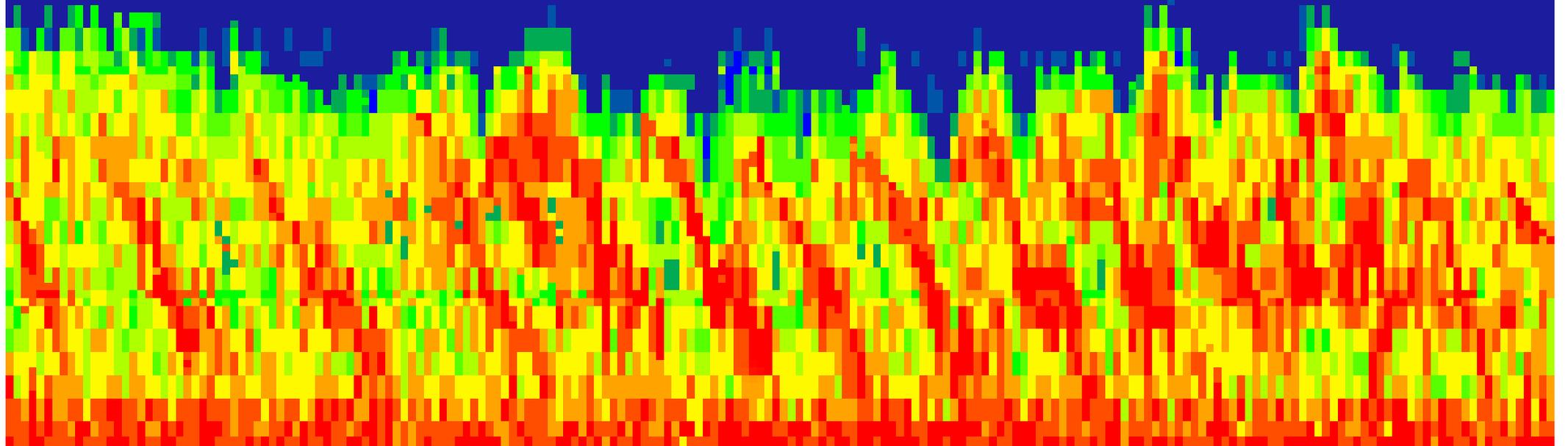
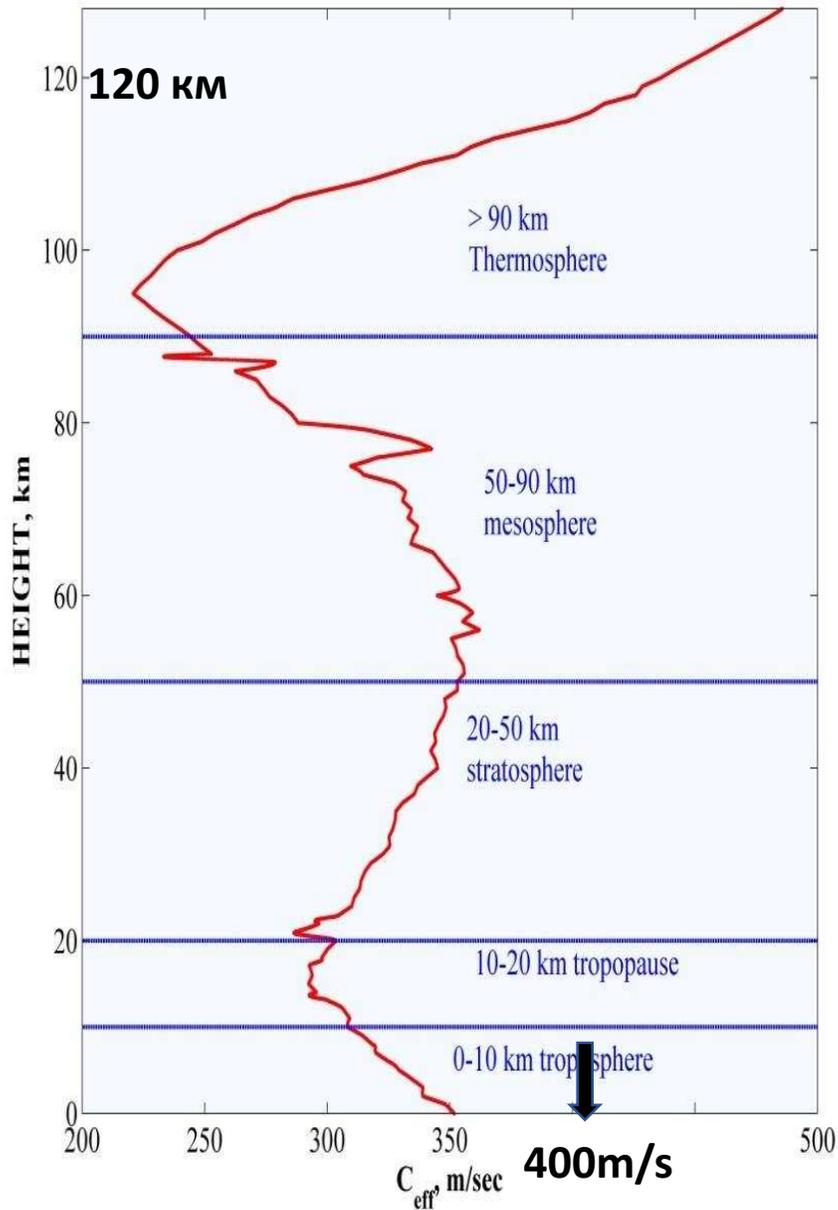


СТРУКТУРА АТМОСФЕРЫ КАК КОЧАН КАПУСТЫ ПО ДАННЫМ АКУСТИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

С.Н.Куличков; И.П.Чунчuzов; О. Е. Попов;
В. Г. Перепелкин; Г. А. Буш
ИФА им. А.М.Обухова РАН



