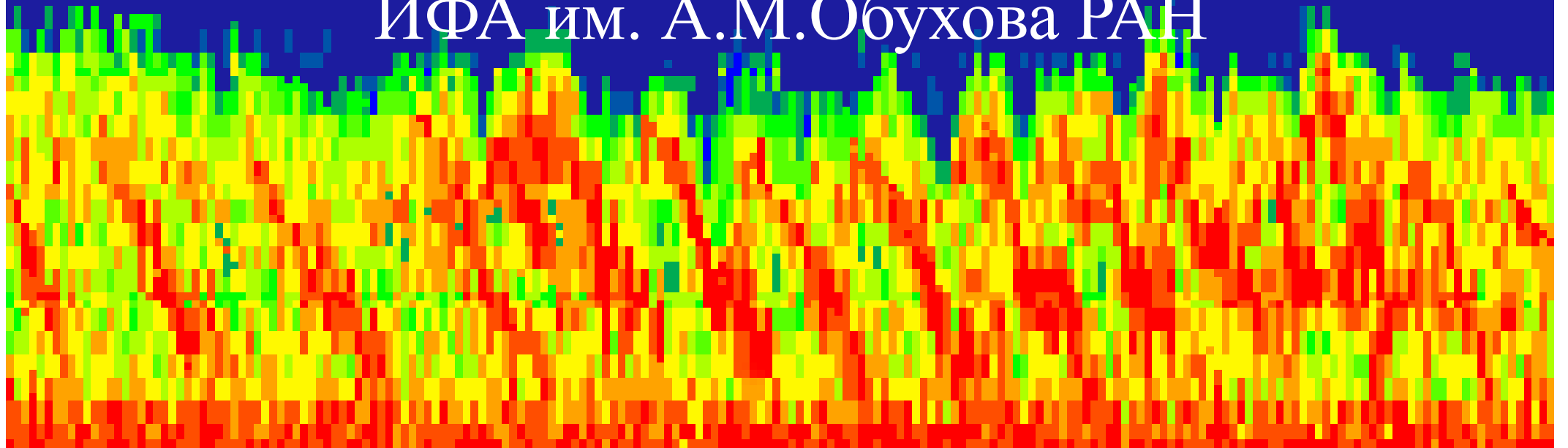


Слоистая структура средней атмосферы по данным акустического зондирования.

С.Н.Куличков, Ю.А. Митасов, И. П. Чунчужов,
С. П. Кшевецкий, М. Н. Закиров, О. Е. Попов,
В. Г. Перепелкин

ИФА им. А.М.Обухова РАН





В 80-х годах XX века академик А.М. Обухов - выдающийся ученый в области физики атмосферы высказал предположение, что земная атмосфера по своей структуре напоминает

"кочан капусты" с многочисленными слоями

Фильм «Загадки атмосферных вихрей» 1984 URL:

<https://youtu.be/90Usezl846g>

ТОНКАЯ НЕОДНОРОДНАЯ СТРУКТУРА СРЕДНЕЙ АТМОСФЕРЫ

♦ МОДЕЛИРОВАНИЕ – ГЕНЕРАЦИЯ ВНУТРЕННИМИ ГРАВИТАЦИОННЫМИ ВОЛНАМИ

Chunchuzov. I.P., On the high-wavenumber form of the Eulerian internal wave spectrum in the atmosphere. J. Atmosph.Sci.,2002, 59, 3. 1753-1772.

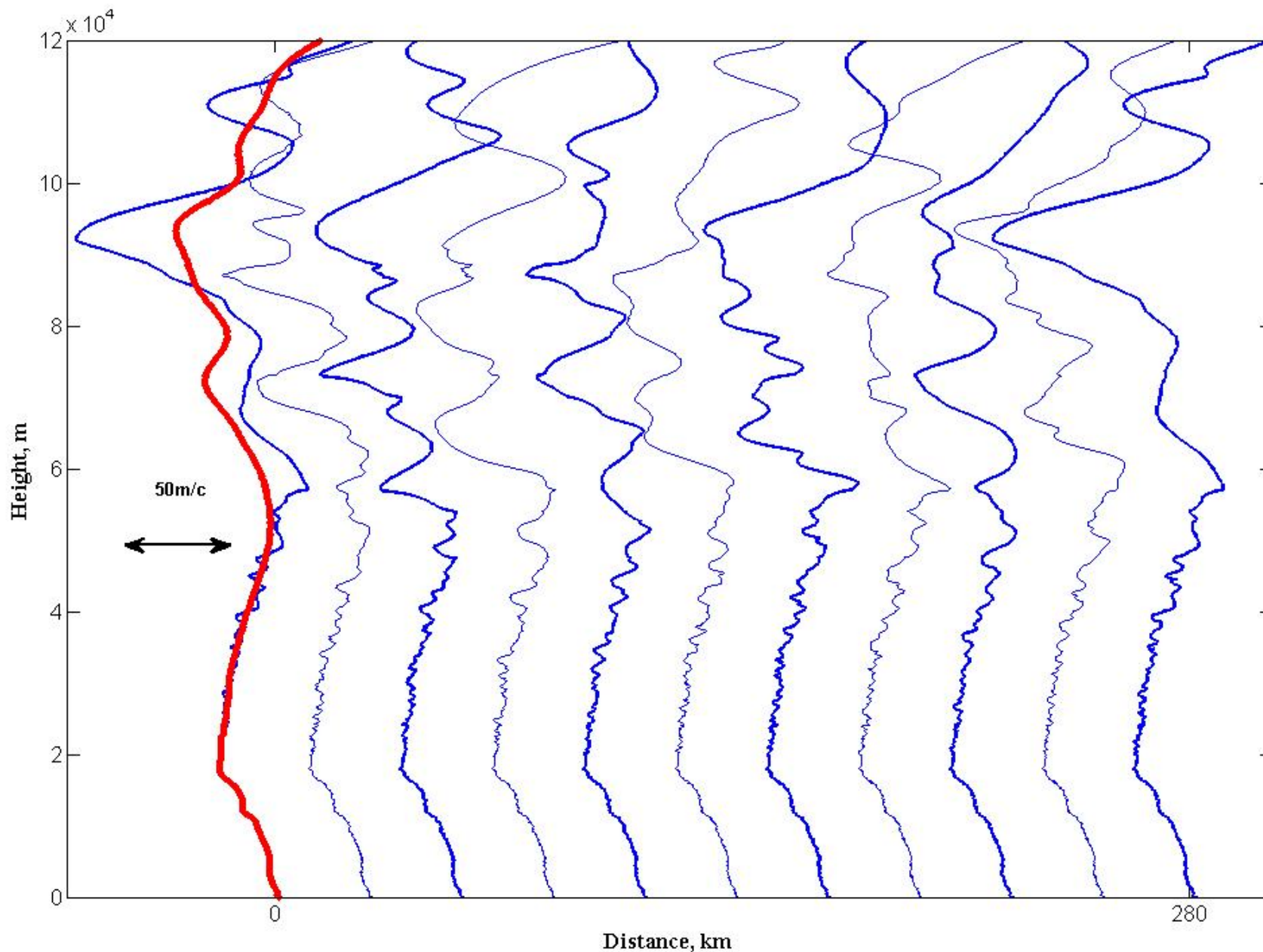
Куличков С.Н., Чунчuzов И.П., Попов О.И. Моделирование эффектов влияния тонкой неоднородной структуры атмосферы на дальнейшее распространение импульсных акустических сигналов. Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2010. Т.46. №1. С. 69-77.

♦ ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ – ГЕНЕРАЦИЯ ВГВ ОТ АТМОСФЕРНЫХ ФРОНТОВ

С. П. Кшевецкий, С. Н. Куличков. Влияние внутренних гравитационных волн от конвективных облаков на атмосферное давление и пространственное распределение возмущений температуры // Известия РАН. Физика атмосферы и океана, 2015, том 51, № 1, с. 52–59.

ПРИМЕР РАСЧЕТА ТОНКОЙ НЕОДНОРОДНОЙ СТРУКТУРЫ АТМОСФЕРЫ

- ♦ вертикальный размер неоднородностей $h \sim 10\text{ м} \dots 10\text{ км}$
- ♦ горизонтальный размер неоднородностей $\ell = n \times h$ ($n \sim 10-100$)
- ♦ профиль $g2s$ (красная линия)



С. П. Кшевецкий, С. Н. Куличков. Влияние внутренних гравитационных волн от конвективных облаков на атмосферное давление и пространственное распределение возмущений температуры // Известия РАН. Физика атмосферы и океана, 2015, том 51, № 1, с. 52–59.

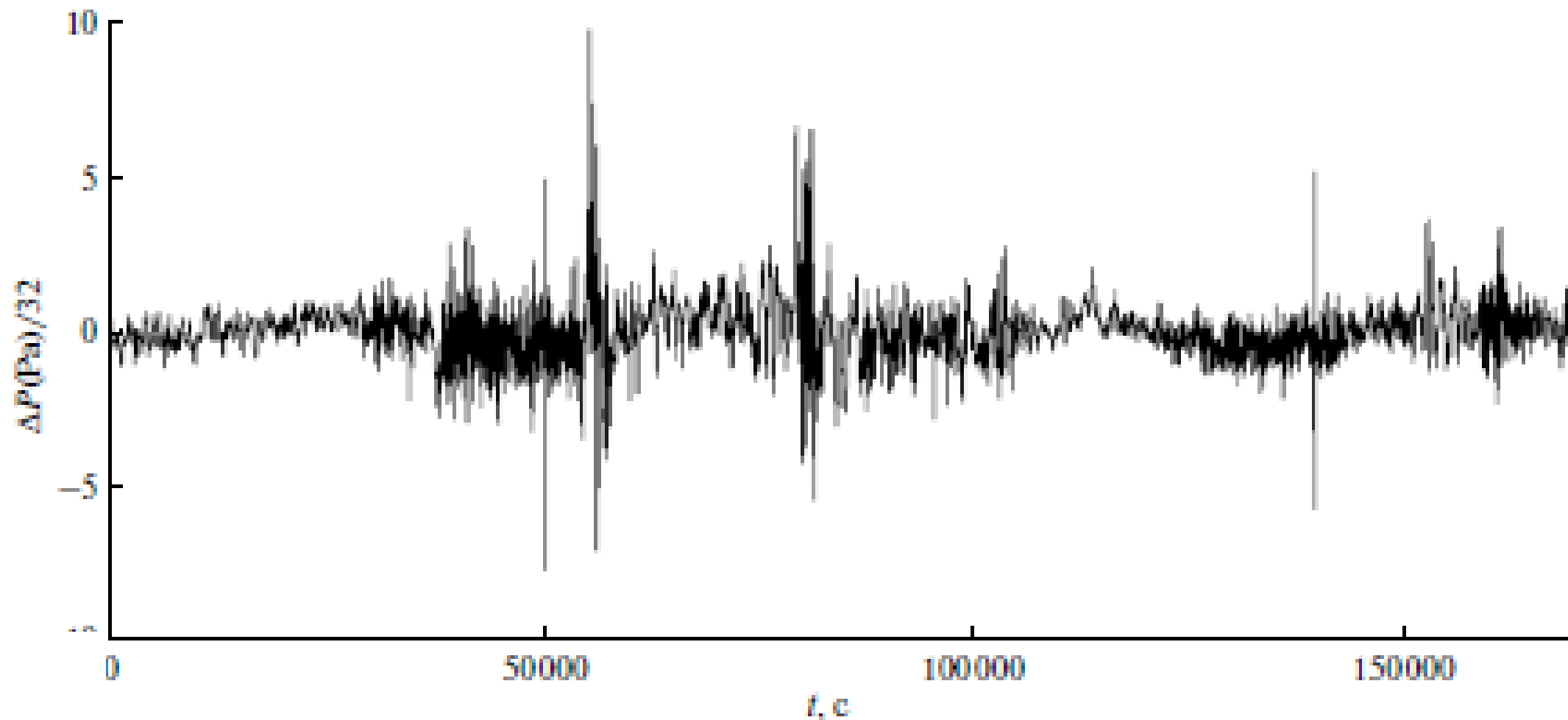


Рис. 1. Экспериментальные данные колебаний приземного давления ΔP 10–11 апреля, 2006 г. на инфразвуковой станции IS17 (6.7° N, 4.9° W).

С. П. Кшевецкий, С. Н. Куличков.
Влияние внутренних
гравитационных волн от
конвективных облаков на
атмосферное
давление и пространственное
распределение возмущений
температуры // Известия РАН.
Физика атмосферы и океана,
2015, том 51, № 1,
с. 52–59.

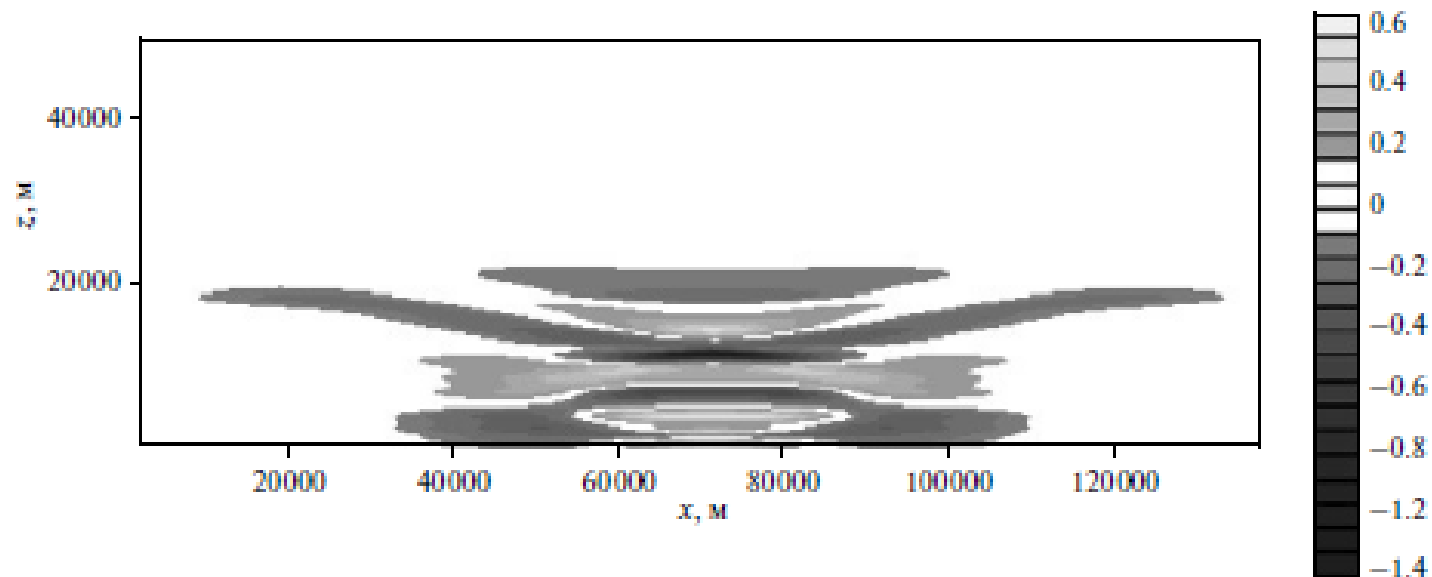


Рис. 5. Зависимость волновой добавки к температуре от координат для $t = 1890$ с. Вертикальное распространение волн от теплового источника [12].

