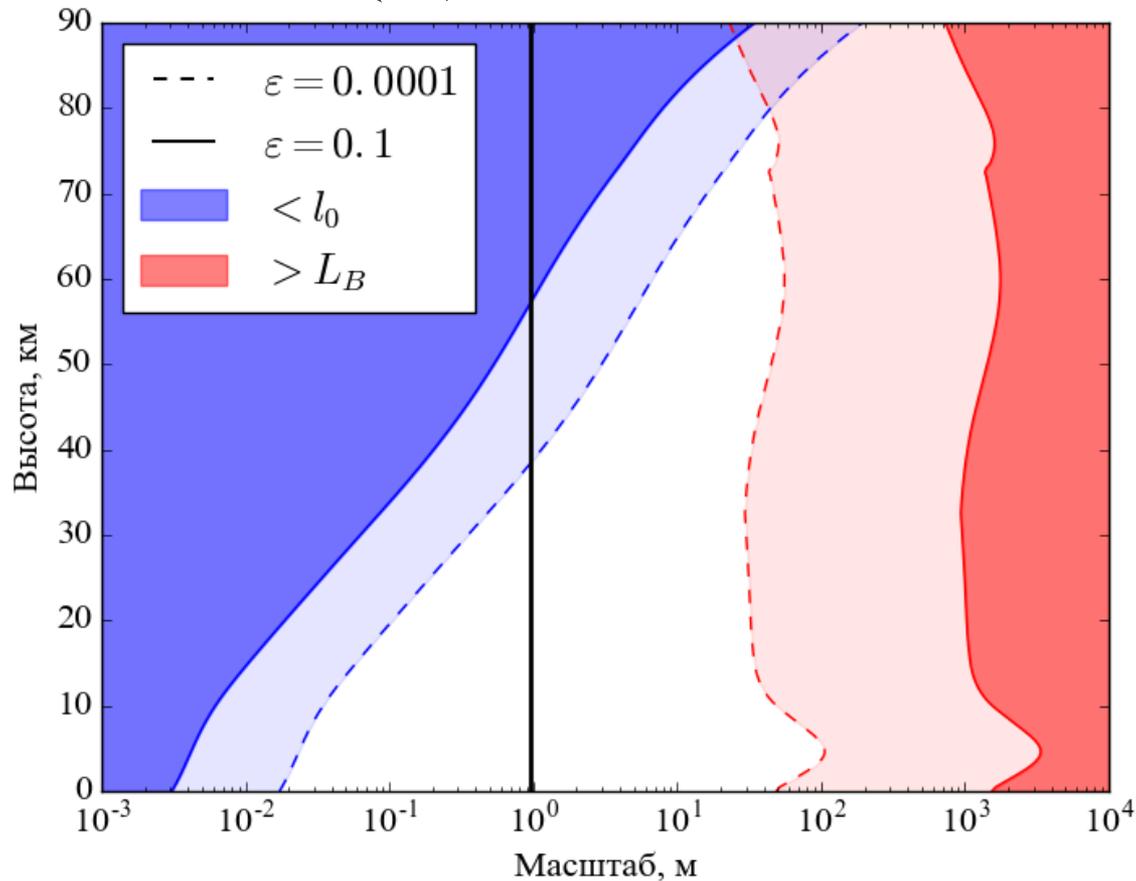
EAR data provided by Research Institute for Sustainable Humanosphere of Kyoto University



# Мезосферное эхо

С ростом высоты кинематическая вязкость растет, что приводит к затуханию все больших турбулентностей

$$l_0 \approx 7.4\eta_{Kol} = 7.4 \left( \frac{v^3}{\varepsilon} \right)^{1/4} \quad L_B \approx \frac{\pi}{0.62} \varepsilon^{1/2} \omega_B^{-3/2}$$