ВЕРТИКАЛЬНАЯ СТРАТИФИКАЦИЯ АТМОСФЕРЫ



♦ **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)**

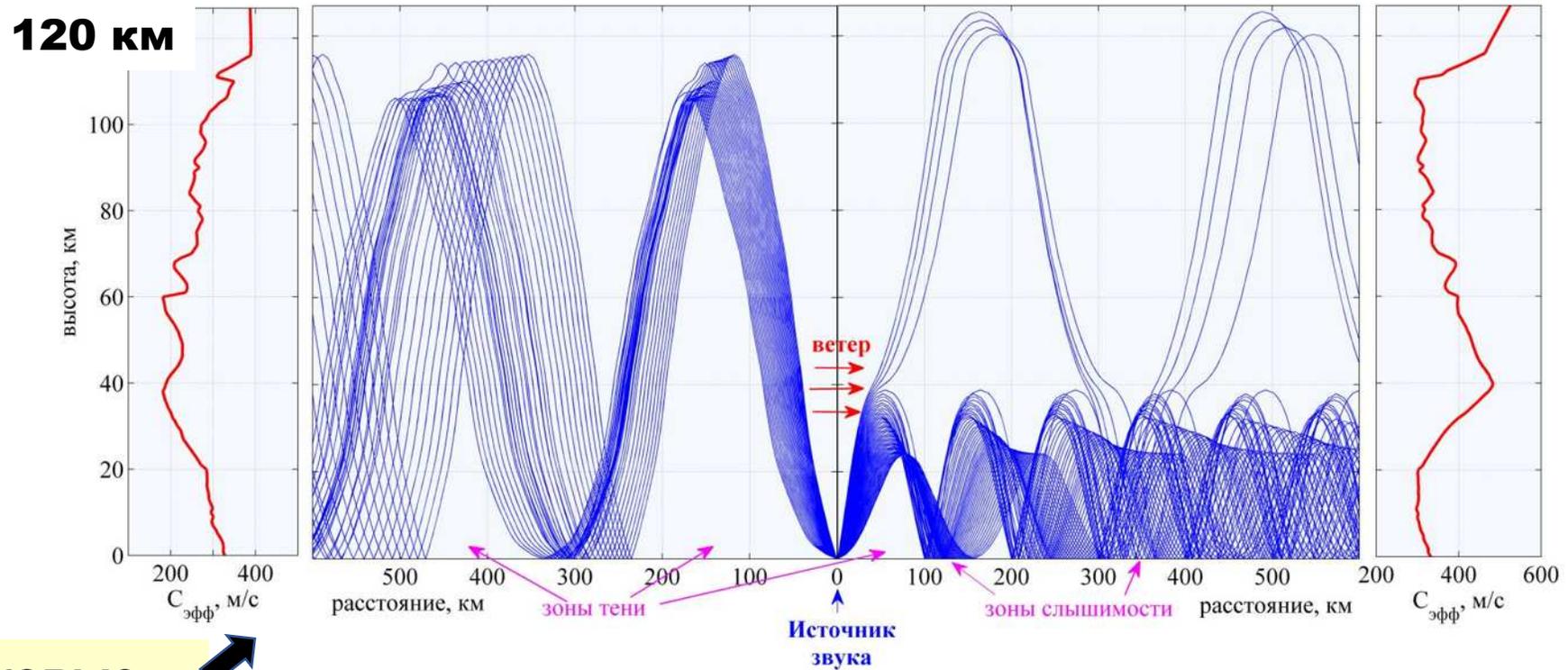
Созданы сети инфразвуковых станций

♦ **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

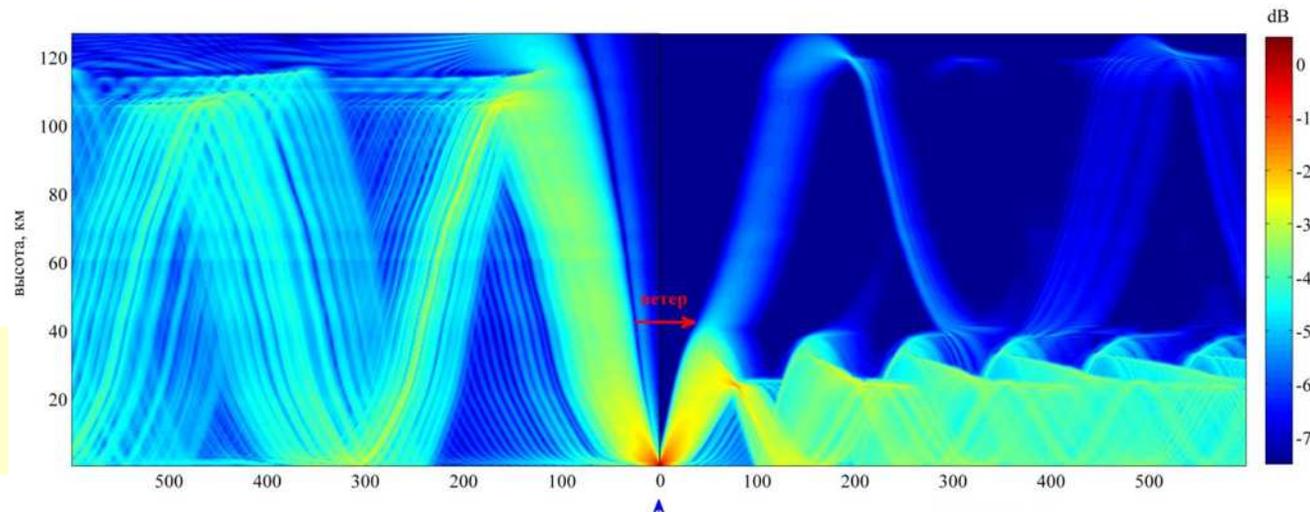
♦ **Исследование тонкой структуры атмосферы на основе теории дальнего распространения звука в слоистой атмосфере.**

Рефракционный поворот луча возможен только в случае, если скорость звука на высоте поворота больше скорости звука у земной поверхности



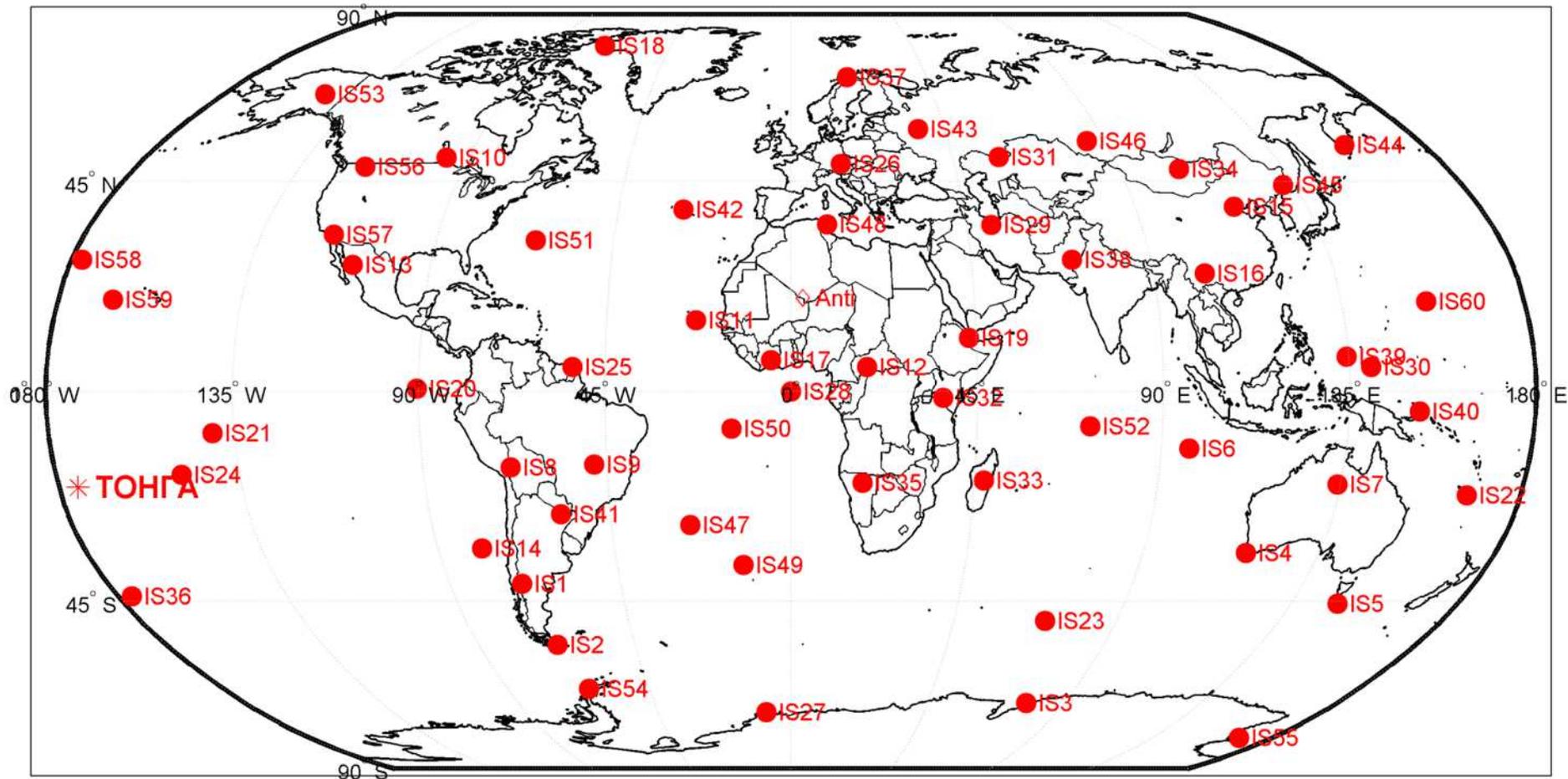
Звуковые лучи

Звуковое поле



Распределение по Земному шару инфразвуковых станций (Infrasound stations - IS)

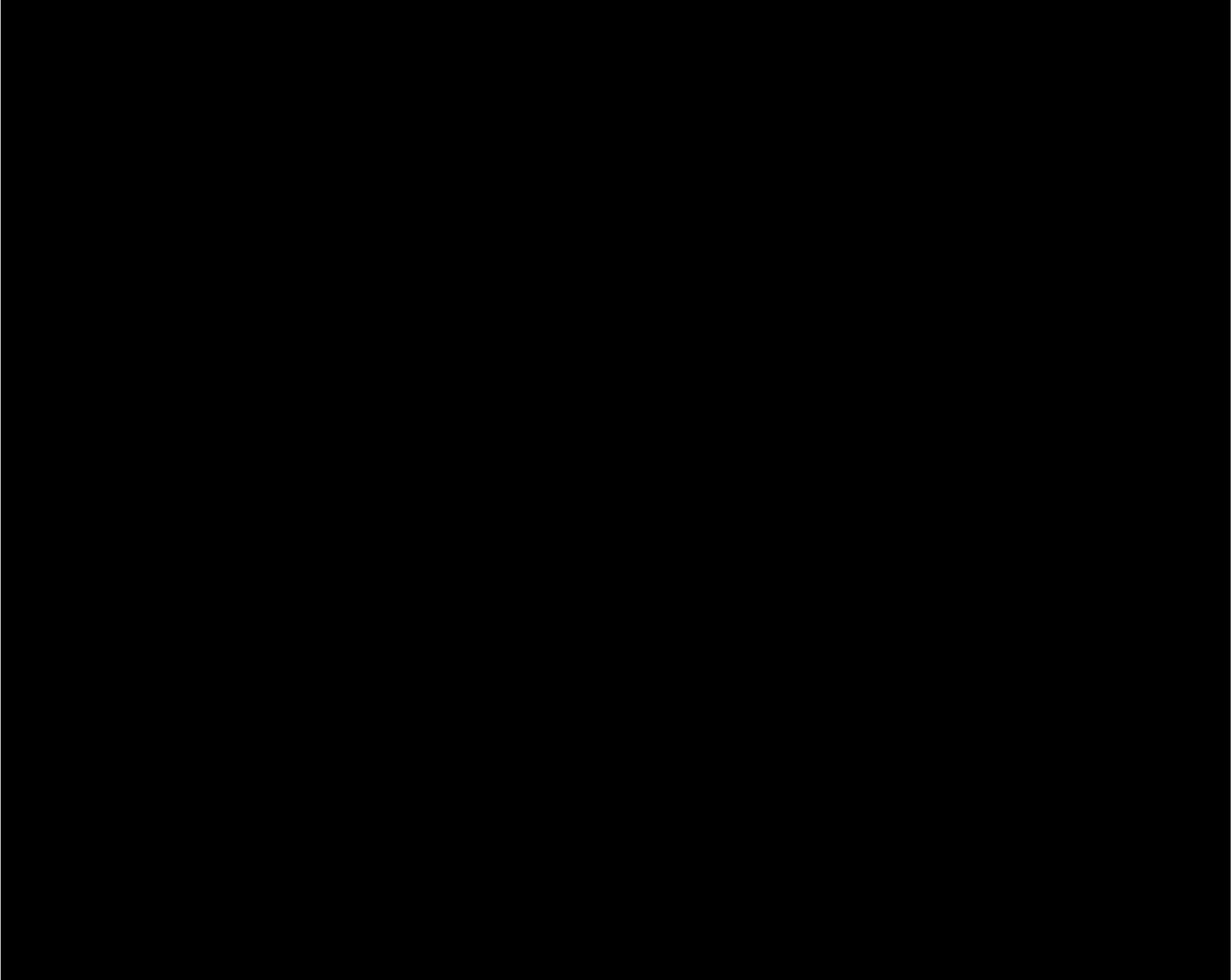
международной системы мониторинга (International Monitoring System - ISM).