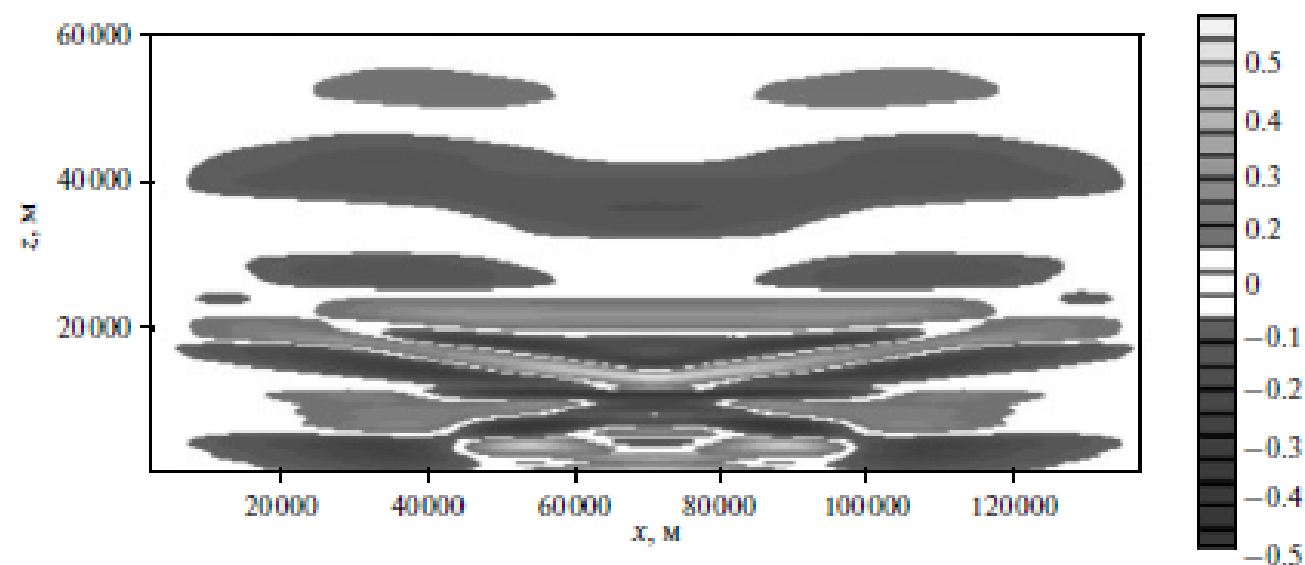
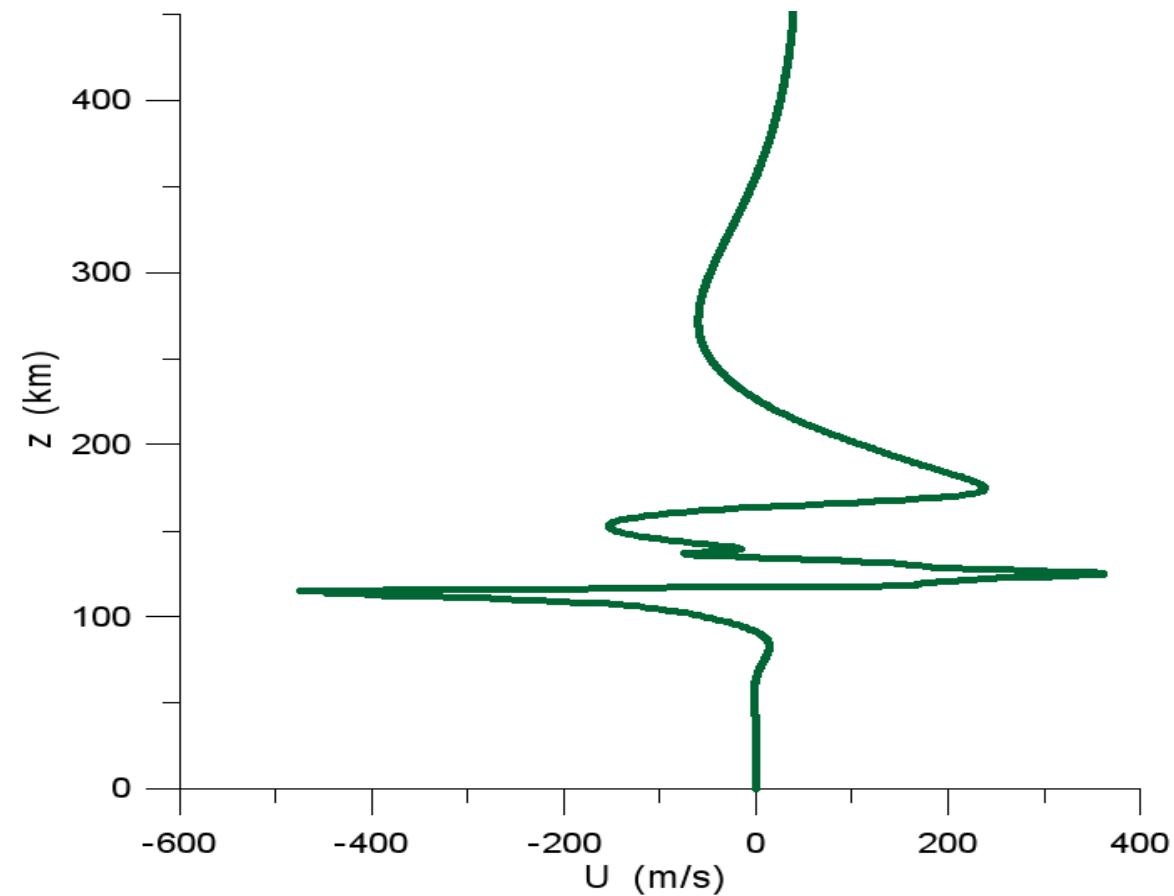
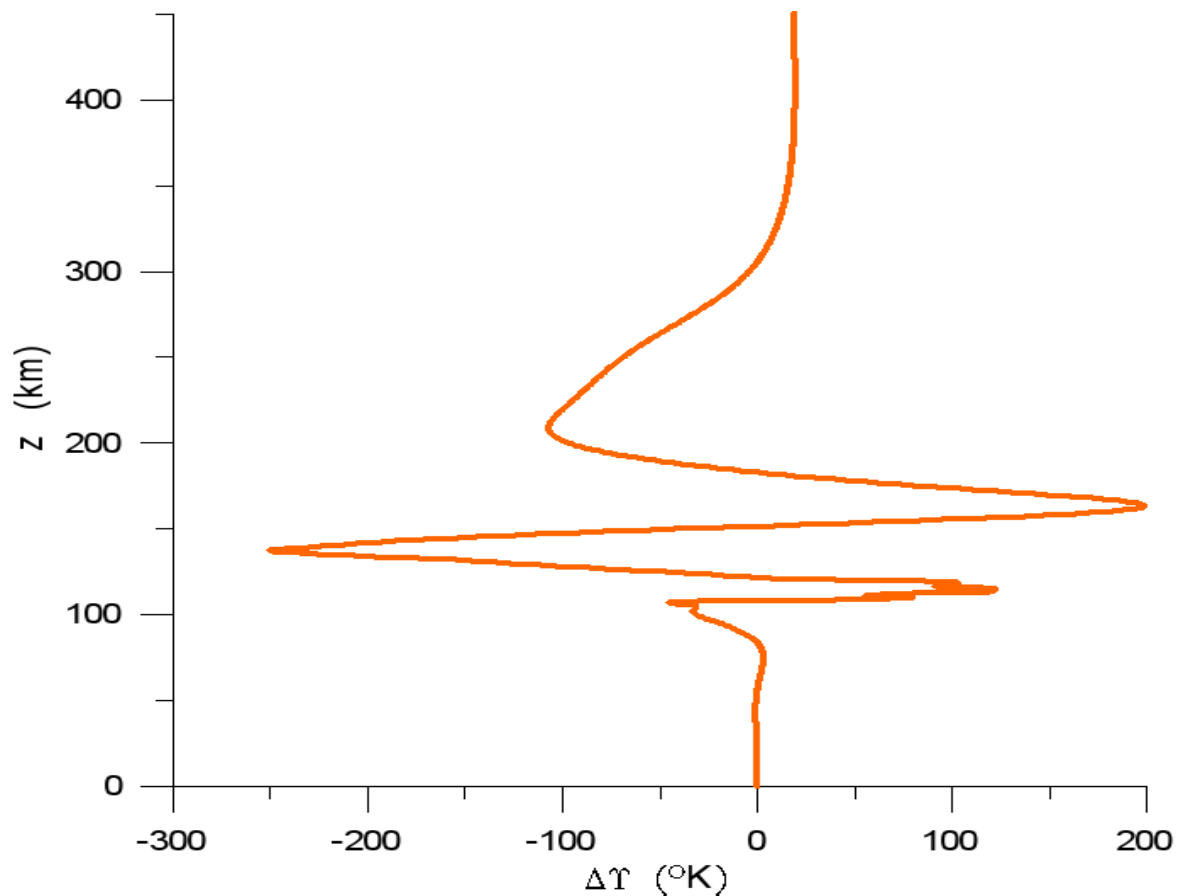


Рис. 6. Зависимость волновой добавки к температуре от координат для $t = 2710$ с. Вертикальное распространение волн от теплового источника [12].

На рисунках изображены вертикальные профили для возмущения температуры и для горизонтальной скорости для $t=5$ мин.12.сек; $x=911$ км.



ПРОФИЛИ ТЕМПЕРАТУРЫ, ПОЛУЧЕННЫЕ ПРИ РАКЕТНОМ ЗОНДИРОВАНИИ АТМОСФЕРЫ ПРИ ПОМОЩИ РАКЕТ MR-12 В РАЙОНЕ г. ВОЛГОГРАДА В РАЗЛИЧНЫЕ ГОДЫ

Бюллетень результатов
зондирования верхней
атмосферы с помощью
ракет MR -12,
п. Волгоград, о. Хейса
1980-1982. М.:
Гидрометеоиздат, 1983. 28
с.