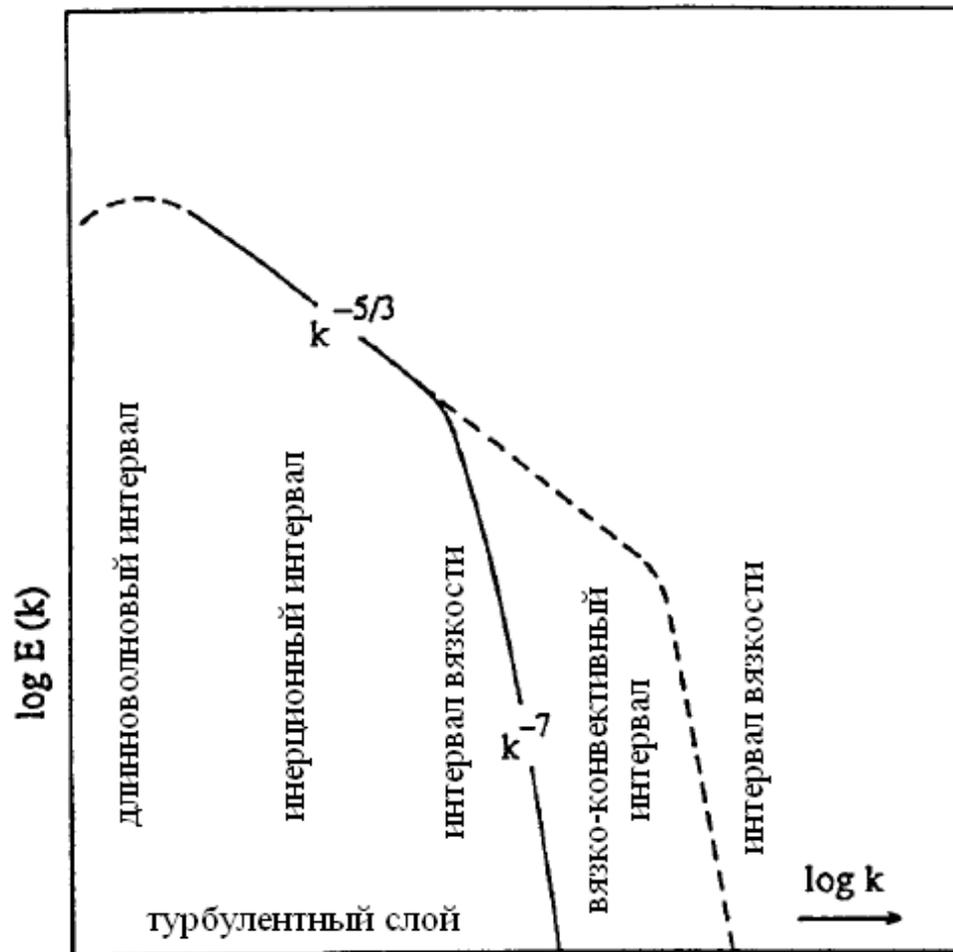


# Мезосферное эхо

- Тем не менее, на высотах ~85 км наблюдается мощное когерентное рассеяние – MSE (mesospheric summer echo)
- Предполагаемый механизм возникновения – ледяные частицы, которые образуются в летней мезосфере
- Связанное явление – серебристые облака