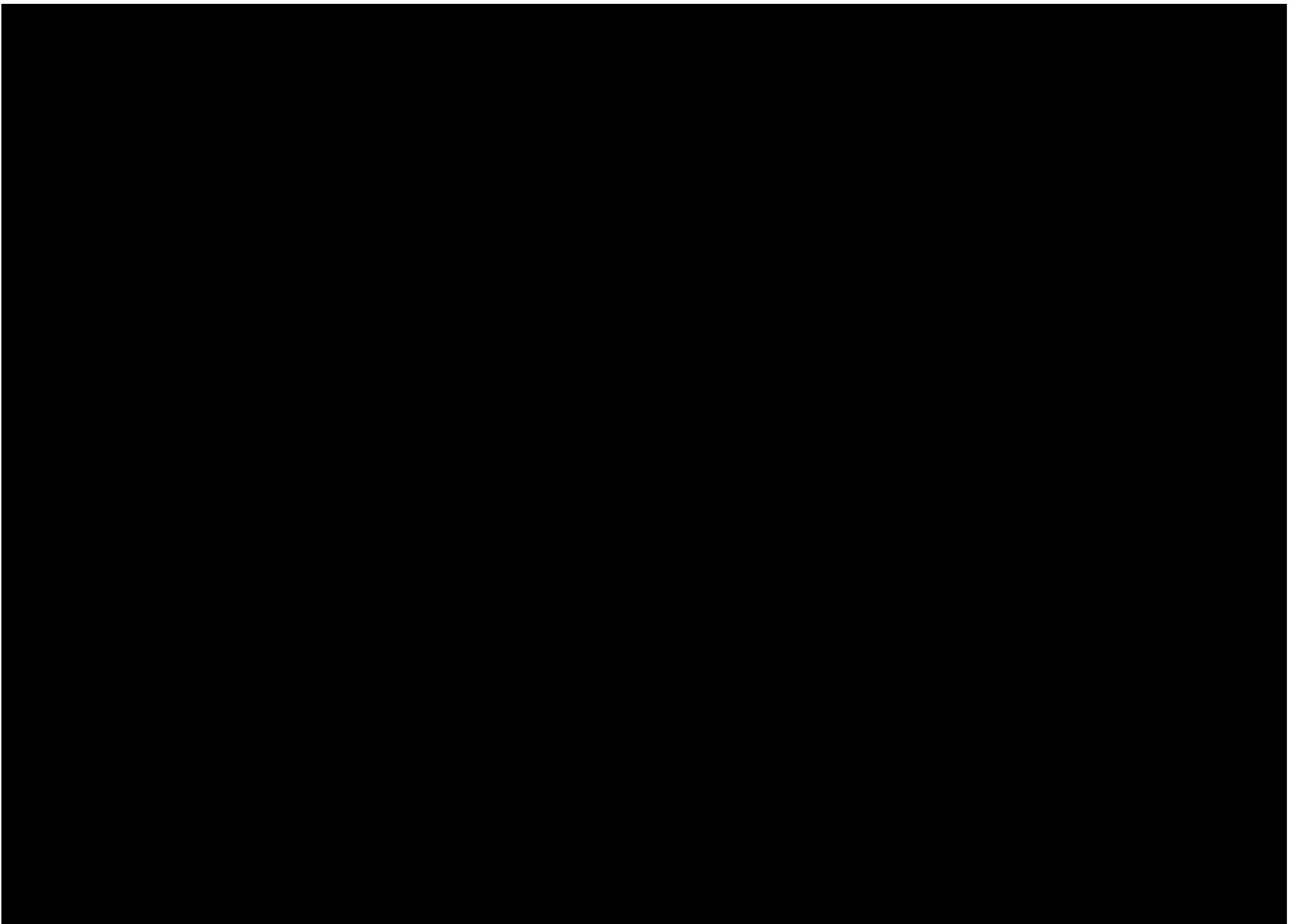




В 80-х годах XX века академик А.М. Обухов - выдающийся ученый в области физики атмосферы высказал предположение, что земная атмосфера по своей структуре напоминает "кочан капусты" с многочисленными слоями

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





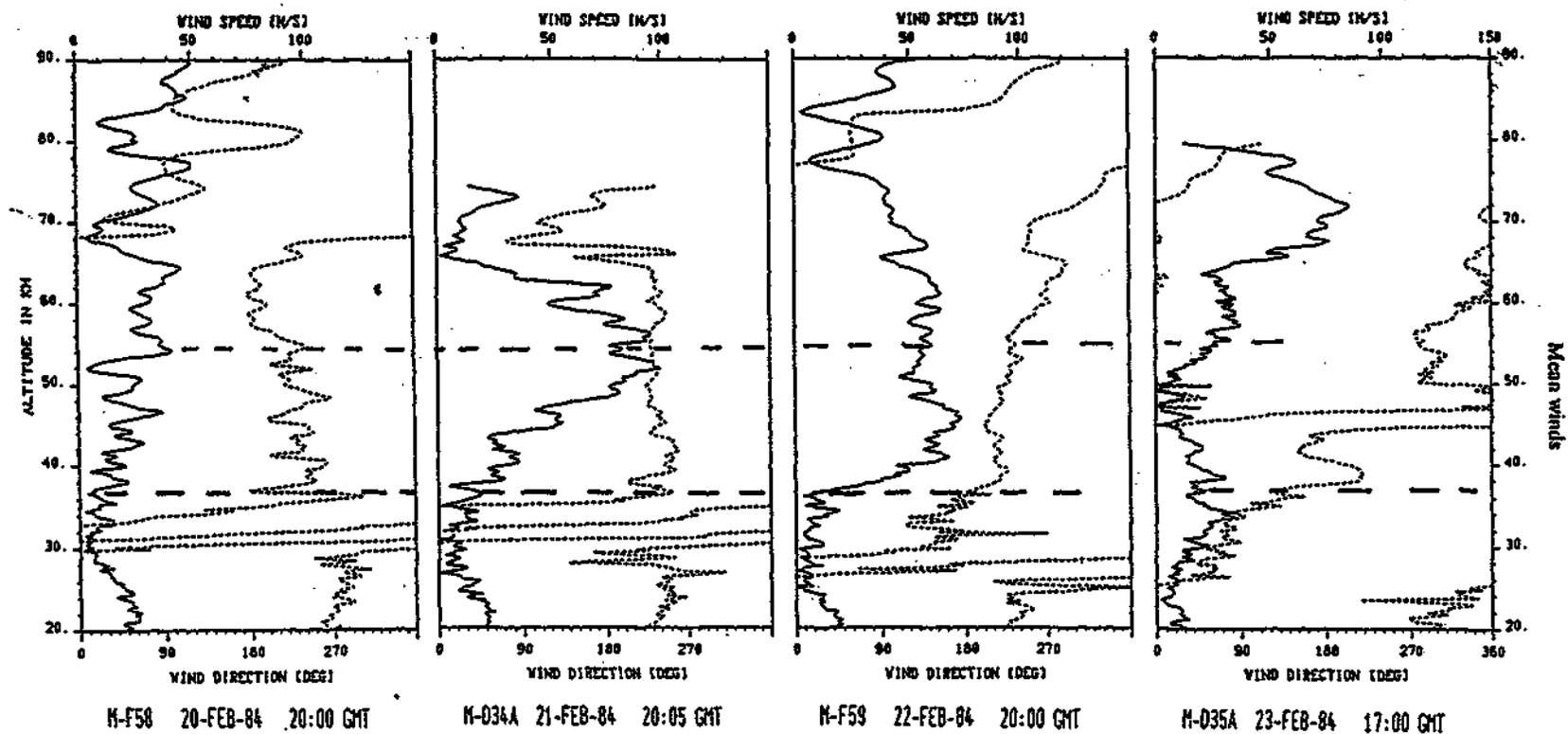
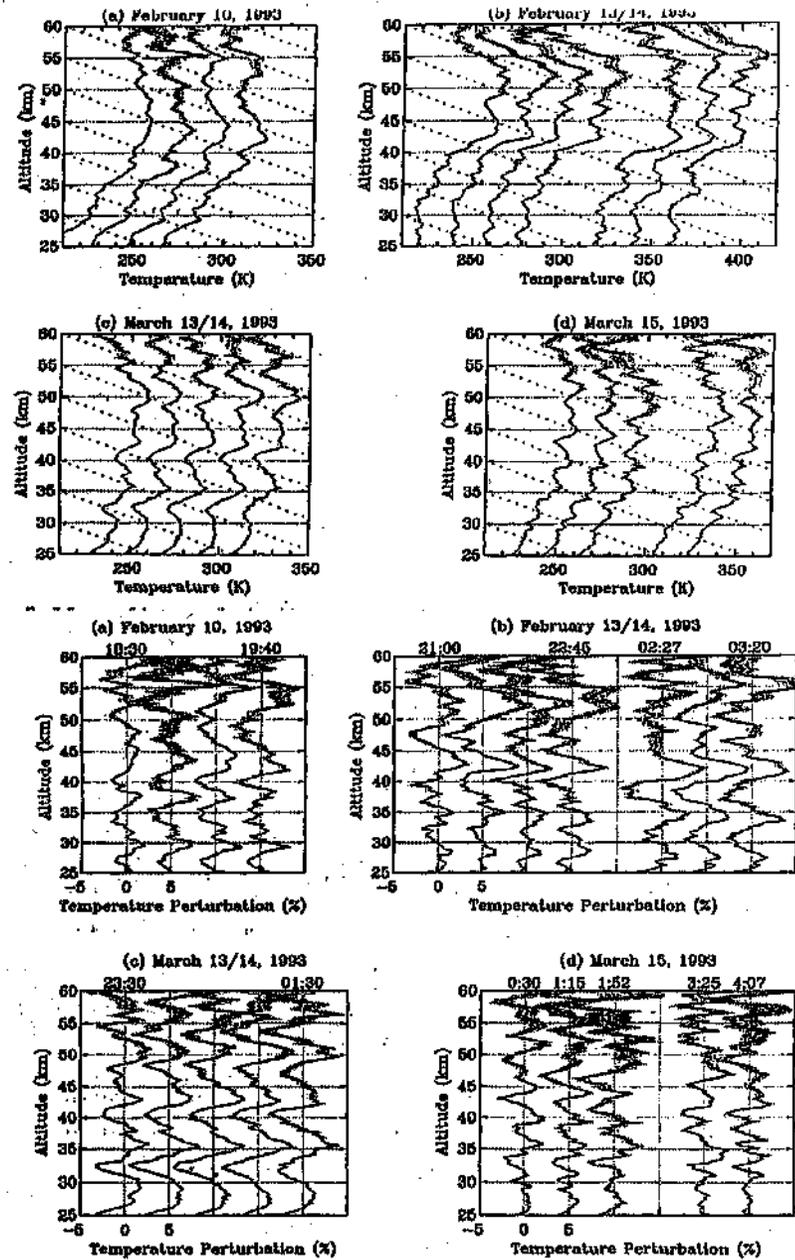


Fig. 3. Daily measurements of wind speed (solid) and direction (dotted) before and during the passage of the major stratospheric warming peak over Andøya on 23 Feb.