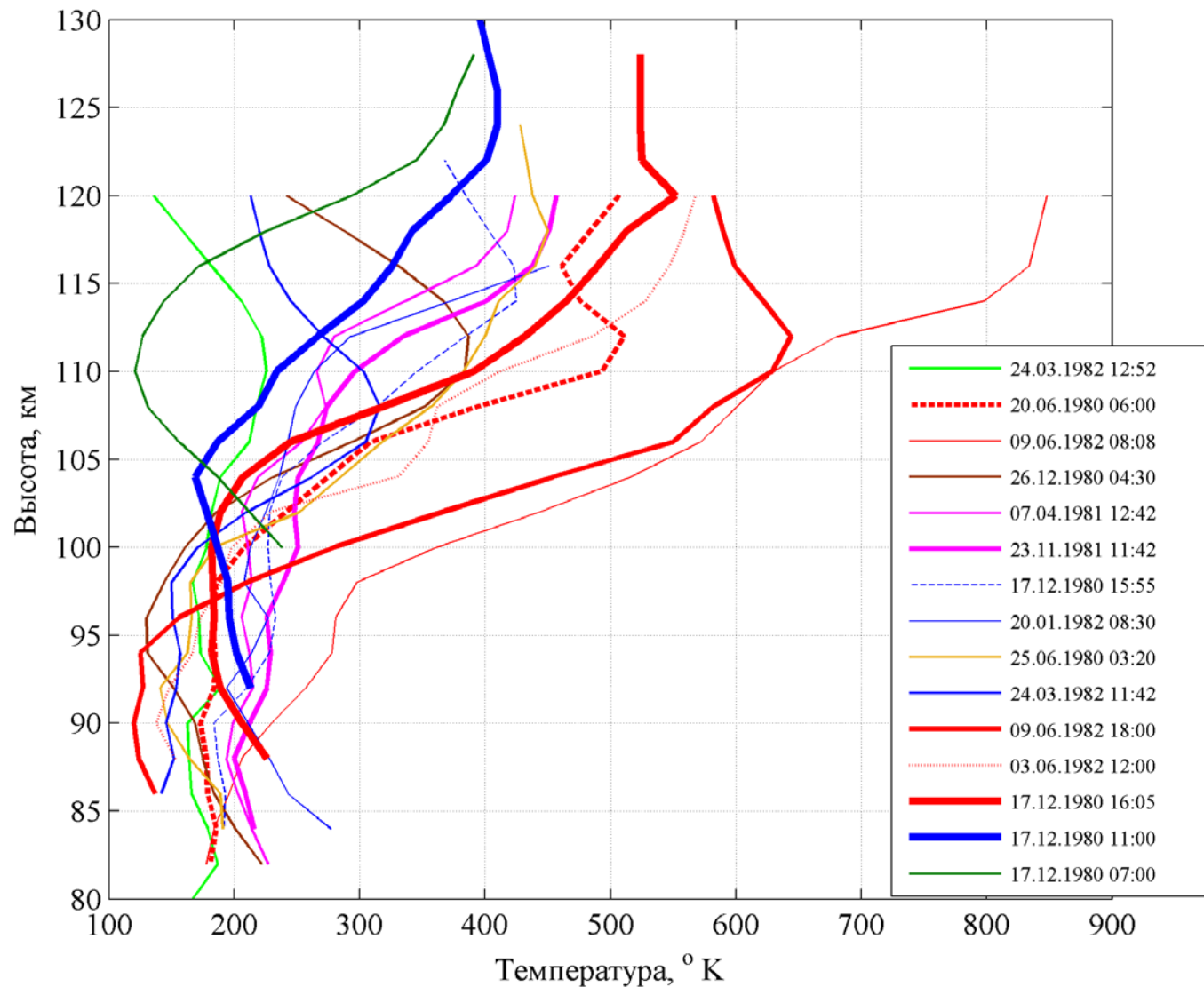
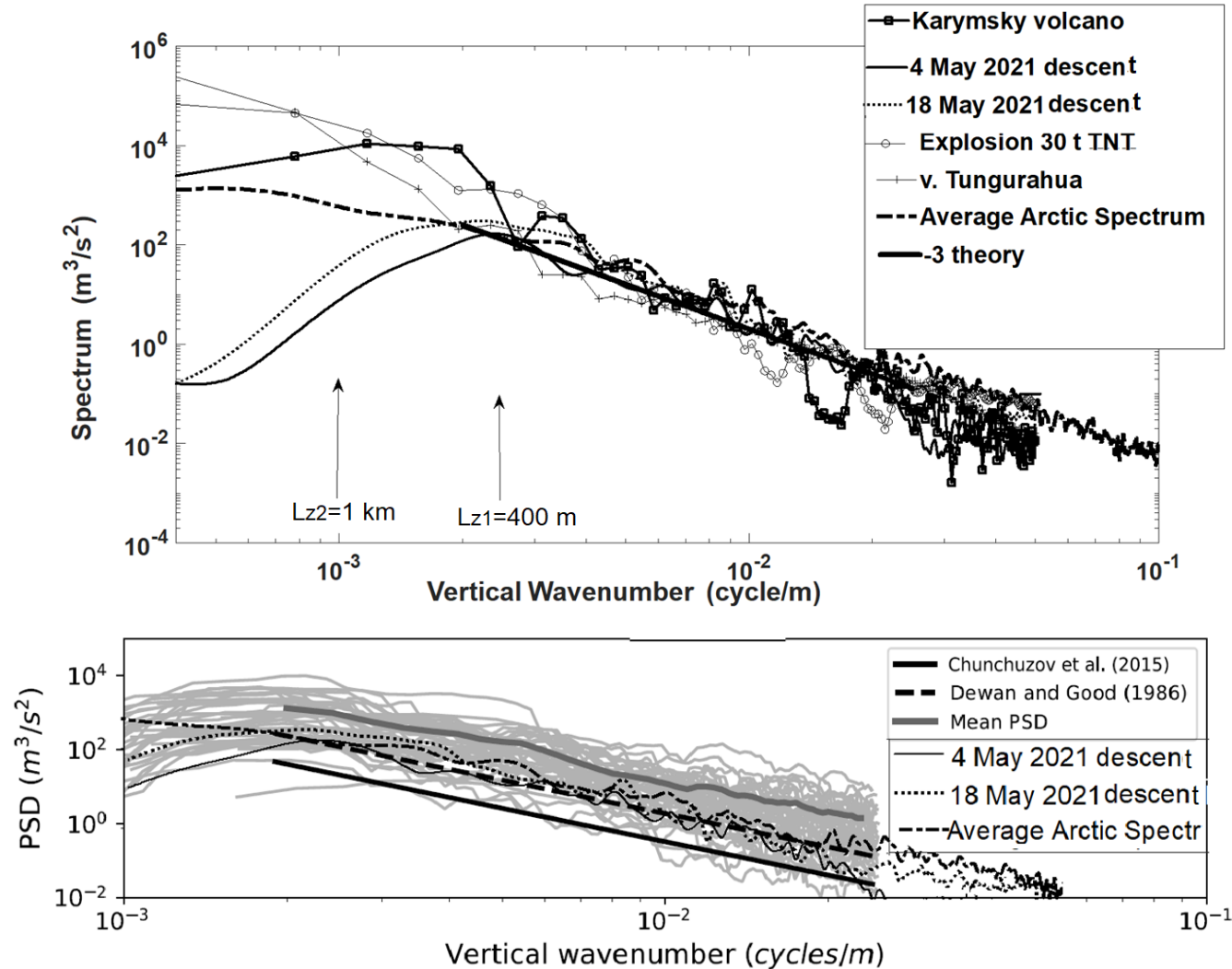
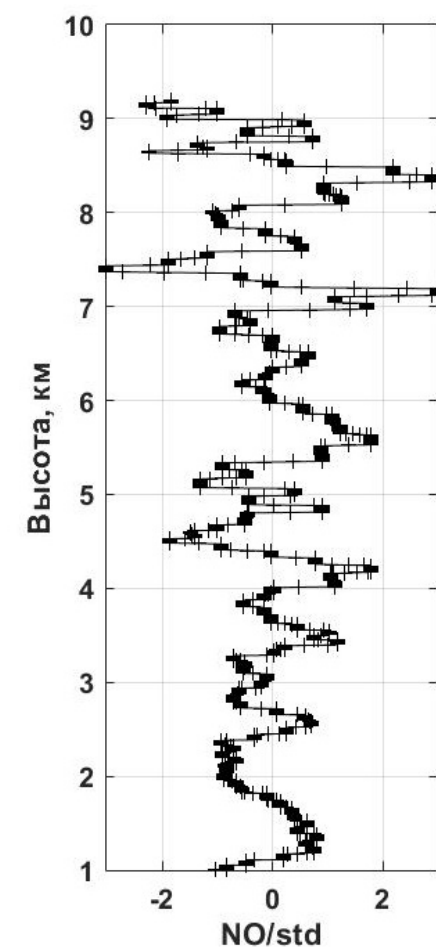
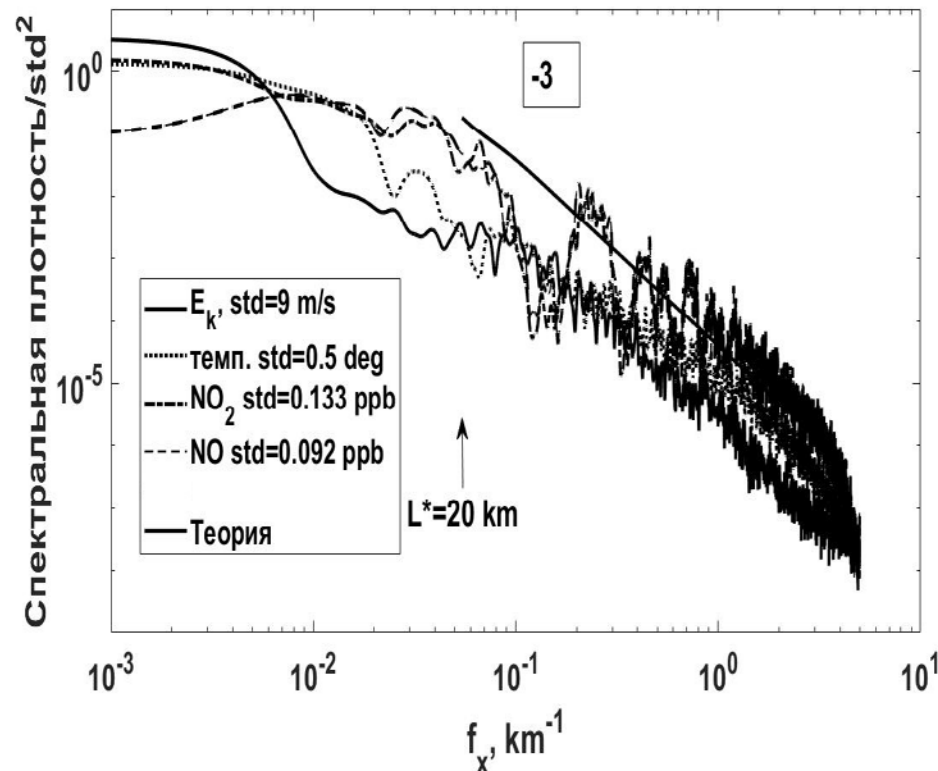
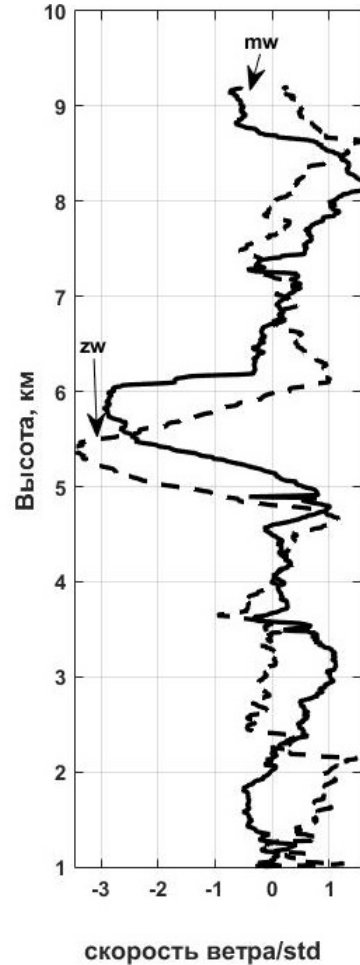




Фото старта ракеты-носителя среднего класса «СОЮЗ-2.16» с космическим аппаратом «Глонас-К».Плесецк, 10 октября 2022 года в 5:52 мск. (фото снято под Новгородом).

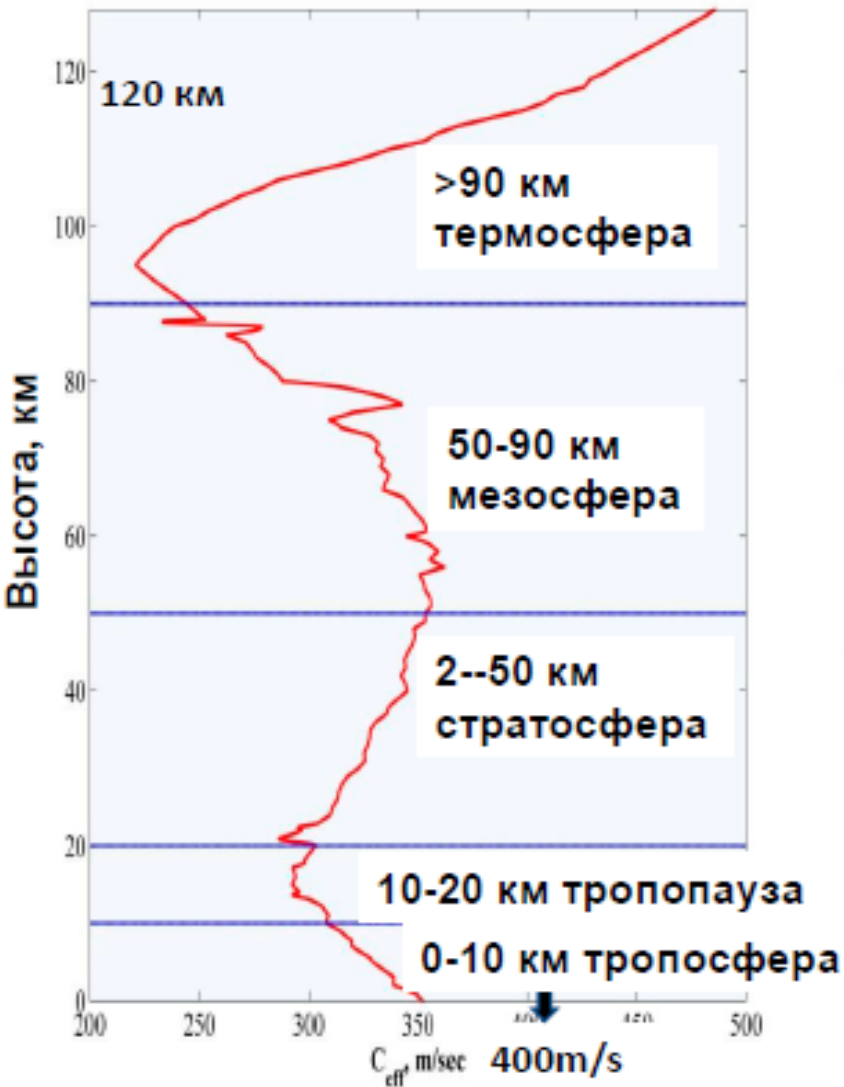


Вверху: Вертикальные спектры флуктуаций горизонтальной скорости ветра в стратосфере, восстановленных по данным инфразвукового зондирования, и наклонные спектры, полученные по подъемам и спускам самолета TU 134 (Average Arctic Spectrum) и пассажирских самолетов. Внизу: Наклонные спектры в тропосфере и вертикальные спектры(PSD) (Vorobeva et al. 2023, JGR, 2023. V.128 (13)) для восстановленных флуктуаций в стратосфере, их средний спектр (темно-серая линия) и теоретические спектры из моделей (Dewan and Good 1986, JGR, V.91) и (Chunchuzov et al. 2015, *J. Acoust. Soc. Am.* V. 137).



Chunchuzov I., O. Chkhetiani, S. Kulichkov, O. Popov, B. Belan, A. Fofonov, G. Ivlev, A. Kozlov. (2023). J. Atm, Sci., 81, 105-124.

Вертикальный профиль зональной (zw) и меридиональной (mw) скоростей ветра, нормированные на величину среднеквадратичного значения ($\text{std mw} = 2,6 \text{ м/сек}$) – левая панель; горизонтальные спектры флуктуаций горизонтальной скорости ветра E_k , температуры (темп.) и концентраций газов NO_2 и NO , полученные для горизонтальной трассы самолета на высоте около 9.5 км и нормированные на соответствующие дисперсии этих флуктуаций. Жирная наклонная линия соответствует теоретическому спектру, имеющему участок с наклоном -3 на масштабах менее характерного масштаба флуктуаций L^* – средняя панель; флуктуации окиси азота NO – правая панель.