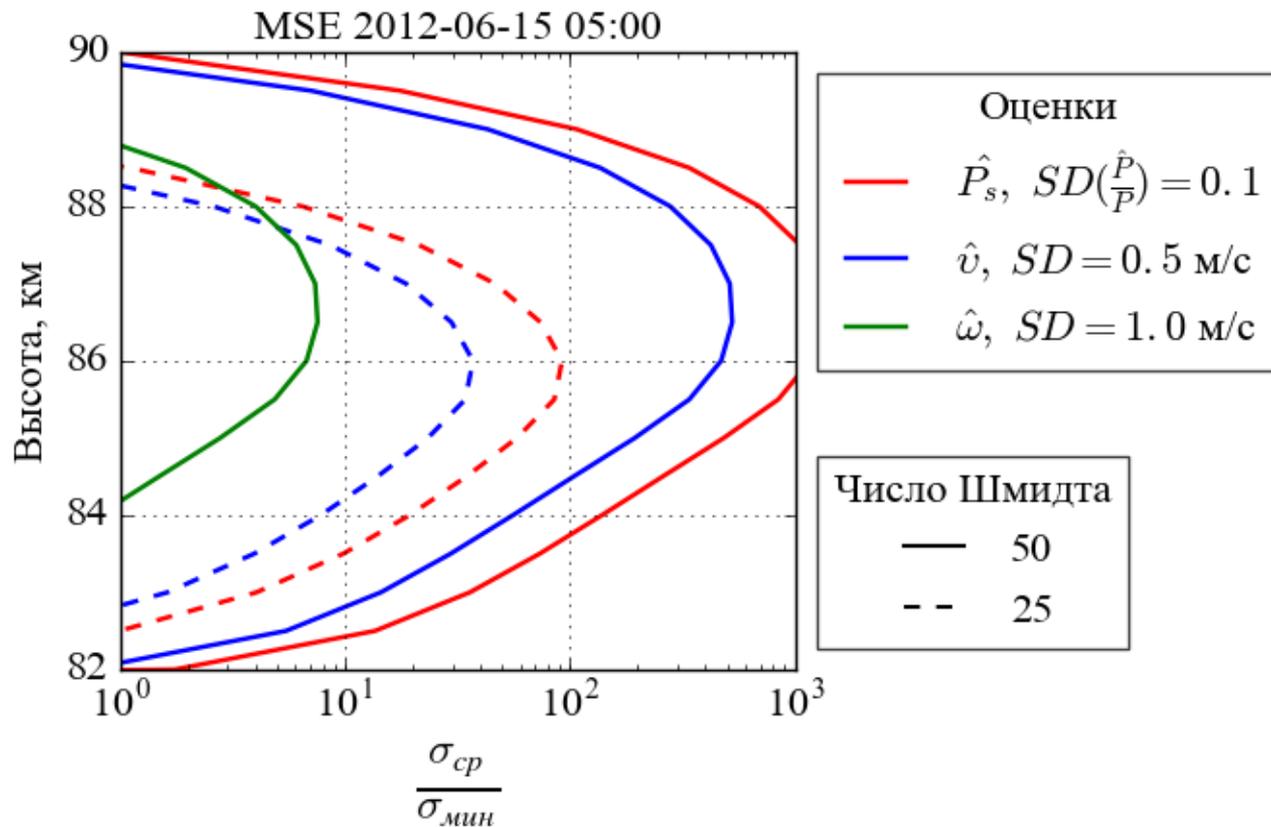
# Дополнительный интервал

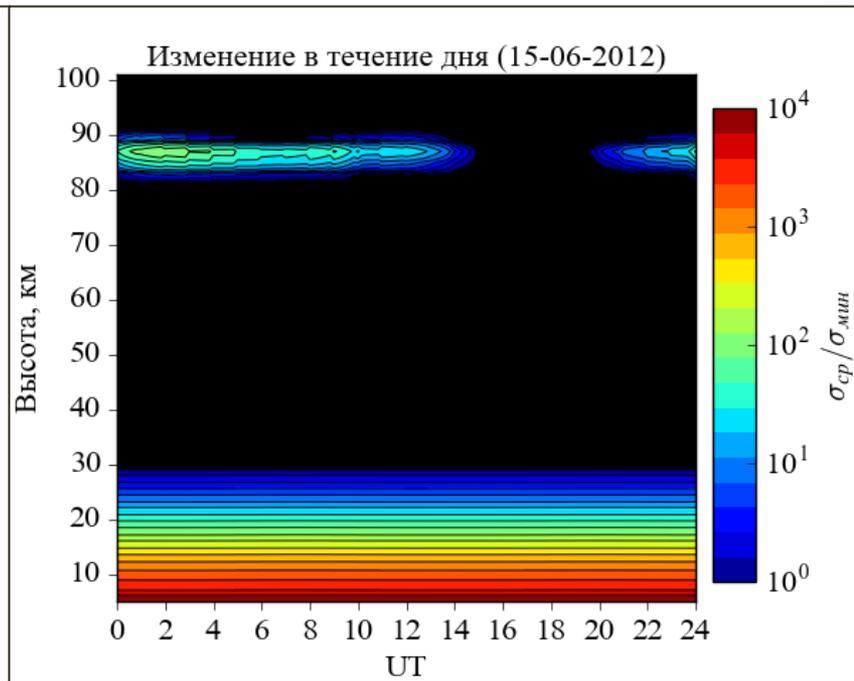