Профили скорости (сплошная линия) и направлений ветра (пунктир),
полученные методом "падающих сфер"

Rottger J. Structure and dynamics of the stratosphere and mesosphere revealed
by VHF radar investigations // Pure and Appl. Geophys. 1980. V.118. P.494-527.

260. Tsuda T., Inoue T., Fritts D.C., Van Zandt T.E., Kato S., Sato T., Fukao S.



variations at altitudes of 80-105 km in two latitudinal zones of the northern hemisphere./.
of Atmos. And Terr.Physics. 1994, V.56. N.9. P.1209-1212.

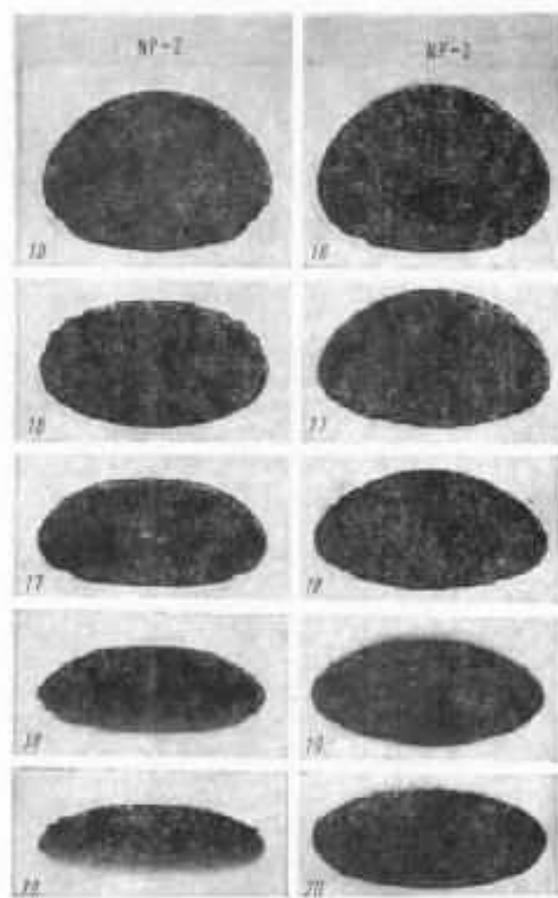


Рис. 1. Две серии фотоснимков захода Солнца с борта орбитальной станции «Салют-6»

Гречко Г.М., Гурвич А.С., Ляхов В.А., Савченко С.А., Соколовский С.В. Результаты исследования рефракции в третьей экспедиции на орбитальной станции «Салют - 6» // Известия АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1981.Т.17. № 11. С.1123-1133

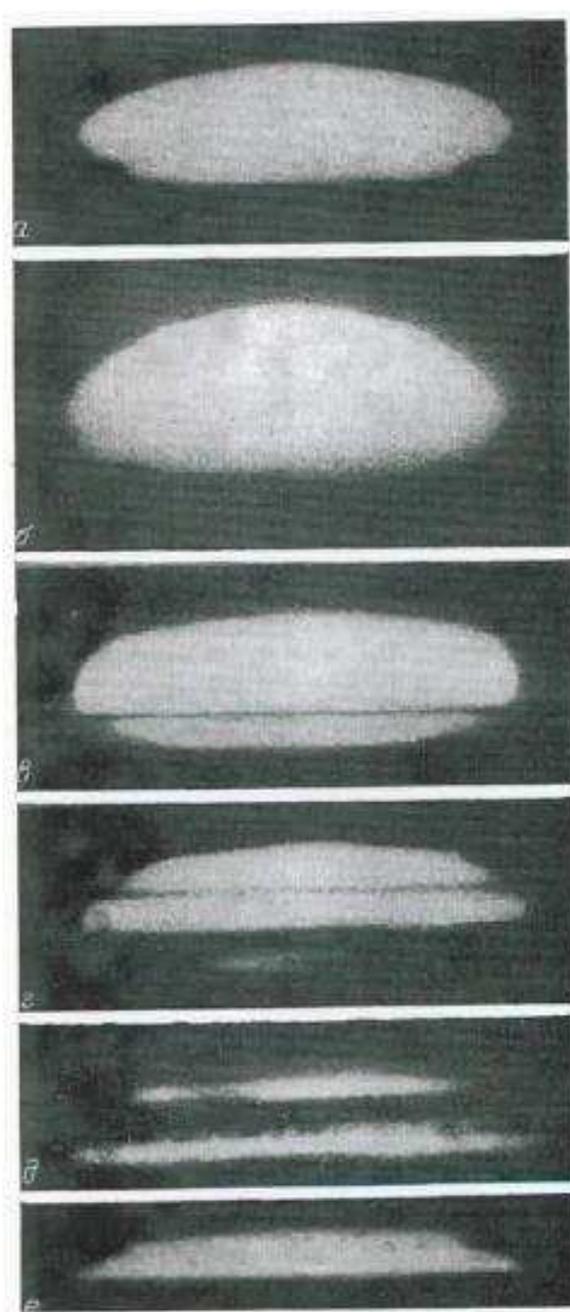


Рис. 5. Фотоснимки Солнца, полученные на орбитальной станции «Салют-6»

Гречко Г.М., Гурвич А.с., Романенко Ю.В., Соколовский С.В., Татарская М.С. Слоистая структура температурного поля в атмосфере по измерениям рефракции с орбитальной станции «Салют-6» // Известия АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1981.Т.17. № 2. С.115-122

ТОНКАЯ СТРУКТУРА АТМОСФЕРЫ



След от ракеты с кораблем «СОЮЗ» запущенной 21:53 UT

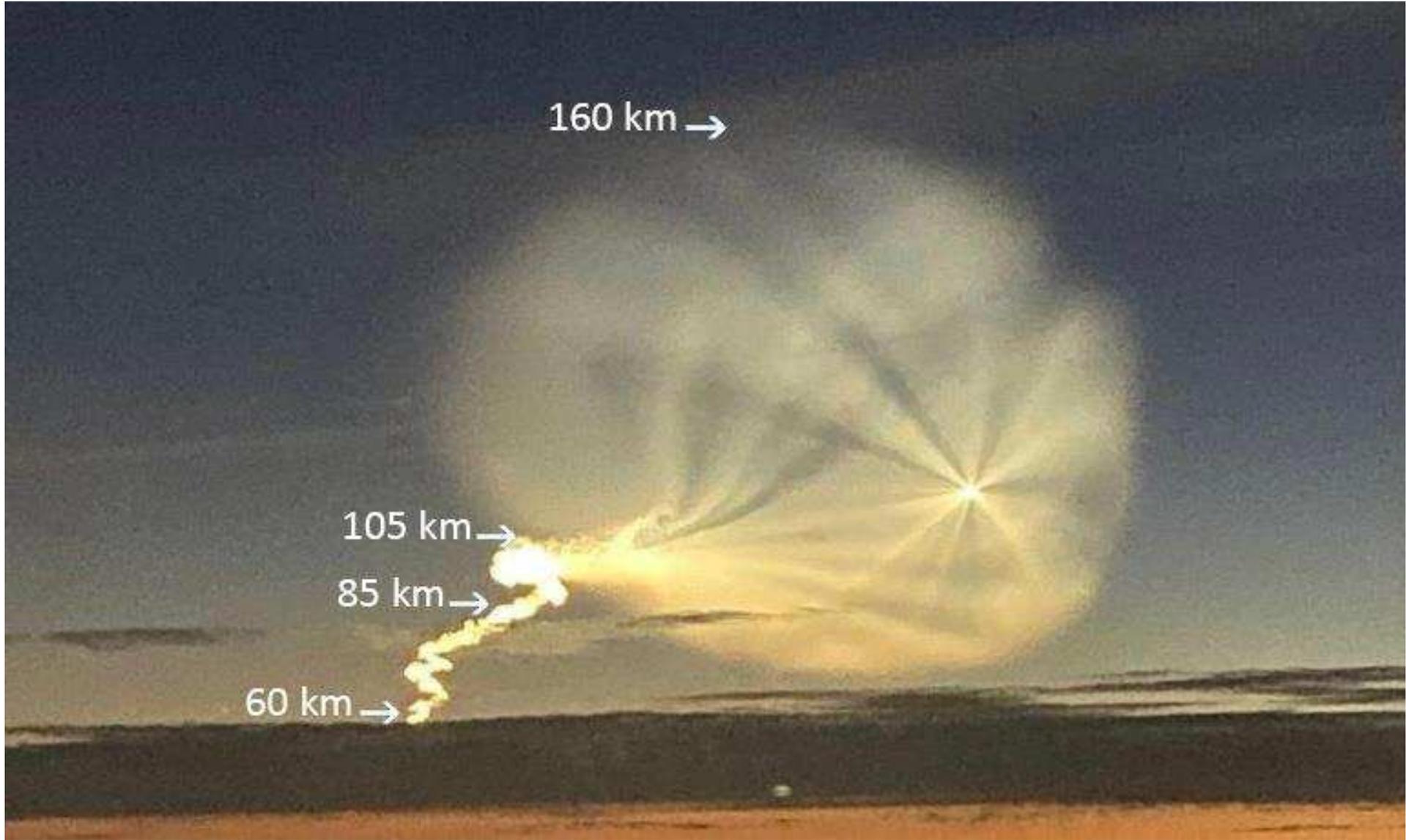
21 Мая 2009 года с космодрома Плесецк:

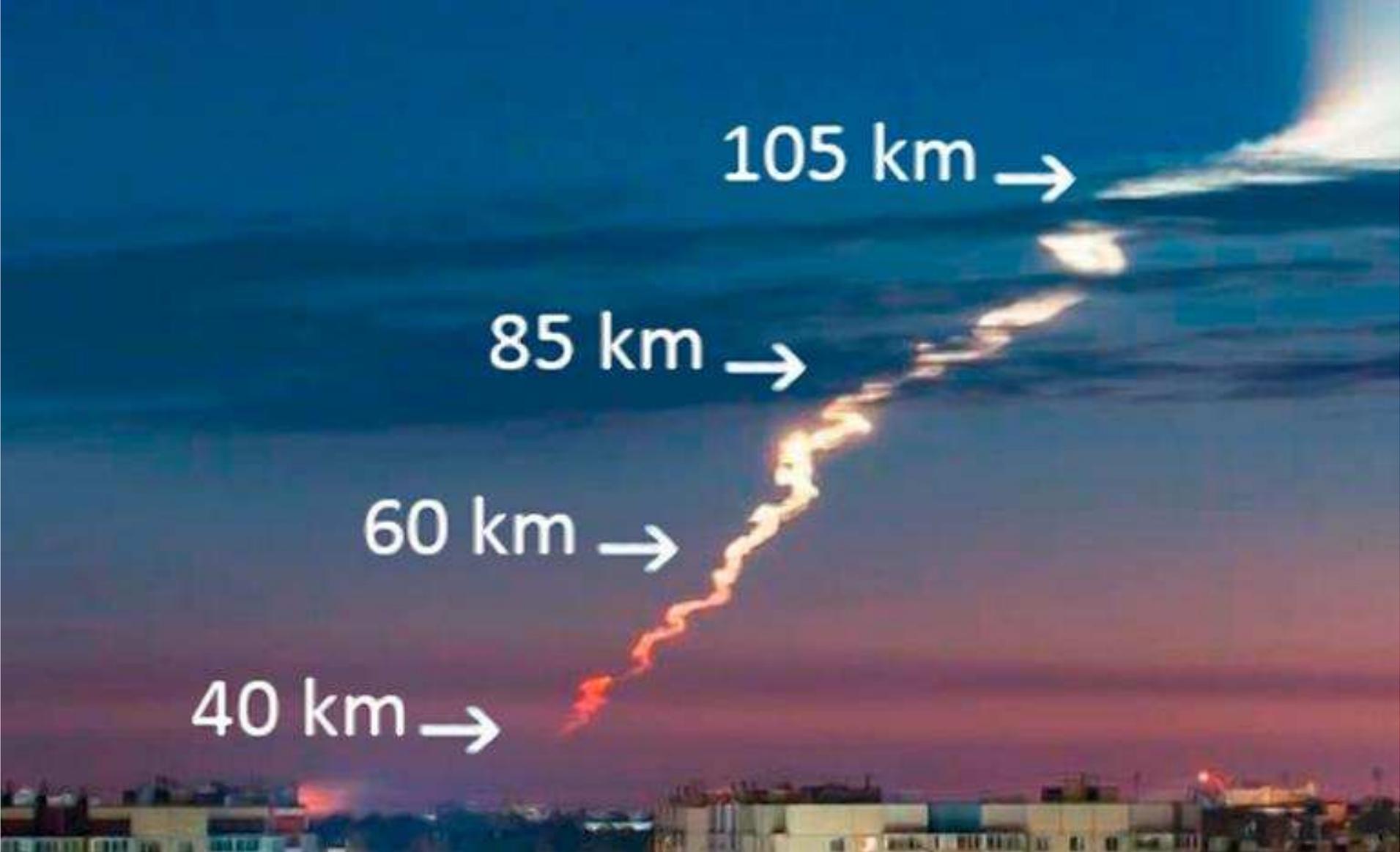
(a) 204 с, (b) 253 с, (c) 610 с, (d) 19 мин. 39 сек.

P. Dalin, V. Perminov, N. Pertsev et.al. «Optical studies of rocket exhaust trails and artificial noctilucent clouds produced by Soyuz rocket launches»/JGR, VOL. 118, 7850–7863, 2013



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).