♦ **Активные исследования
(конец 19-го - 50-е годы 20-го века)**

Средние профили температуры и ветра в стратосфере

♦ **Инфразвуковой мониторинг ядерных взрывов
(50-80-е годы 20-го века)**

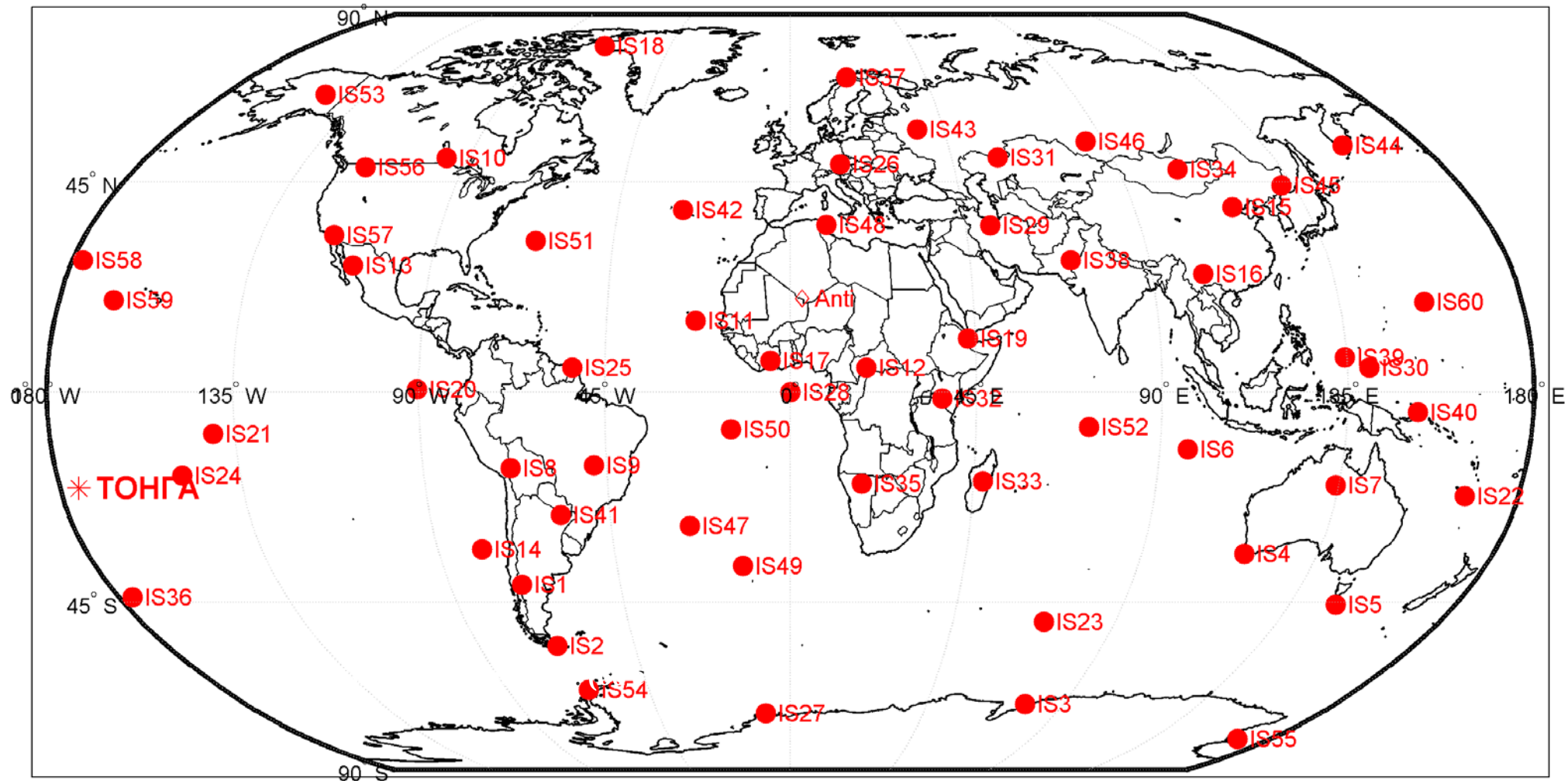
Созданы сети инфразвуковых станций

♦ **Создание сети инфразвукового мониторинга
Договора о Всеобъемлющем Запрещении Ядерных
Испытаний (ДВЗЯИ-СТВТО) - 90-е годы 20-го века – н.в.**

*Возрождение акустического метода зондирования
средней атмосферы*

♦ **Исследование тонкой структуры атмосферы на основе
теории дальнего распространения звука в слоистой
атмосфере.**

**Распределение по Земному шару инфразвуковых станций
международной системы мониторинга (International Monitoring System - ISM).**



Проведены систематические эксперименты и разработаны методы определения параметров анизотропной структуры атмосферы по данным регистрации акустических волн от импульсных источников - детонационный генератор, взрывы, извержения вулканов (в слышимом и инфразвуковом диапазонах частот).

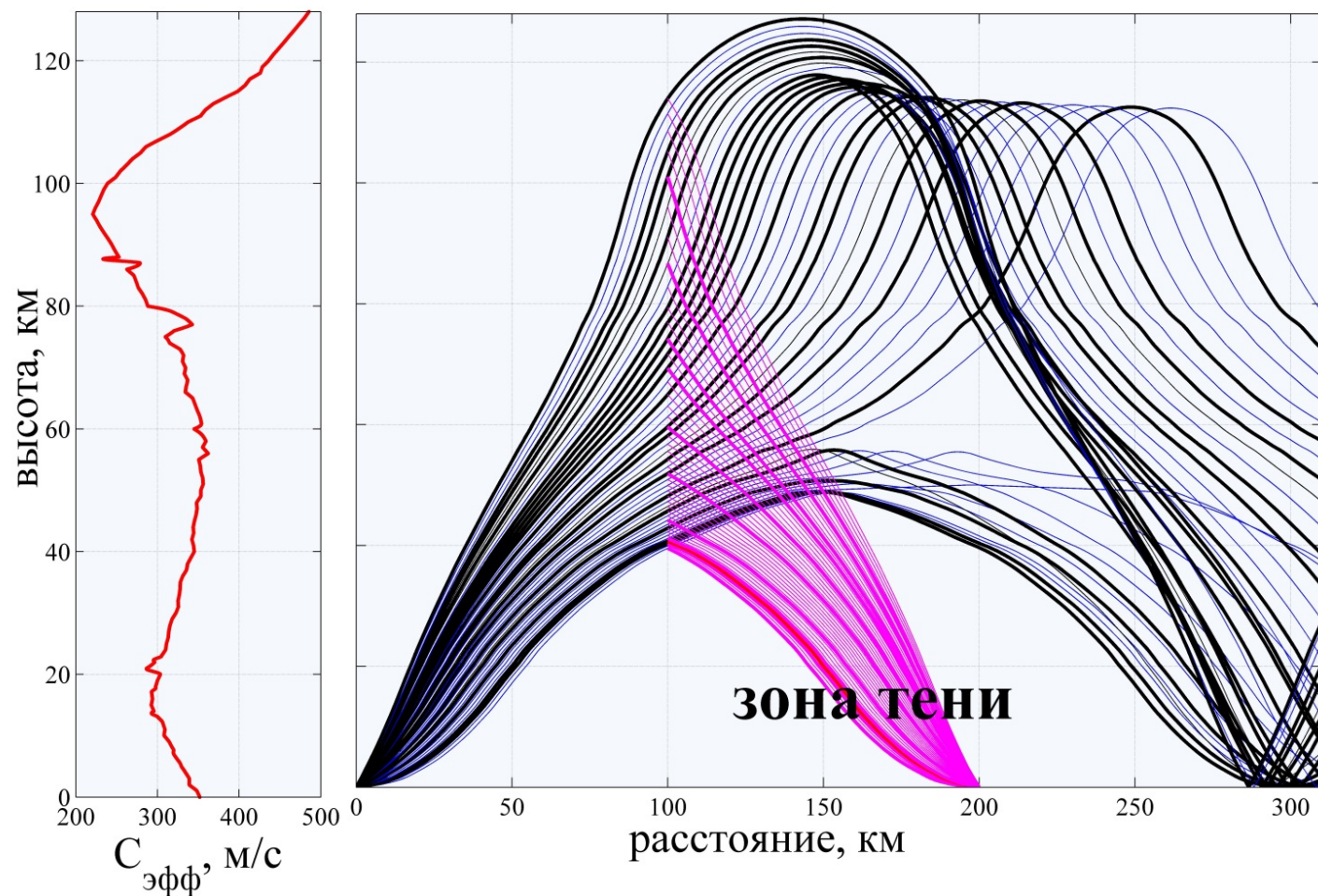


Схема акустического зондирования анизотропной структуры атмосферы.

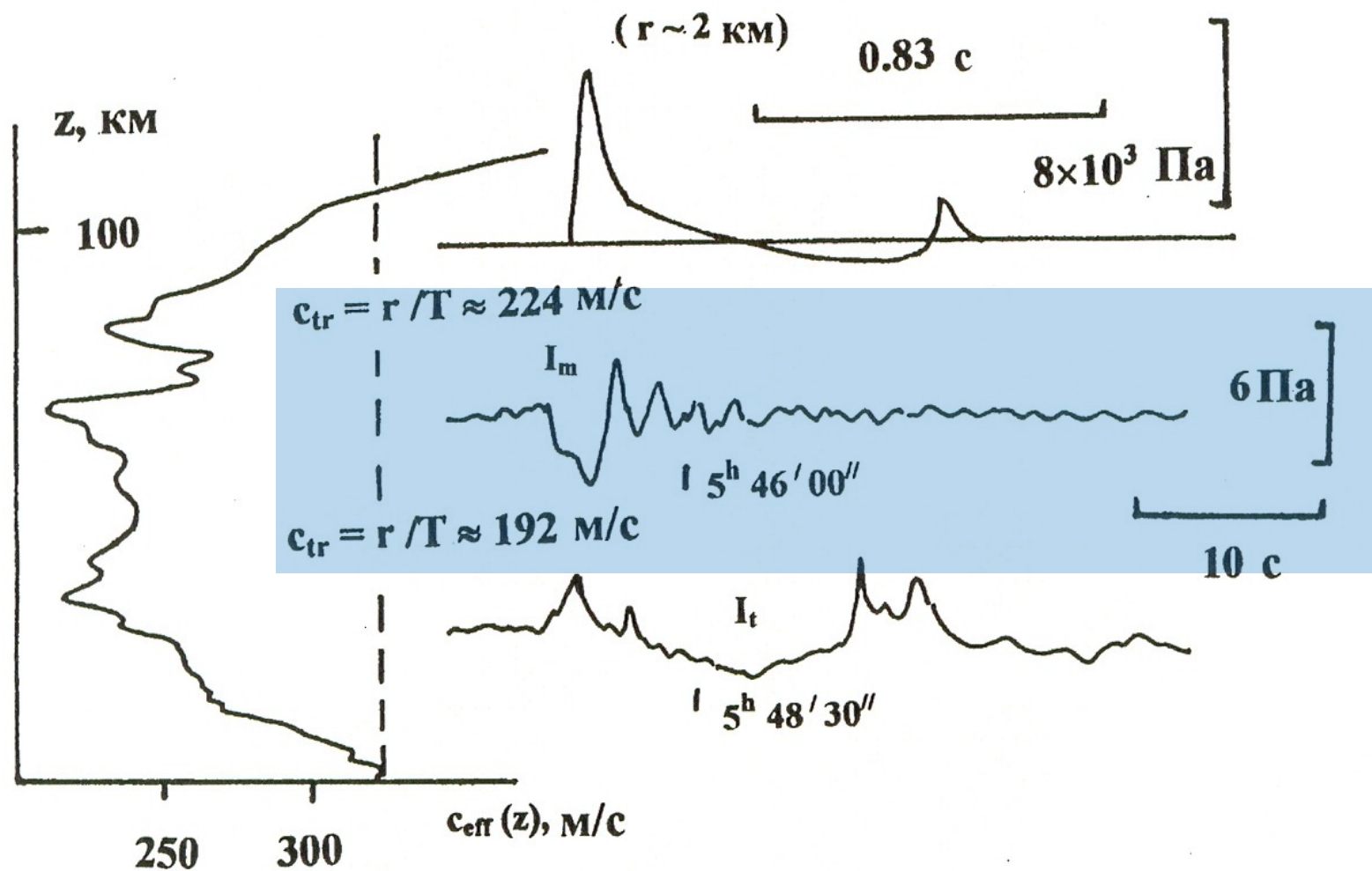
Для восстановления вертикальных профилей неоднородных структур использовалось 2 метода.

Первый метод основан на взаимосвязи спектров регистрируемого сигнала и анизотропных структур в атмосфере

Впервые, обнаружено рассеяние инфразвука на тонкой слоистой структуре средней атмосферы

(Доклады АН СССР. 1983. Т.269. №3. С.573-578.)