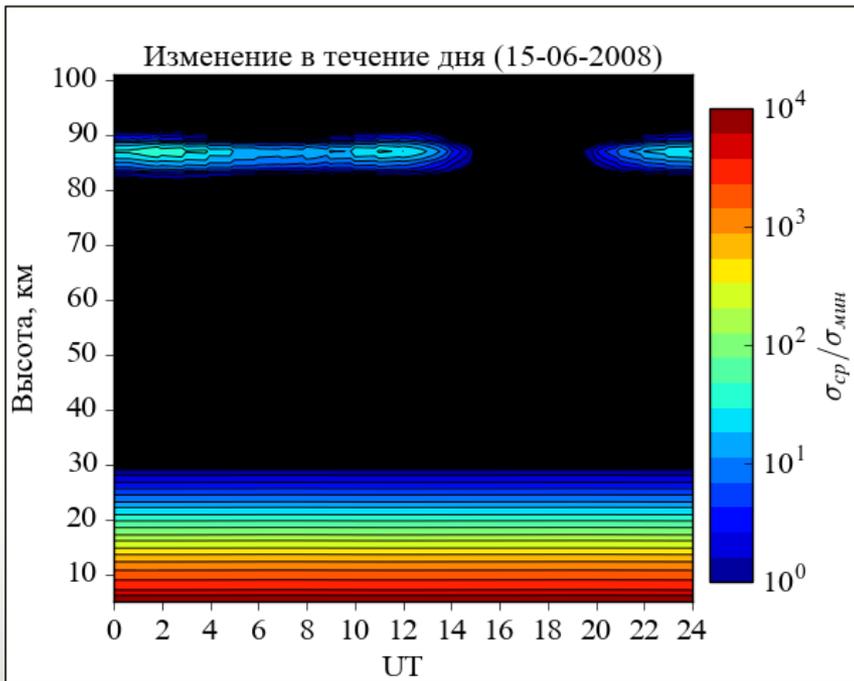
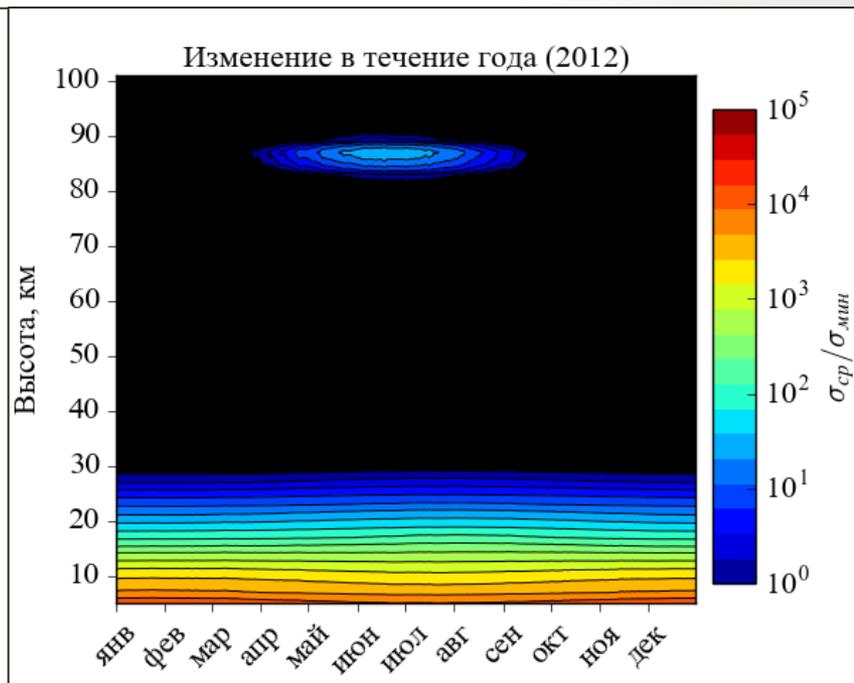
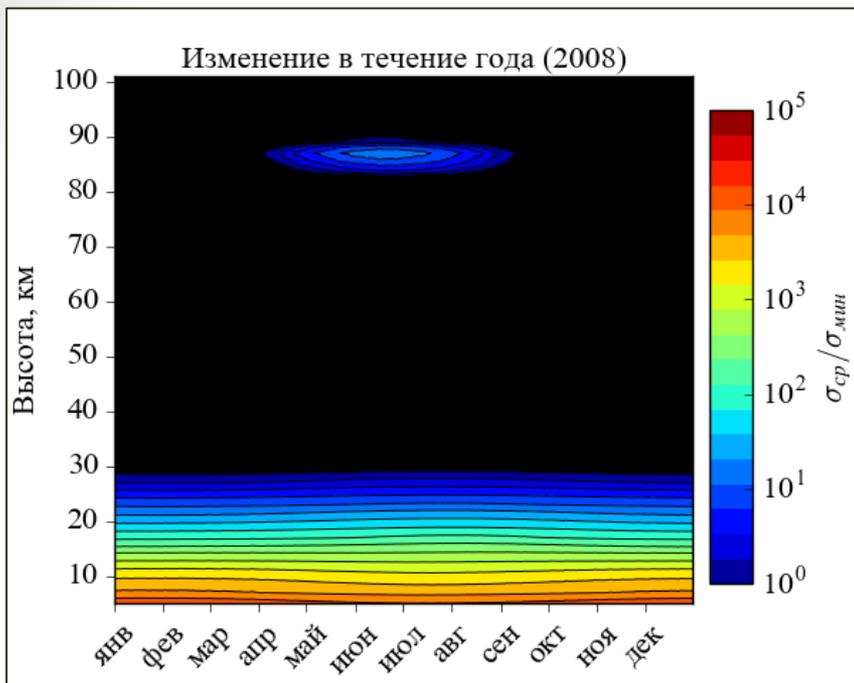