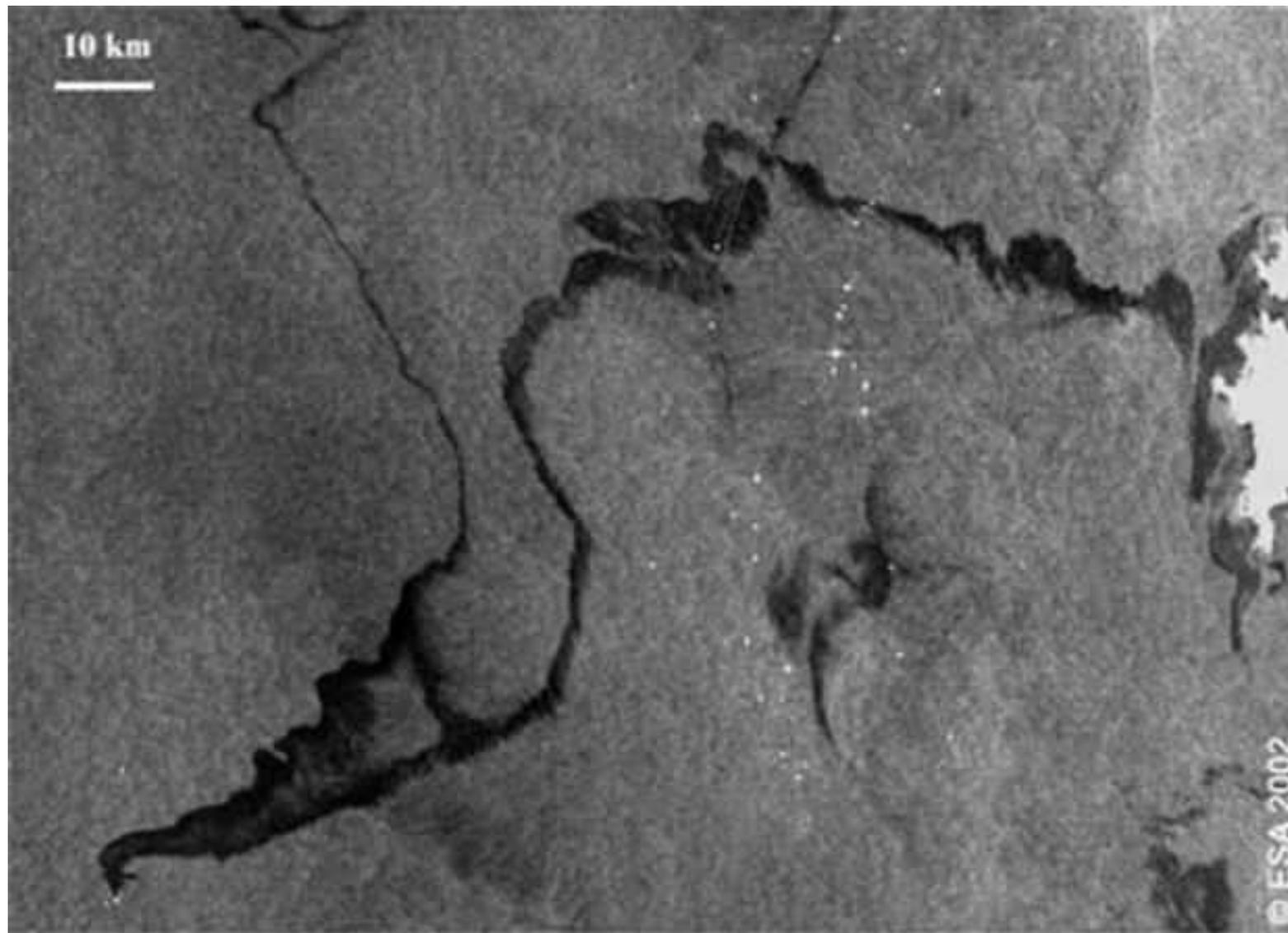


40 km →

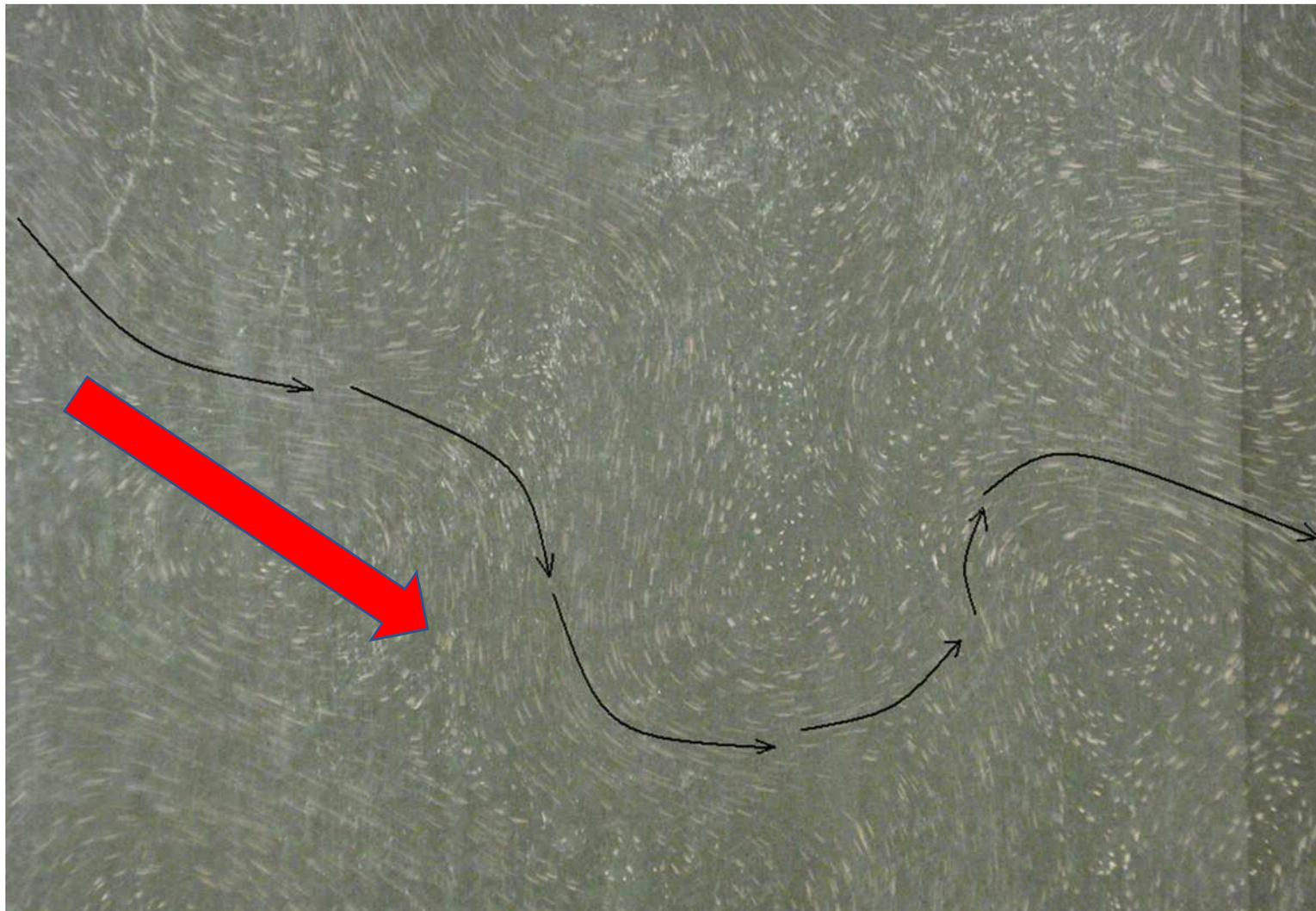
60 km →

85 km →

105 km →



**ПРИМЕР РАЗЛИВА ПЯТНА НЕФТИ
В ОКЕАНЕ**



**Режим анизотропной турбулентности.
*Струйный перенос примеси по диагонали***

◆ Тонко-слоистая структура на высотах верхней атмосферы (условно, 20÷130 км) исследуется в основном оптическими и радиофизическими методами.

◆ Эти методы достаточно хорошо методически проработаны, но имеют ряд физических ограничений.

◆ В них определяются лишь абсолютные значения температуры и ветра осредненные по области высот 100 ÷ 500 м за достаточно продолжительный интервал осреднения во времени.

◆ Толщины областей осреднения по вертикали сравнимы с вертикальными масштабами самих исследуемых тонко-слоистых структур, что, очевидно, не позволяет корректно определять вертикальные градиенты измеряемых величин внутри и на границах слоев.

◆ Существенные ограничения радиофизических методов в области высот 30-60 км связаны также с недостаточной турбулизированностью атмосферы и незначительной электронной концентрации.

◆ Нами, впервые, было предложено, теоретически проработано и экспериментально реализовано новое направление изучения атмосферы – **ДИСТАНЦИОННОЕ АКУСТИЧЕСКОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ ТОНКОЙ НЕОДНОРОДНОЙ СТРУКТУРЫ НИЖНЕЙ И ВЕРХНЕЙ АТМОСФЕРЫ (ВЫСОТЫ 0÷1КМ И 20÷130 КМ).**

◆ Впервые, акустическим методом обнаружено наличие в атмосфере долгоживущих тонко-структурных слоистых неоднородностей температуры и ветра, характерных для **ВСЕХ** времен года, для различных областей по Земному Шару и имеющих аномально большие, на порядок превышающие средние, значения вертикальных градиентов температуры и ветра

◆ **Принципиальным** отличием предложенных нами акустических методов от традиционных является использование **прямой** взаимосвязи между характеристиками регистрируемого отраженного от тонких атмосферных неоднородностей сигнала и вертикальными градиентами температуры и ветра в этих слоях.

◆ Указанное позволяет получить информацию о **«МГНОВЕННЫХ»**, а не осредненных, как в других методах, вертикальных профилях температуры и ветра.

◆ При этом, акустический метод не имеет ограничений для использования в наименее исследованной области на высотах 30÷60 км.

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).

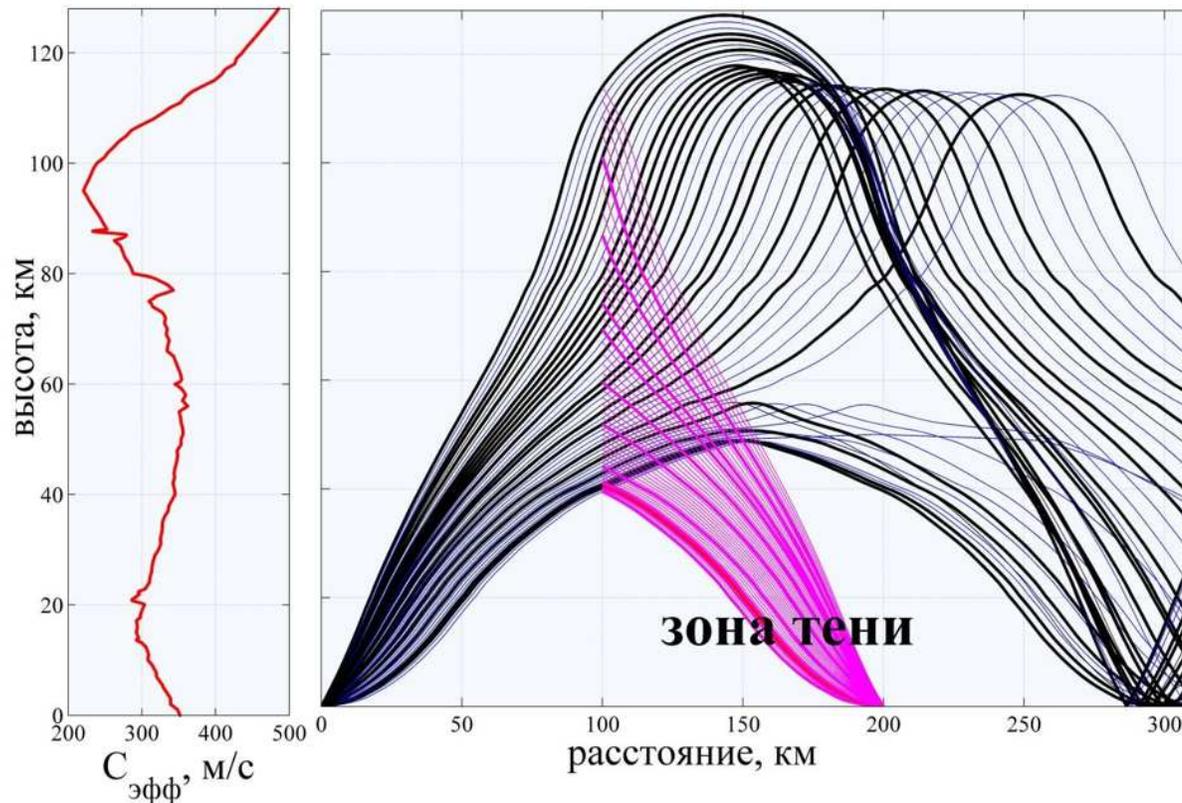


Схема акустического зондирования анизотропной структуры атмосферы.

Для восстановления вертикальных профилей неоднородных структур использовалось 2 метода.