Взрыв 260 тонн Эксперимент МАССА



24

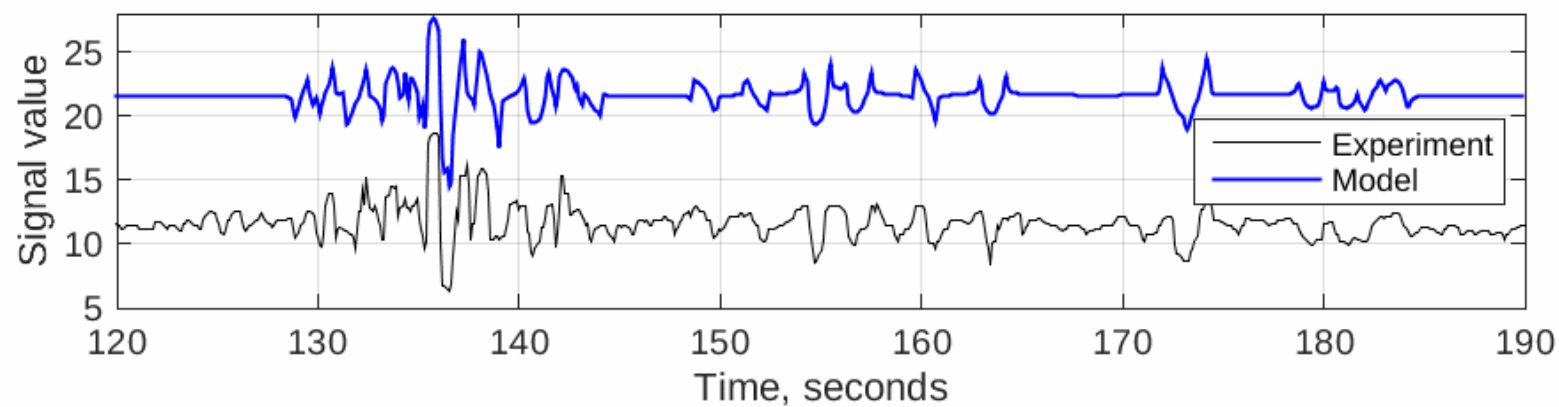
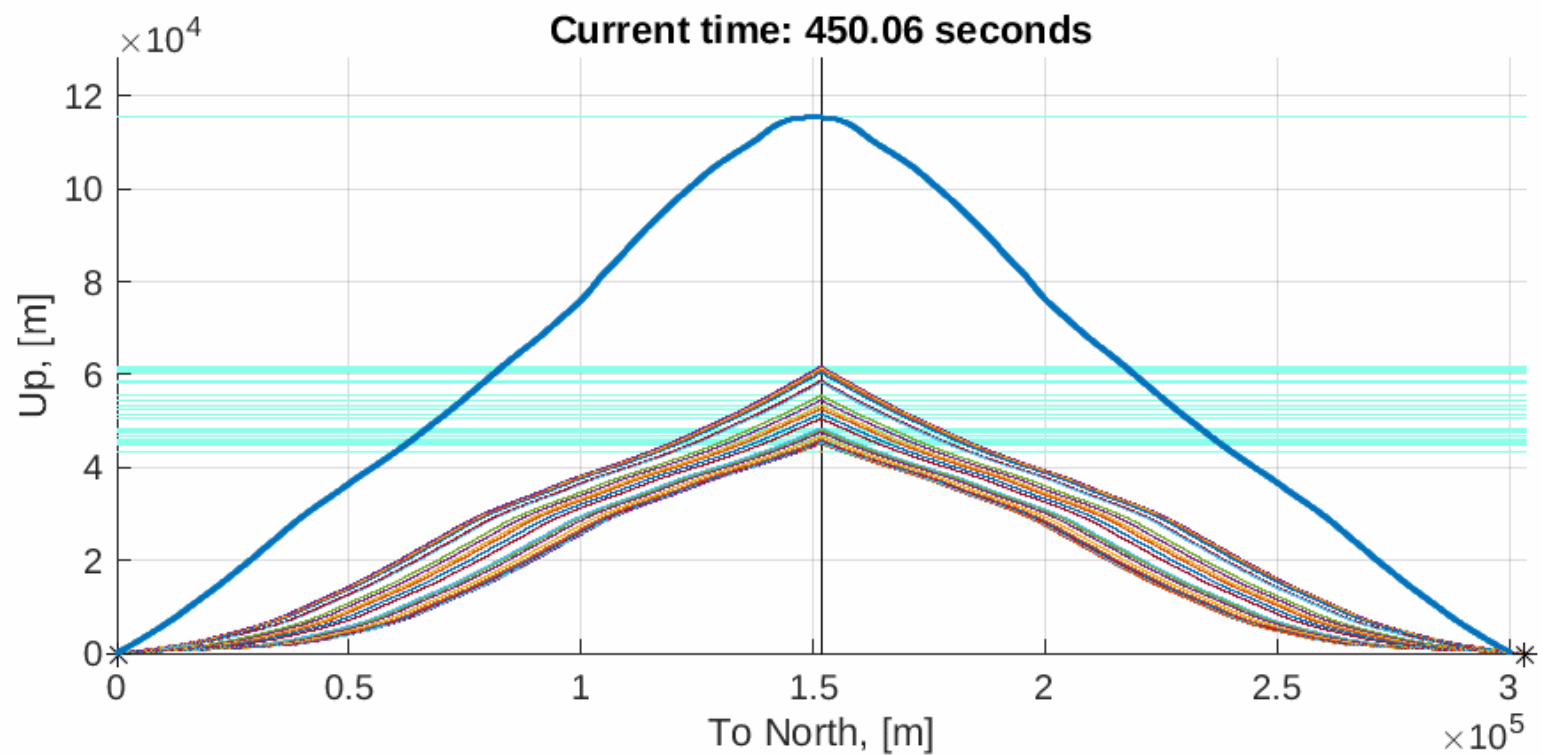
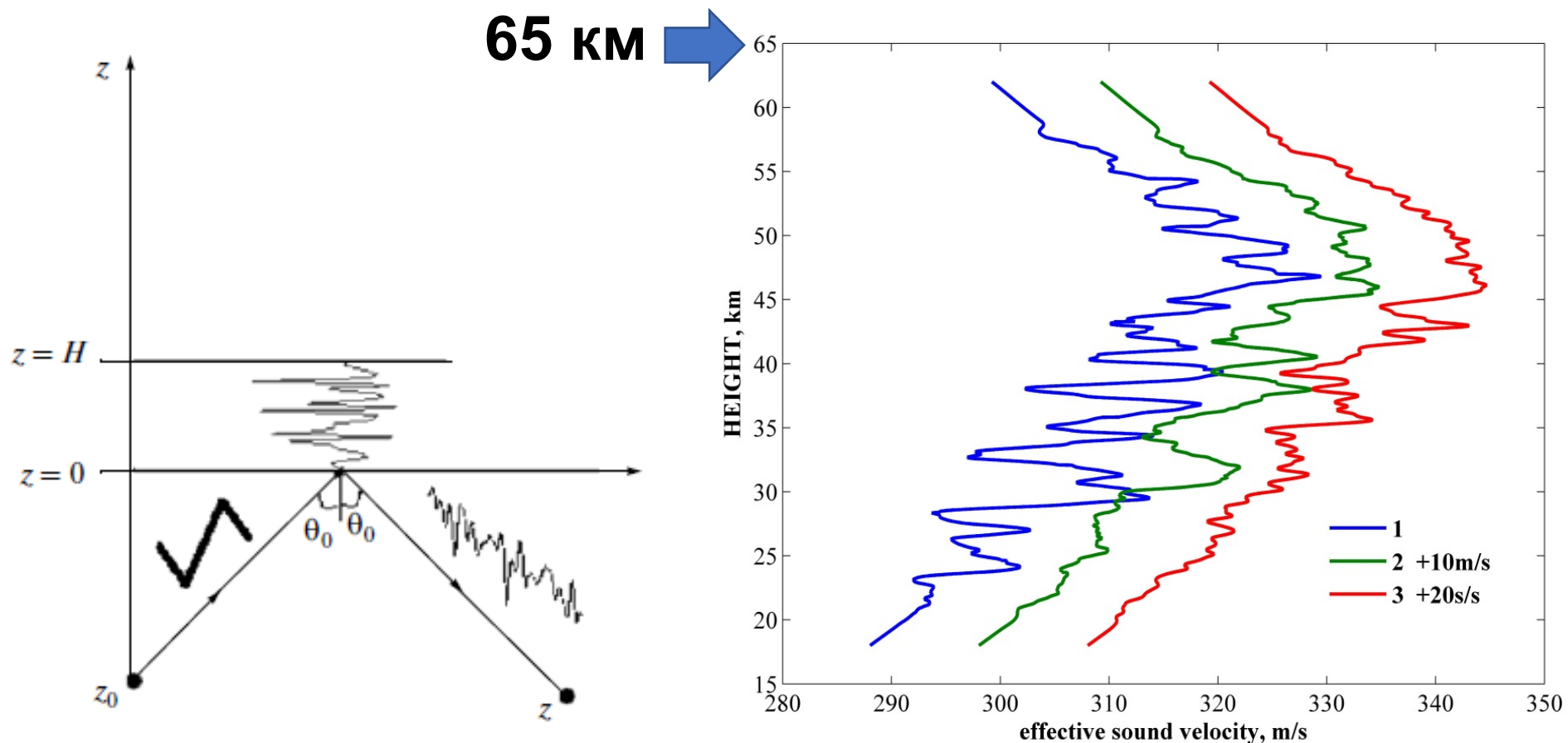


Схема падения акустической **N** волны от точечного источника в точке **z_0** на неоднородный движущийся слой **$0 \leq z \leq H_0$** с флуктуациями эффективного показателя преломления.

Пример восстановления стратосферных флуктуаций (20-65 км) по данным регистрации инфразвука от взрыва вулкана в Эквадоре (251 км)



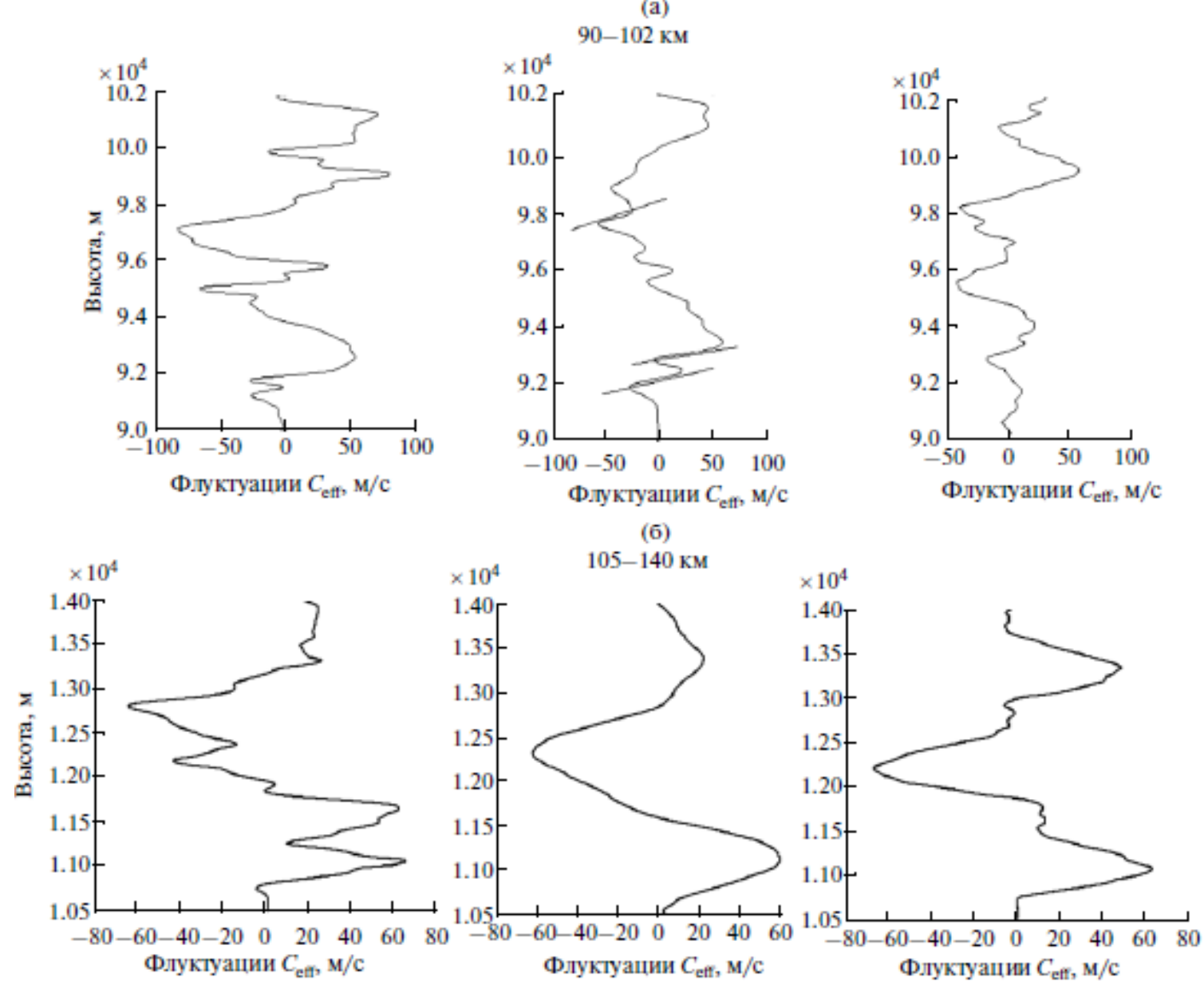
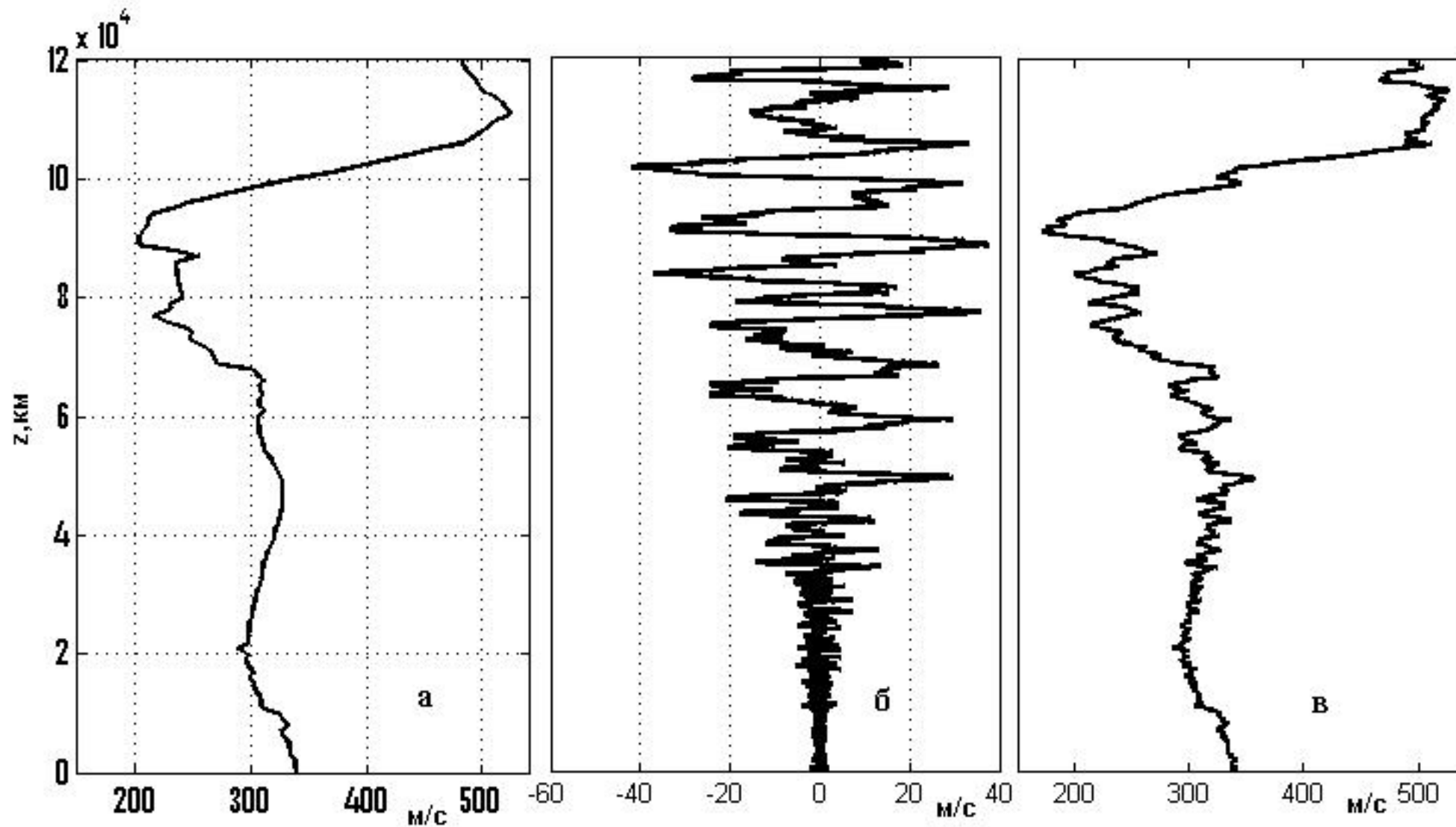