# Параметры модели

Параметр	Значение
Нейтральная атмосфера	MSIS
Частота повторения импульсов	1000 Гц
Число когерентных сложений	4
Длина импульса	7 мкс
Ширина полосы приемника	150 кГц
Время накопления	20 секунд
Ширина спектра среды	2 м/с
Скорость диссипации турбулентной энергии	$10^{-4} - 10^{-6}$ Вт/кг – тропосфера, стратосфера $10^{-1}$ Вт/кг – мезосфера
Ионосфера	IRI-2012
Число Шмидта	Слой с $S_c = 35$ с максимумом на 87 км

# Летнее мезосферное эхо (MSE)





# Результаты

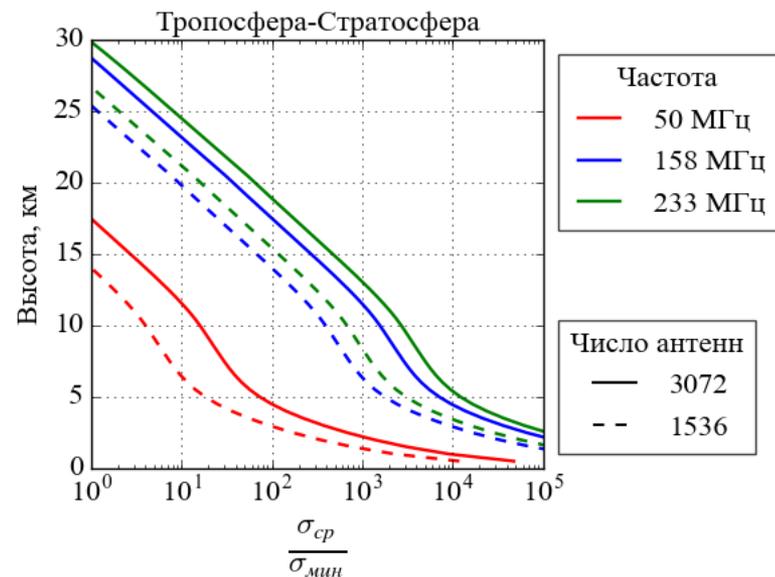
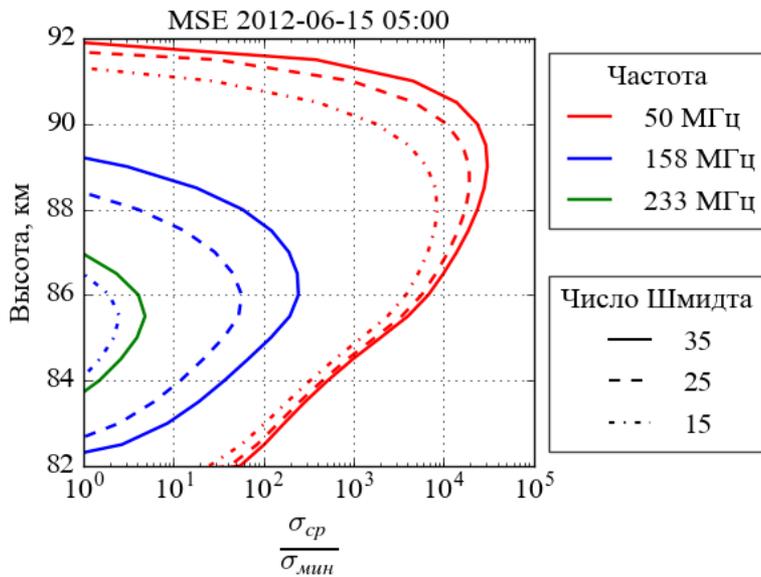
- Радар НР-МСТ позволит проводить регулярные измерения интенсивности турбулентностей, скорости нейтрального ветра и ширины спектра принятого сигнала в нижней атмосфере на высотах до 30 км
- Возможно наблюдение мезосферного эхо в летний период при достаточной интенсивности турбулентностей