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

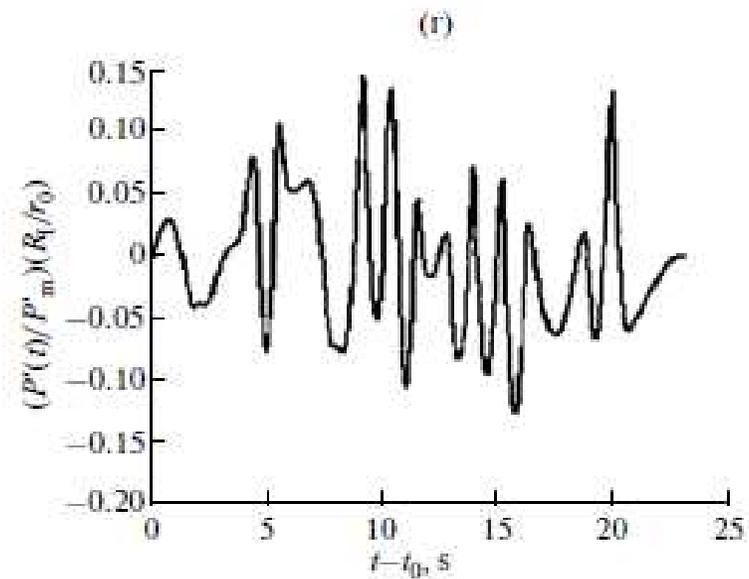
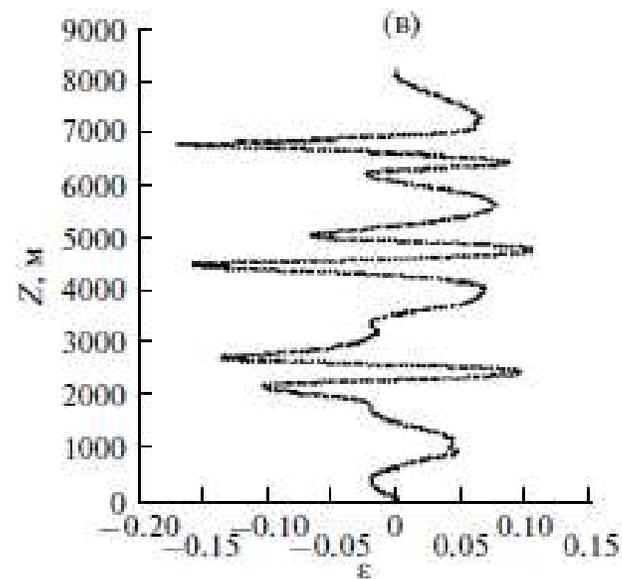
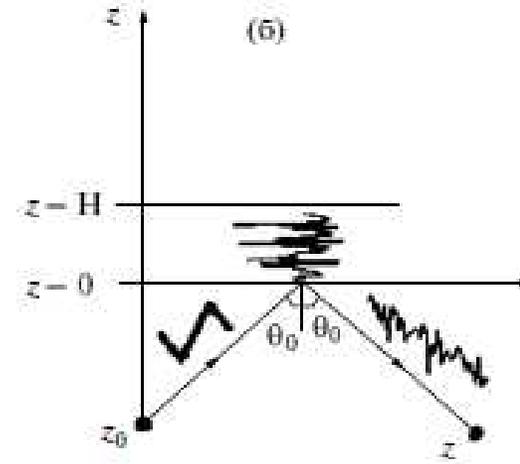
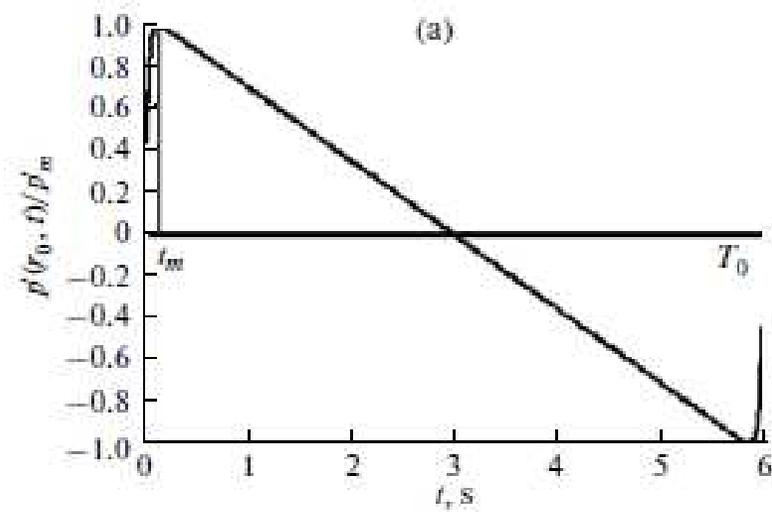
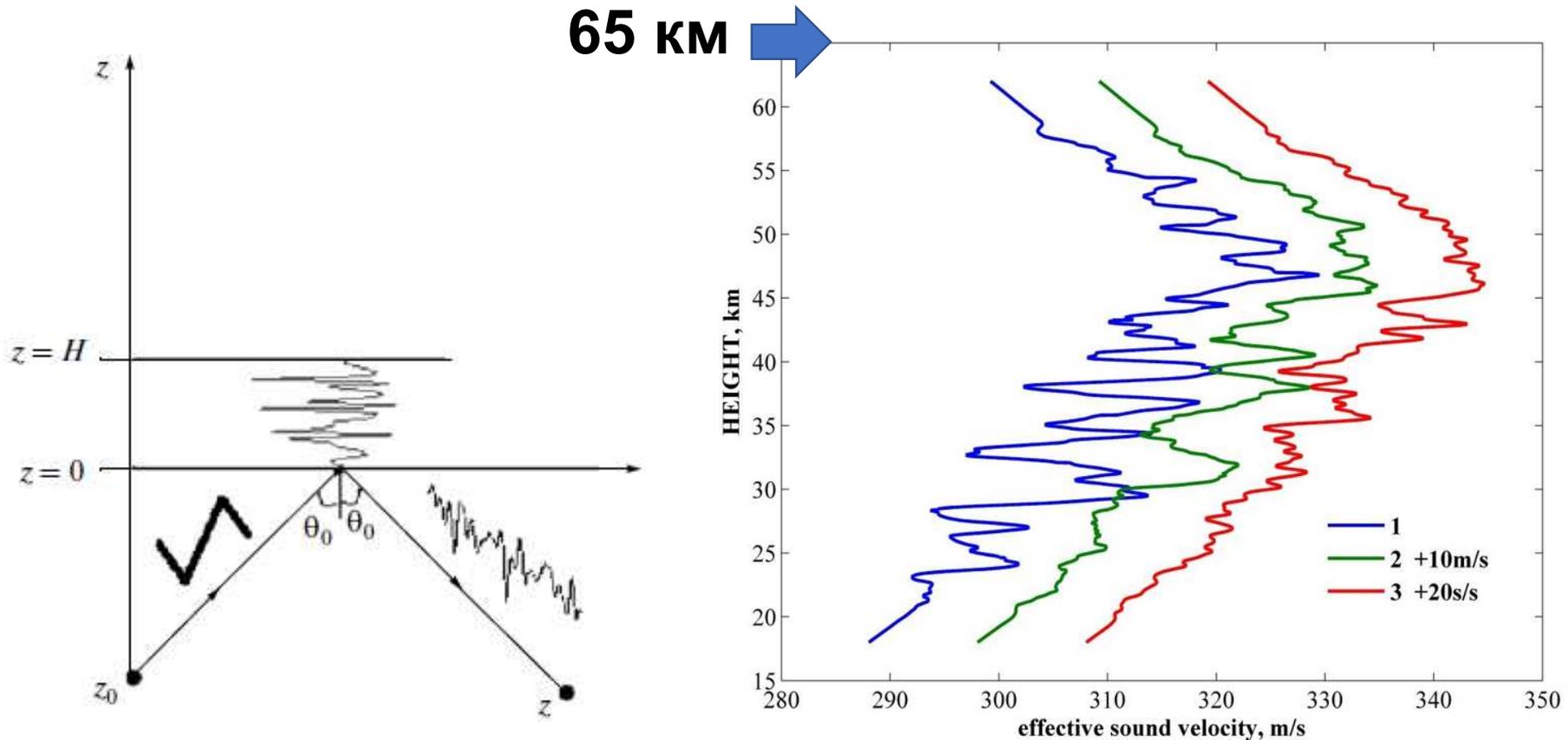
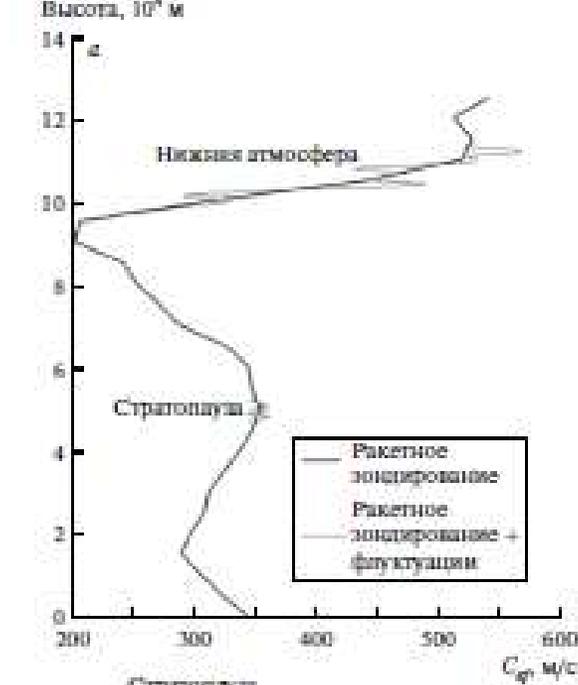


Схема отражения сигнала от слоистых неоднородностей атмосферы и форма отраженного сигнала. а – N -волна от точечного источника в точке z_0 с формой $f(t) = p'(r_0, t) / p'_m$, падающая на движущийся слой $0 \leq z \leq H_0$ с вертикальными флуктуациями эффективного показателя преломления $\varepsilon(z)$. б – Схема падения волны. в – Одна из модельных реализаций эффективного показателя преломления $\varepsilon(z)$ в неоднородном слое стратосферы толщиной $H = 8.2$ км при $\theta_0 = 70^\circ$ и $c_1 = 330$ м/с, $a = 483$ м/с. г – Форма отраженного сигнала $I_0(t)$ от неоднородного слоя стратосферы с вертикальным профилем $\varepsilon(z)$.

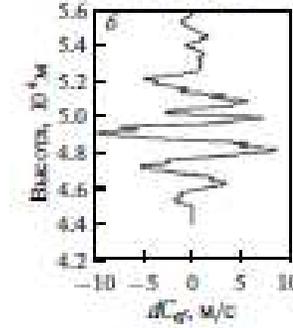
Схема падения акустической **N** волны от точечного источника в точке **z_0** на неоднородный движущийся слой **$0 \leq z \leq H_0$** с флуктуациями эффективного показателя преломления.

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

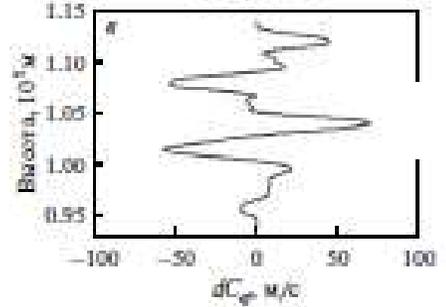




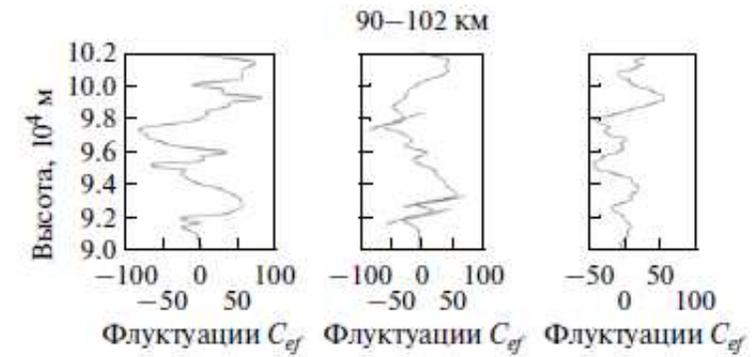
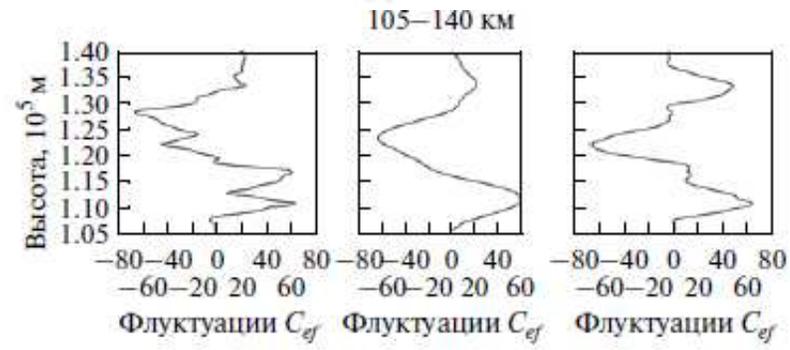
Стратопауза 44–54 км