Рис. 10. Вертикальные профили флуктуаций $\Delta C_{\text{eff}}(z)$ в нижней термосфере, восстановленные в диапазонах высот 90–102 км (а) и 105–140 км (б). Наклонными отрезками указаны слои атмосферы с экстремально большими вертикальными градиентами скорости ветра (более 1 м/с на 10 м).

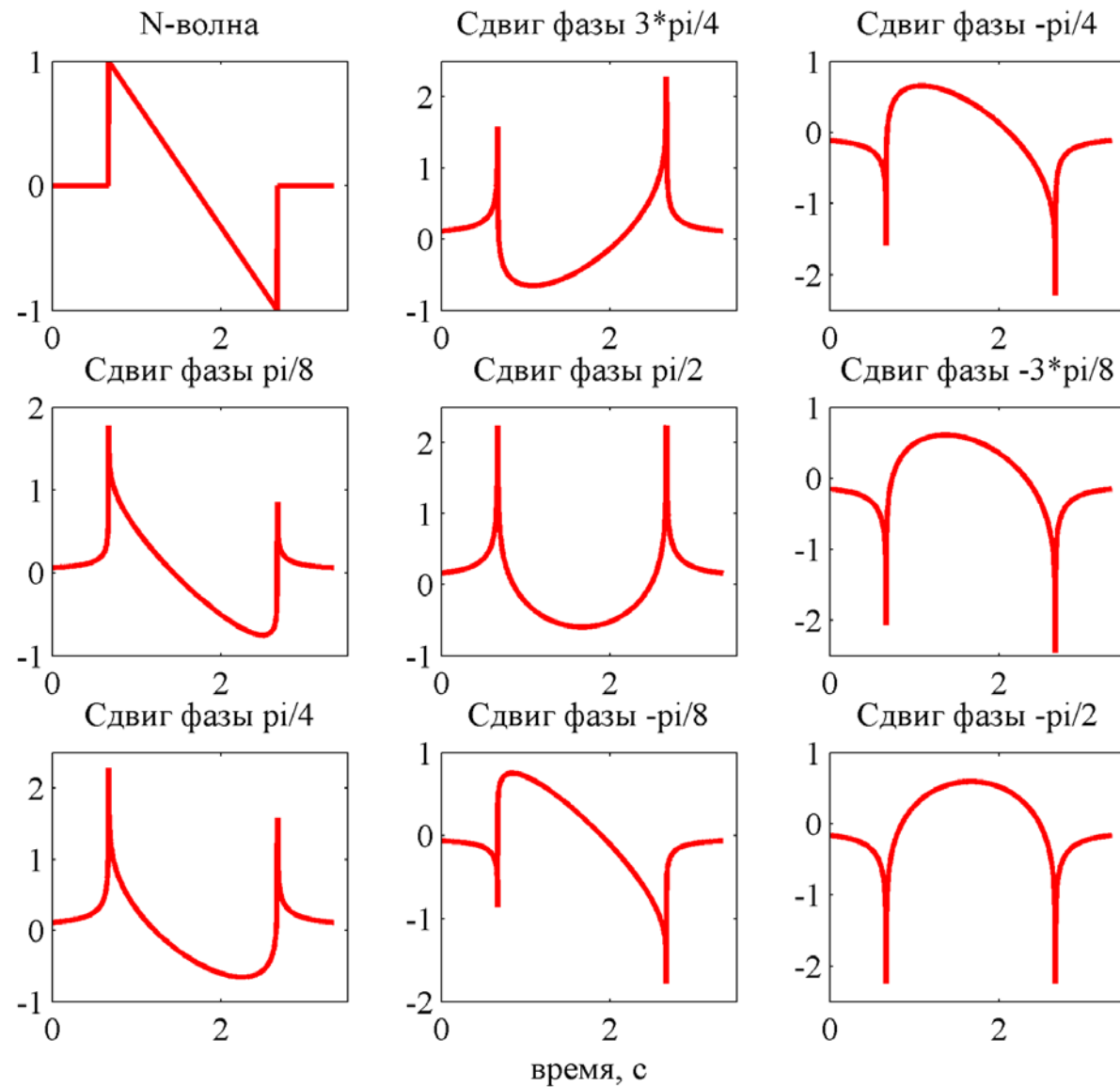
Вертикальный профиль скорости звука + тонкая структура



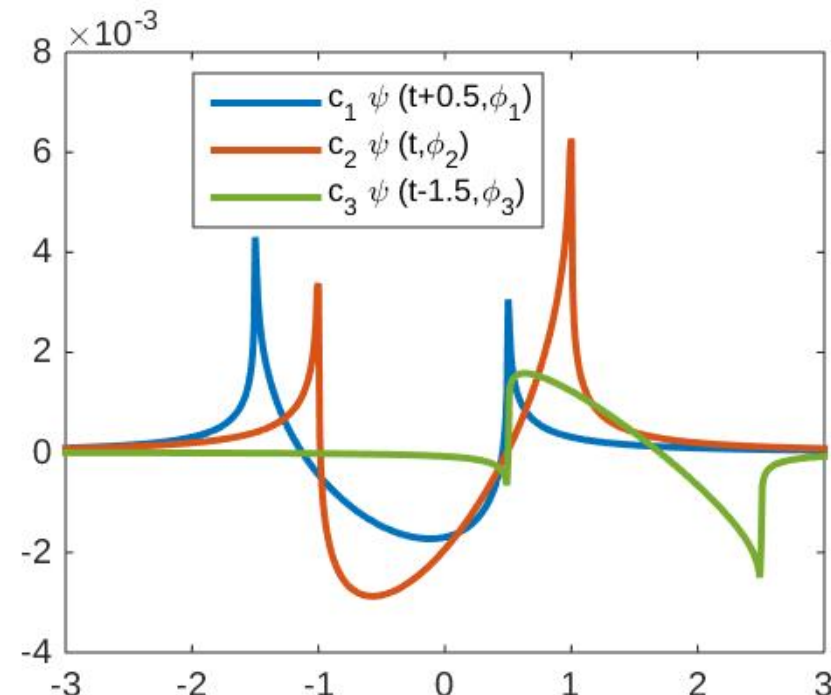
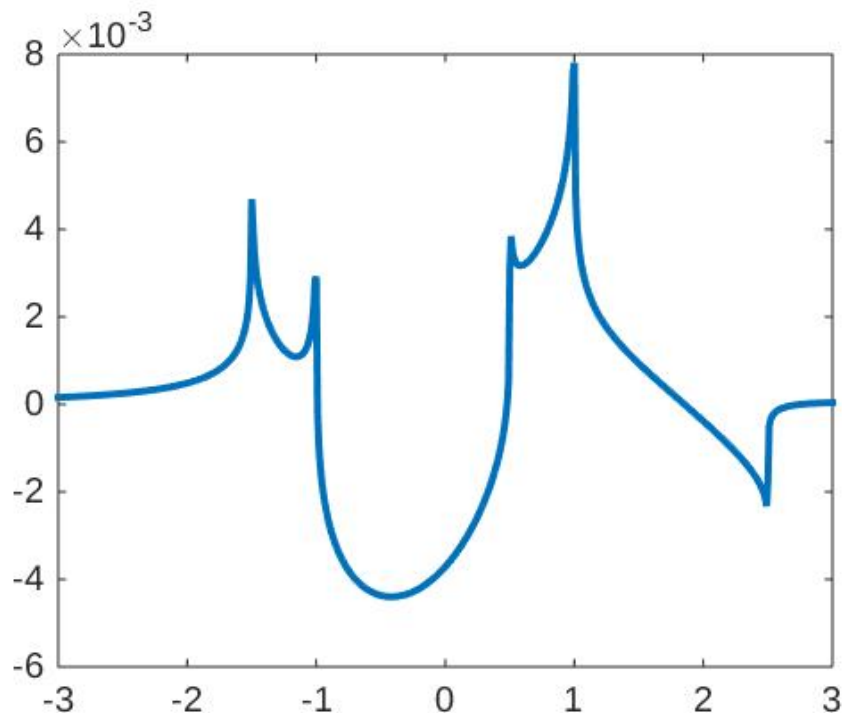
Вторым методом был метод разложения (декомпозиции)
регистрируемого продолжительного акустического
сигнала на отдельные его составляющие в виде
импульсов

N и U – волн,

соответствующих различным
высотам частичного отражения от неоднородностей и
приходящих в пункт наблюдений с различными
интервалами времени



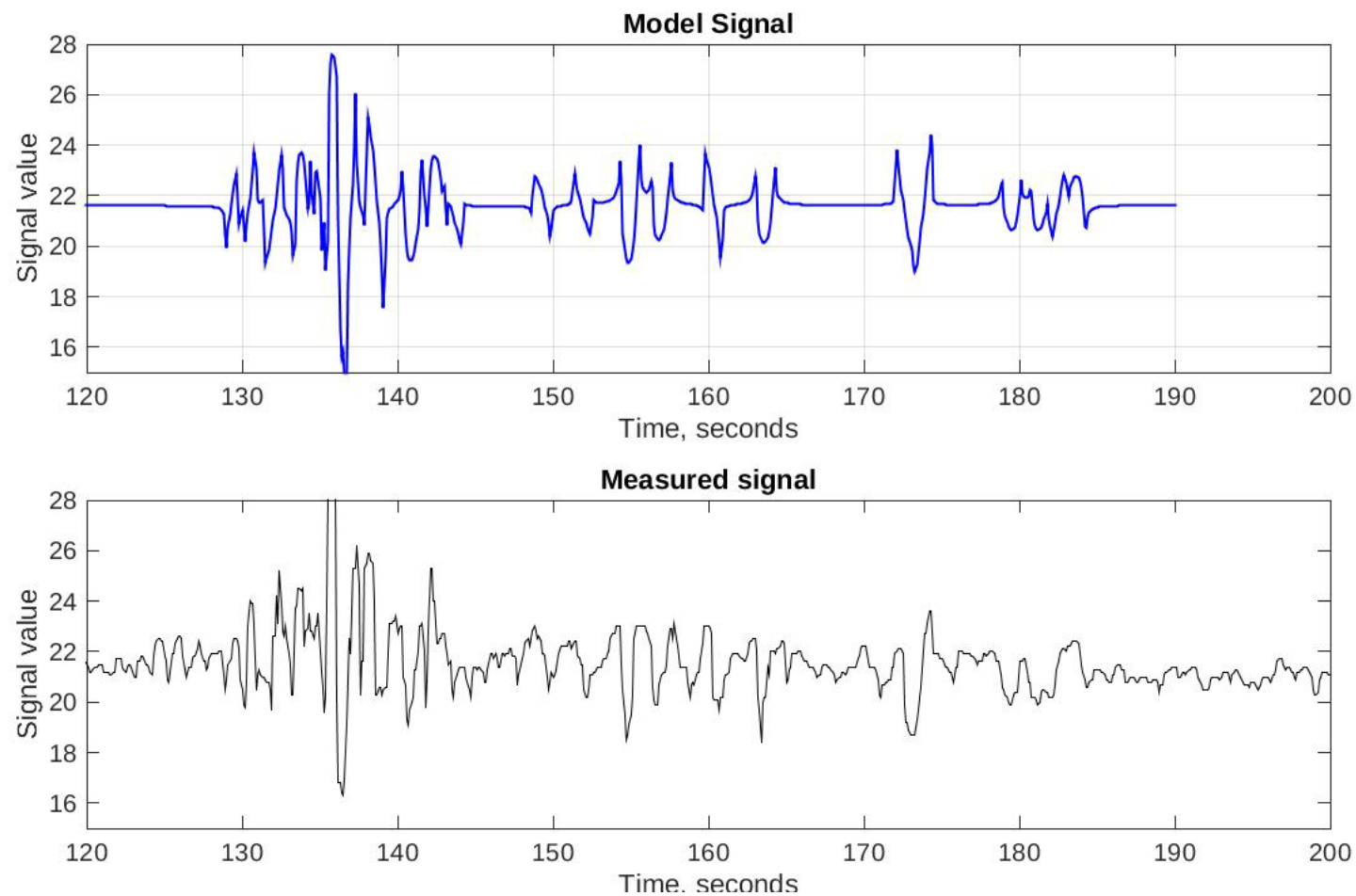
Пример трансформации формы акустического сигнала N при различных значениях фазы коэффициента частичного отражения импульса от неоднородных слоев в атмосфере.