Спасибо за внимание!

# СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

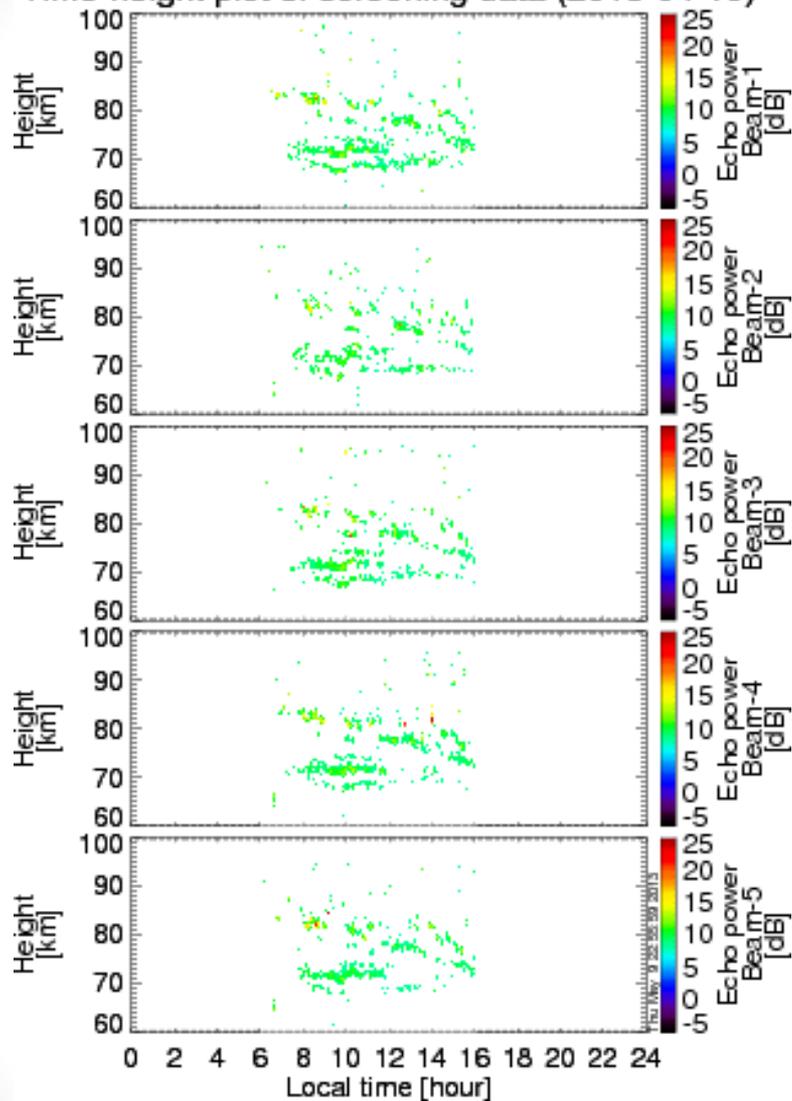
- Довиак, Зрнич, Доплеровские радиолокаторы и метеорологические наблюдения, Гидрометеиздат, 1988, с. 256.
- Lübken F.-J. Turbulent scattering for radars: A summary. *J. Atm. and Solar-Terr. Phys.* 2014, vol. 107, pp. 1–7. DOI: 10.1016/j.jastp.2013.10.015.

# Частотная зависимость

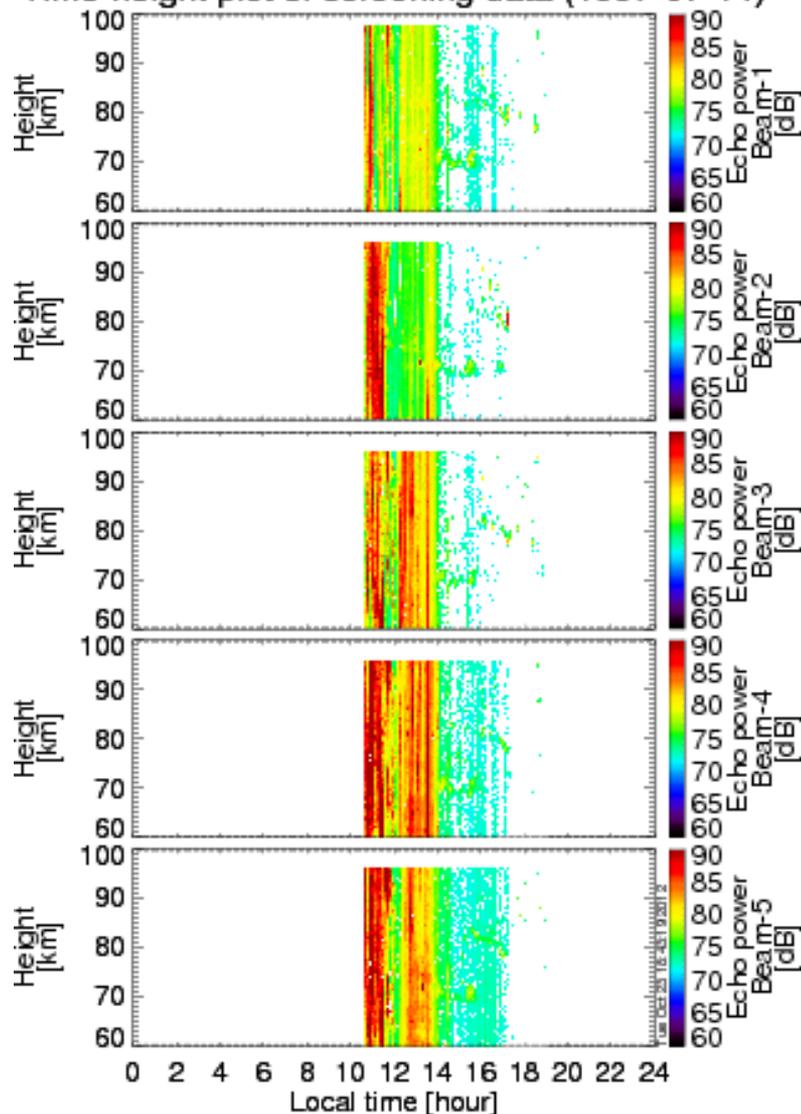


# MU-radar

Time-height plot of screening data (2013-04-19)



Time-height plot of screening data (1997-07-14)



# Дисперсии

$$SD\left(\frac{\hat{S}}{S}\right) = \frac{SNR^{-1}}{\sqrt{M}} \left[ 1 + 2SNR + \frac{SNR^2}{2\omega T_s \sqrt{\pi}} \right]^2$$

$$VAR \sigma_f^2 \approx \frac{\lambda^2}{32\pi^2 M \rho^2 \sigma_s^2 T_s^2} \left[ \frac{1 - \rho \sigma_s^2}{2\omega T_s \sqrt{\pi}} + SNR^{-2} + 2SNR^{-1} \rho \sigma_s^2 T_s \right]$$

$$VAR \sigma_f^2 = \frac{1}{8M\pi^4 \omega^2 T_s^4 \rho^2 \sigma_s^2} \left\{ 2 - 2\rho^2 \sigma_s^2 + \rho^4 \sigma_s^2 SNR^{-1} \right. \\ \left. + \left[ + 2\rho^2 \sigma_s^2 SNR^{-2} + F \right] \right\}$$

$$F = \rho^2 \sigma_s^2 \sum_{m=-(M-1)}^{M-1} \left\{ 3\rho^2 \sigma_s^2 T_s + \frac{\rho^2 \sigma_s^2 T_s}{\rho^2 \sigma_s^2} - 4 \frac{\rho \sigma_s^2 (m+1) T_s \rho \sigma_s^2 T_s}{\rho \sigma_s^2} \right\} \left( 1 - \frac{|m|}{M} \right)$$