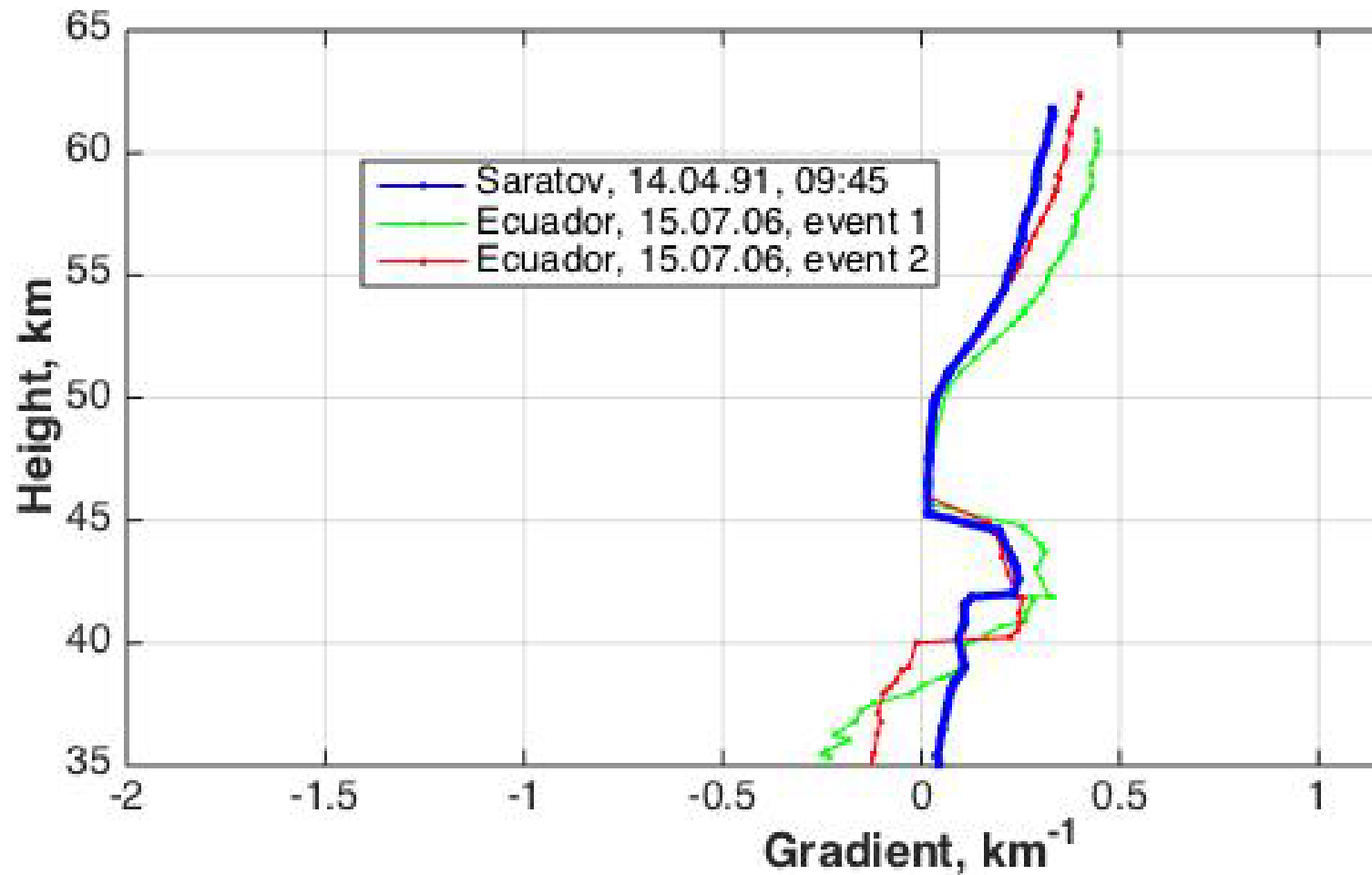
МОДЕЛЬ СИГНАЛА (суперпозиция N и U – волн)

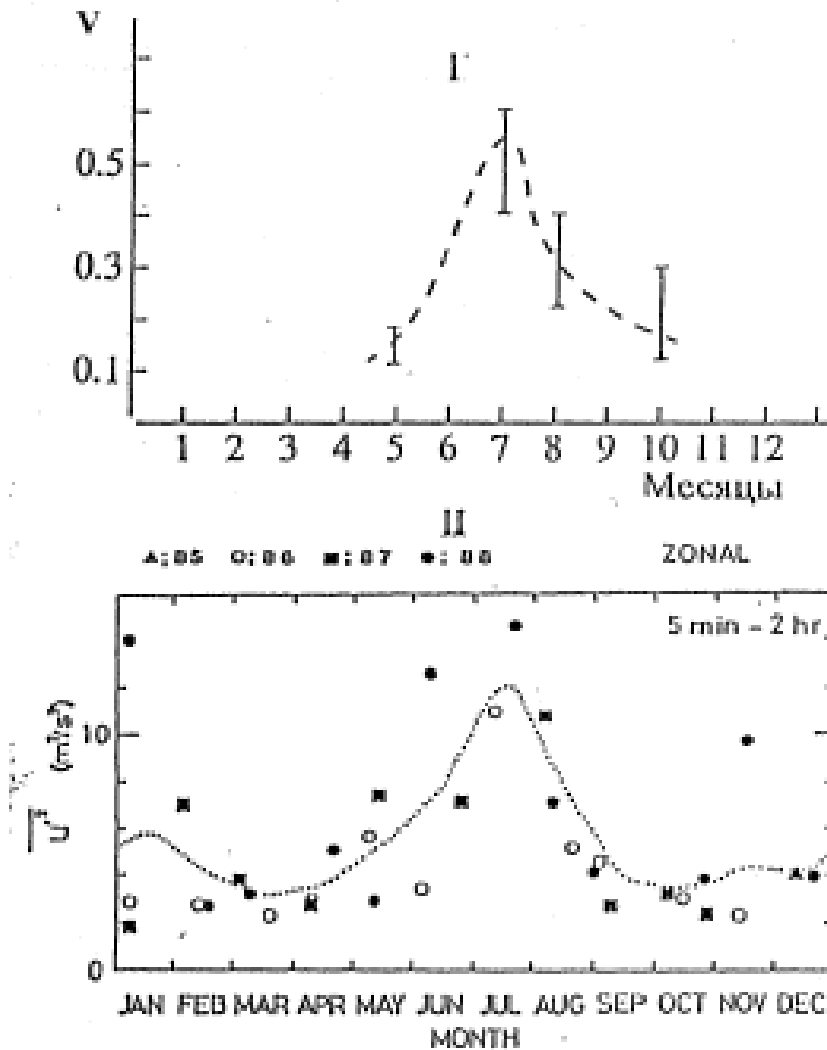
M.N. Zakirov, S.N. Kulichkov, A.I.Chulichkov, I.P. Chunchuzov, O.Ye.Popov, A.A.Mishenin, G.A.Bush, N.D. Tsybulskaya and E.V. Golikova. Acoustic probing of the anisotropic structure of the atmosphere // Doklady Earth Sciences, 2023, Vol.511, Part 1, pp.595-600.

СРАВНЕНИЕ данных измерений 14.04.91 и результатов моделирования



ВЕРТИКАЛЬНЫЕ ГРАДИЕНТЫ, ОПРЕДЕЛЕННЫЕ ИЗ ДАННЫХ РЕГИСТРАЦИИ
ИНФРАЗВУКА В РОССИИ (взрыв) И ЭКВАДОРЕ (извержения вулкана)





32. Murayama et al. Seasonal variation of gravity wave activity in the middle atmosphere observed with the MU radar // Proceed. International Symposium on Middle atmosphere study. Kyoto, Japan. 1994. P. 24-25.

ЗНАЧЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ЧАСТИЧНОГО ОТРАЖЕНИЯ ИНФРАЗВУКОВЫХ ИМПУЛЬСОВ ОТ НЕОДНОРОДНЫХ СТРУКТУР АКУСТИЧЕСКОГО ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ В СРЕДНЕЙ АТМОСФЕРЕ В РАЗЛИЧНЫЕ МЕСЯЦЫ ГОДА ПО ДАННЫМ НАШИХ ИЗМЕРЕНИЙ – I И ПО ДАННЫМ ЗОНДИРОВАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МУ РАДАРА - II

**К ВОПРОСУ
О СТАБИЛЬНОСТИ ВОЛНОВЫХ
ПРОФИЛЕЙ РЕГИСТРИРУЕМЫХ
СИГНАЛОВ ОТ ОДНОТИПНЫХ
ВЗРЫВОВ В ОДНОЙ И ТОЙ ЖЕ
ОБЛАСТИ НА ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ**

УСТОЙЧИВОСТЬ ВО ВРЕМЕНИ АКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ, ОТРАЖЕННЫХ ОТ СЛОЯ РЕЗКОГО СДВИГА ВЕТРА “wind corner” ($H \sim 70$ km)

♦ ВЗРЫВЫ, $E=20-70$ t tnt (Kulichkov, et al, 2002) – слева

♦ ВУЛКАН В ЭКВАДОРЕ (Assink et al IGR VOL 117 2012, Assink et al IGR – справа)

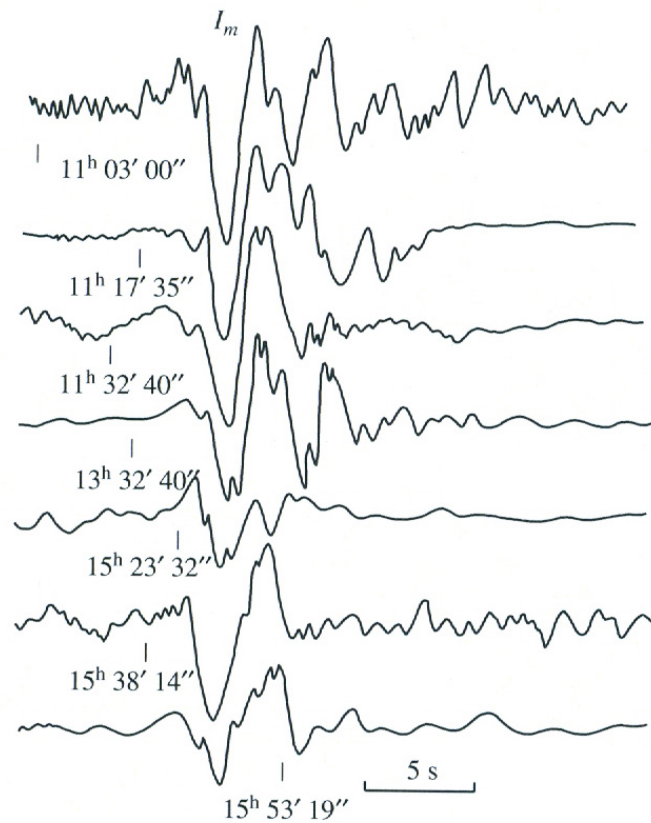
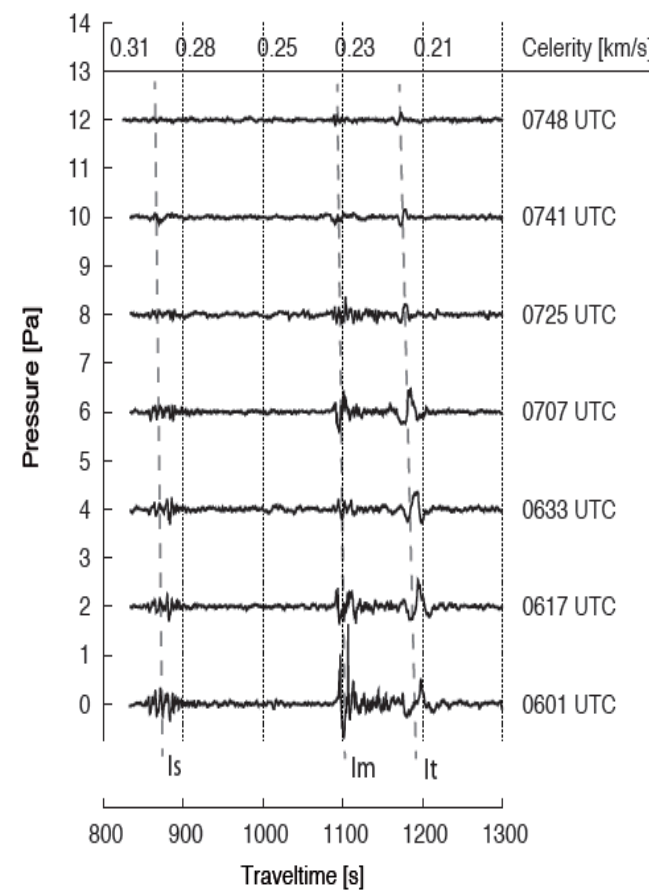
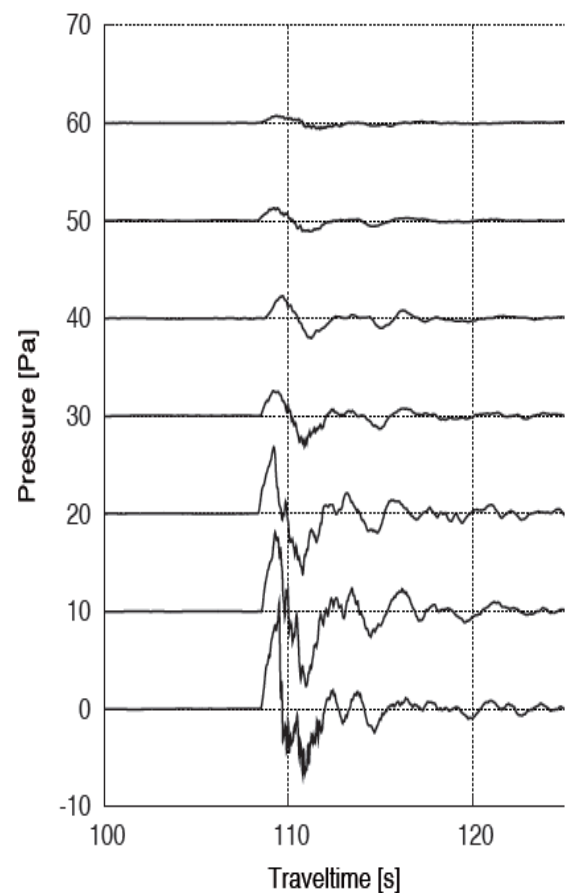
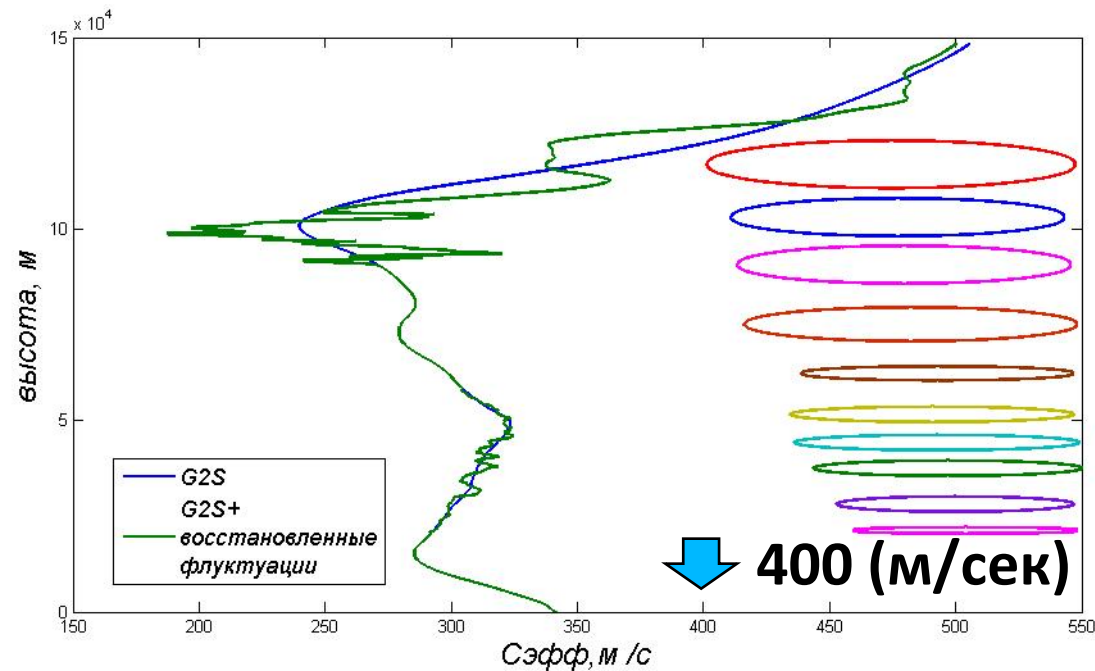


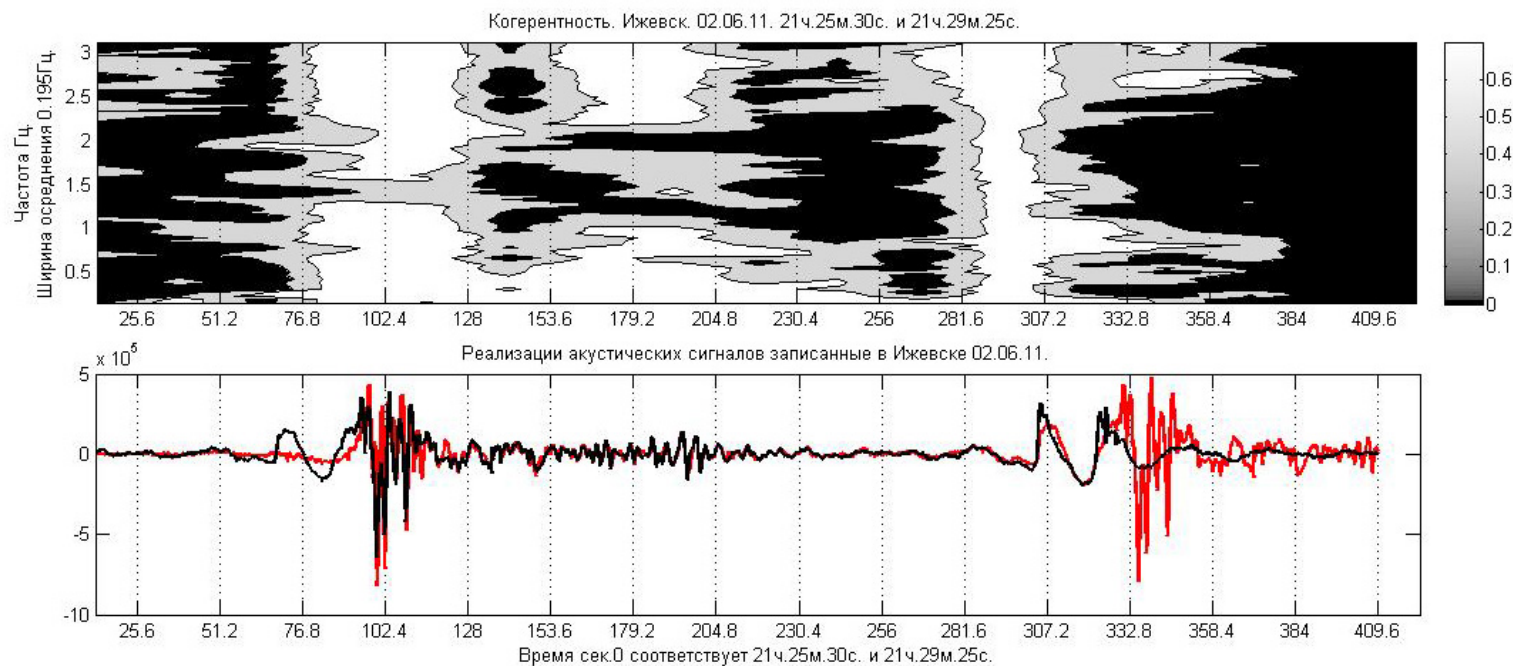
Fig. 5. Localized (pulsed I_m) infrasonic signals recorded in the geometric shadow zone at a distance of 300 km from the explosions equivalent to 20–70 t of TNT implemented on October 20, 1990.





♦ тонкая слоистая
структура
атмосферы

♦ когерентность
между сигналами
от взрывов

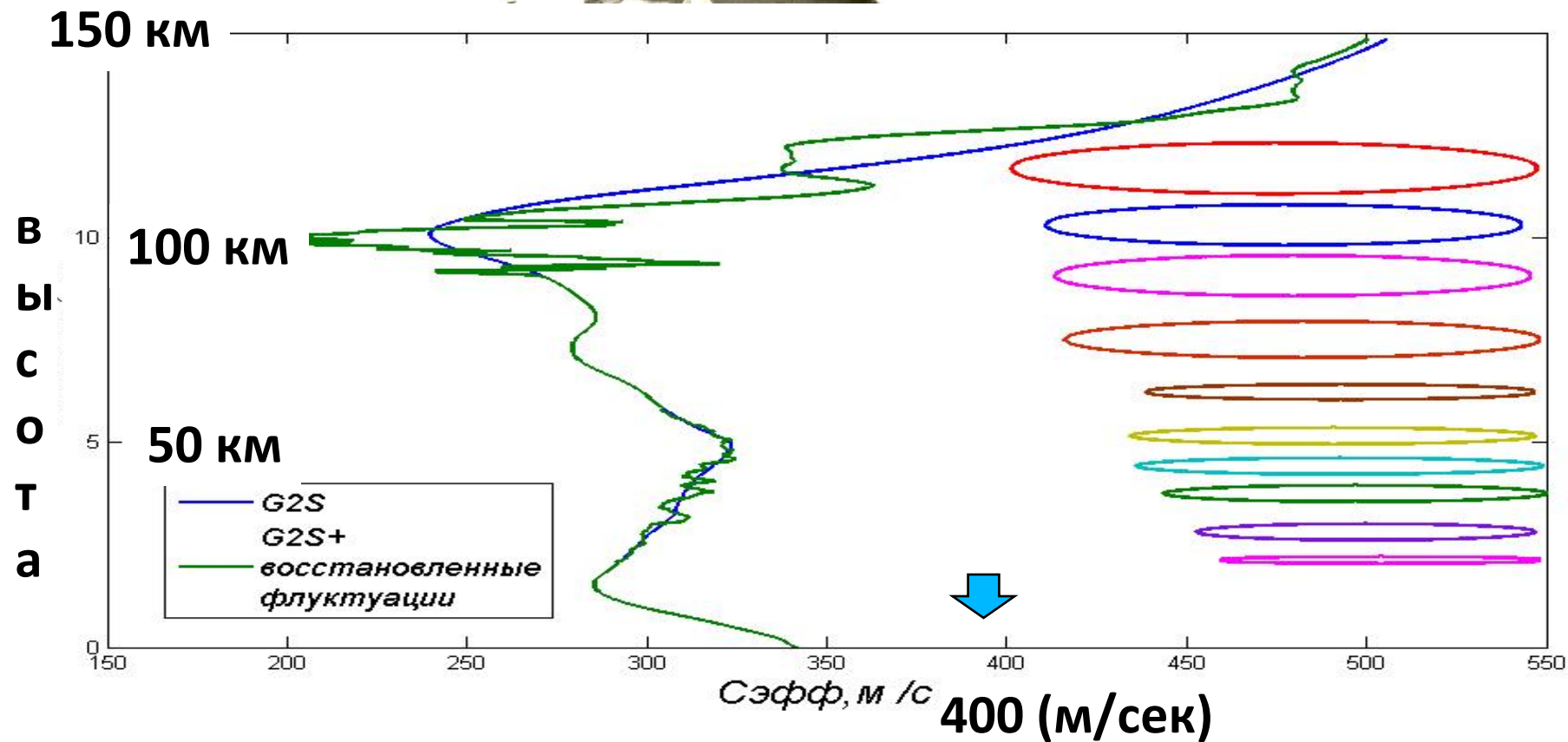


- ♦ Акустическим методом обнаружено наличие в атмосфере и нижней ионосфере долгоживущих тонко-структурных слоистых неоднородностей температуры и ветра, имеющих аномально большие вертикальные градиенты.
- ♦ Впервые установлено, что тонкая слоистая структура заполняет практически всю толщу атмосферы (по крайней мере, до высот 130км) и является стабильной на протяжении значимых интервалов времени.
- ♦ Предложена модель тонкой неоднородной структуры верхней атмосферы.

Тем самым, впервые, предложено и апробировано новое направление изучения атмосферы – дистанционное акустическое зондирование анизотропных неоднородностей нижней и верхней атмосферы (высоты 0÷1км и 20÷130 км).



Фильм «Загадки атмосферных вихрей»
1984 URL: <https://youtu.be/90Usezl846g>



МОДЕЛЬ АТМОСФЕРЫ В ВИДЕ «КОЧАНА КАПУСТЫ»



СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!

3-х мерный спектр флуктуаций температуры

[Chunchuzov I., 2002: J. Atm. Sci., V. 59, 1753-1777; Chunchuzov I., 2018: J. Atm. Sci., V. 75 (10). 3447-3467]

$$\Phi_T(k_{\perp}, k_z) = \frac{T_0^2 N^4}{g^2} S_{3E}(k_{\perp}, k_z), (k_z^* < k_z < k_w) \quad T_0 \text{ -средняя температура}$$

$$S_{3E}(k_{\perp}, k_z) = \frac{A_0}{|k_z|^5} \exp\left(-\frac{k_{\perp}^2}{4e_0 k_z^2}\right), \quad k_{\perp}^2 = k_x^2 + k_y^2, \quad e_0 \ll 1$$

$$A_0 = \beta_0 / (8\pi e_0) \quad \beta = 0.2$$

$$e_0 = \langle (\nabla_{\perp} S_v)^2 \rangle = \frac{M^2}{\chi^2} \geq \frac{M^2}{N^2} f^2 \ll 1 \text{ -параметр анизотропии, } f \text{ - параметр Кориолиса}$$

$$\sigma^2 \text{ -дисперсия флуктуаций скорости ветра, вызванных ВГВ, } N \text{ -частота БВ,}$$

$$l_v = 2\pi k_z^{*-1} \text{ -внешний вертикальный масштаб, } M \equiv \frac{\sigma}{N l_v} \text{ -параметр нелинейности,}$$

$$k_z^* = \frac{N}{\sigma \sqrt{2}} \text{ -характерное вертикальное волновое число,}$$

$$\chi^2 = \sigma^2 / \sigma_w^2 \text{ - отношение дисперсий горизонтальных и вертикальных скоростей,}$$

$$k_w = k_z^* \exp(\beta_0^{-1}) \text{ - критическое вертикальное волновое число, на котором возникают процессы обрушения волн из-за сдвиговых и конвективных неустойчивостей}$$

Вертикальные спектры

флуктуаций горизонтальной скорости

$$V(k_z) = \beta_0 N^2 k_z^{-3}, \quad k_z^* \ll k_z < k_w$$

относительных флуктуаций температуры

$$F_T(k_z) = \beta_0 N^4 g^{-2} k_z^{-3} \quad \beta_0 \sim 0.2 \quad \begin{array}{l} \text{-в состоянии} \\ \text{нелинейного} \\ \text{насыщения} \\ \text{при } M=0.35-0.40 \end{array}$$

Горизонтальный спектр

флуктуаций горизонтальной скорости

$$\tilde{V}_{E,\perp}(k_x) = 4e_0 \beta_0 N^2 k_x^{-3}, \quad k_x \gg k_x^* = 2\sqrt{e_0} k_z^*$$

$$l_x / l_z = 1 / \sqrt{4e_0} \square \chi / M \gg 1 \quad \begin{array}{l} \text{-отношение масштабов} \\ \text{анизотропных неоднородностей} \end{array}$$

$$M = 0.35-0.4 \quad \text{-нелинейное насыщение спектра}$$

Параметры спектров: $N, \quad f, \quad \sigma, \quad \chi = \sigma / \sigma_w$