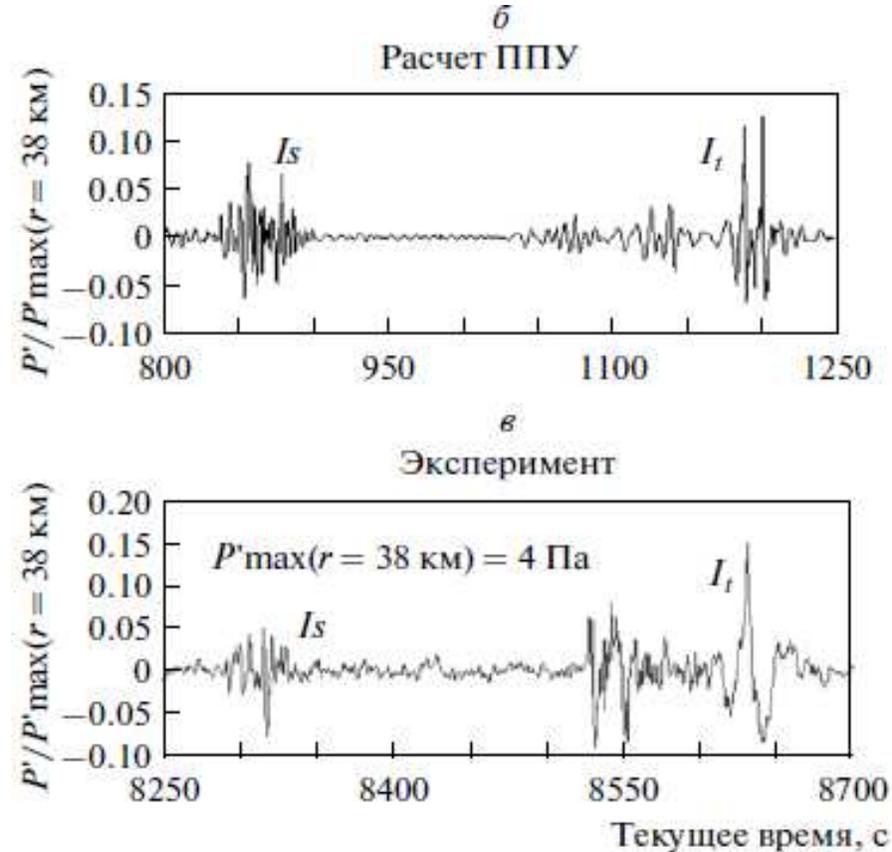
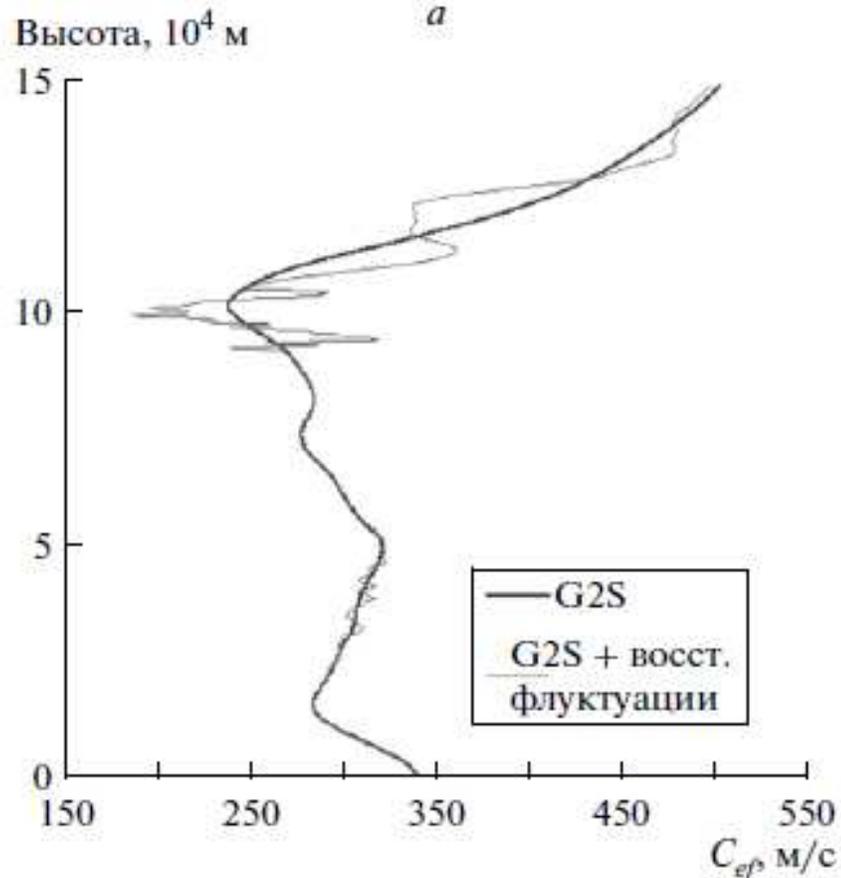
Нижняя атмосфера 95–114 км



Профиль $C_{ef,0}(z_j) + \Delta C_{ef}(z_j)$ (а), возмущенный восстановленными вертикальными флуктуациями $\Delta C_{ef}(z)$ в слое стратопаузы 44–54 км (б) и нижней термосферы 95–114 км (в), полученный с помощью сигнала от наземного взрыва с эквивалентным весом 15 т TNT, зарегистрированного 2 июня 2011 г. в 23 ч 27 мин в Удмуртии на расстоянии 322.4 км от взрыва. Флуктуации $\Delta C_{ef}(z)$, восстановленные с помощью сигнала от извержения вулкана Карымский, зарегистрированного 2 июля 2011 г. на расстоянии 154.2 км от вулкана (г).



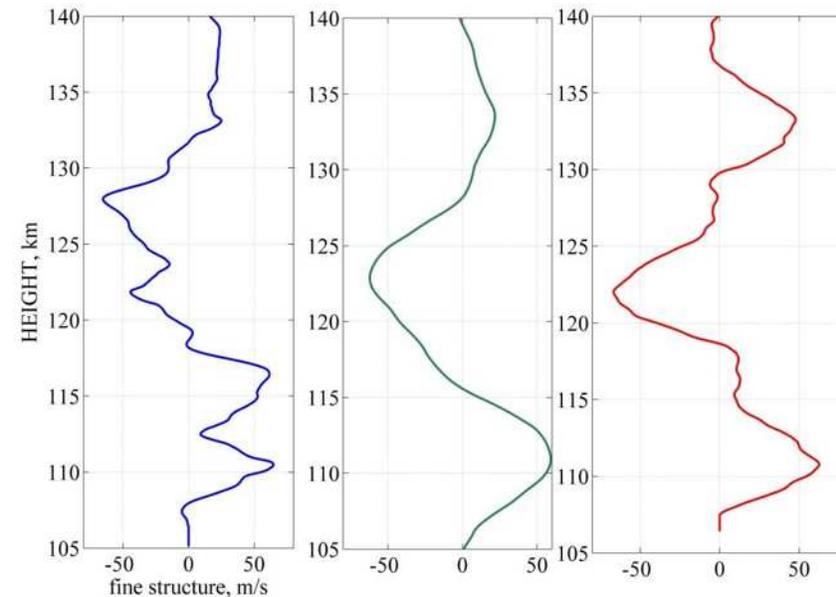
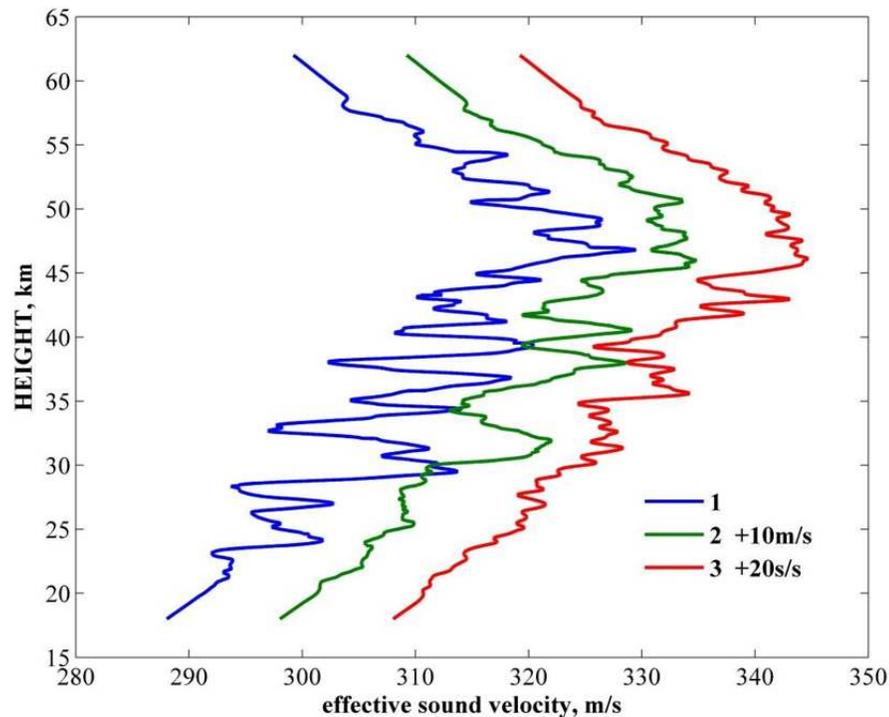
Вертикальные профили флуктуаций $\Delta C_{ef}(z)$ в нижней термосфере, восстановленные в диапазонах высот 90–102 и 105–140 км. Наклонными отрезками указаны отдельные слои атмосферы с экстремально большими вертикальными градиентами скорости ветра (более 1 м/с на 10 м).

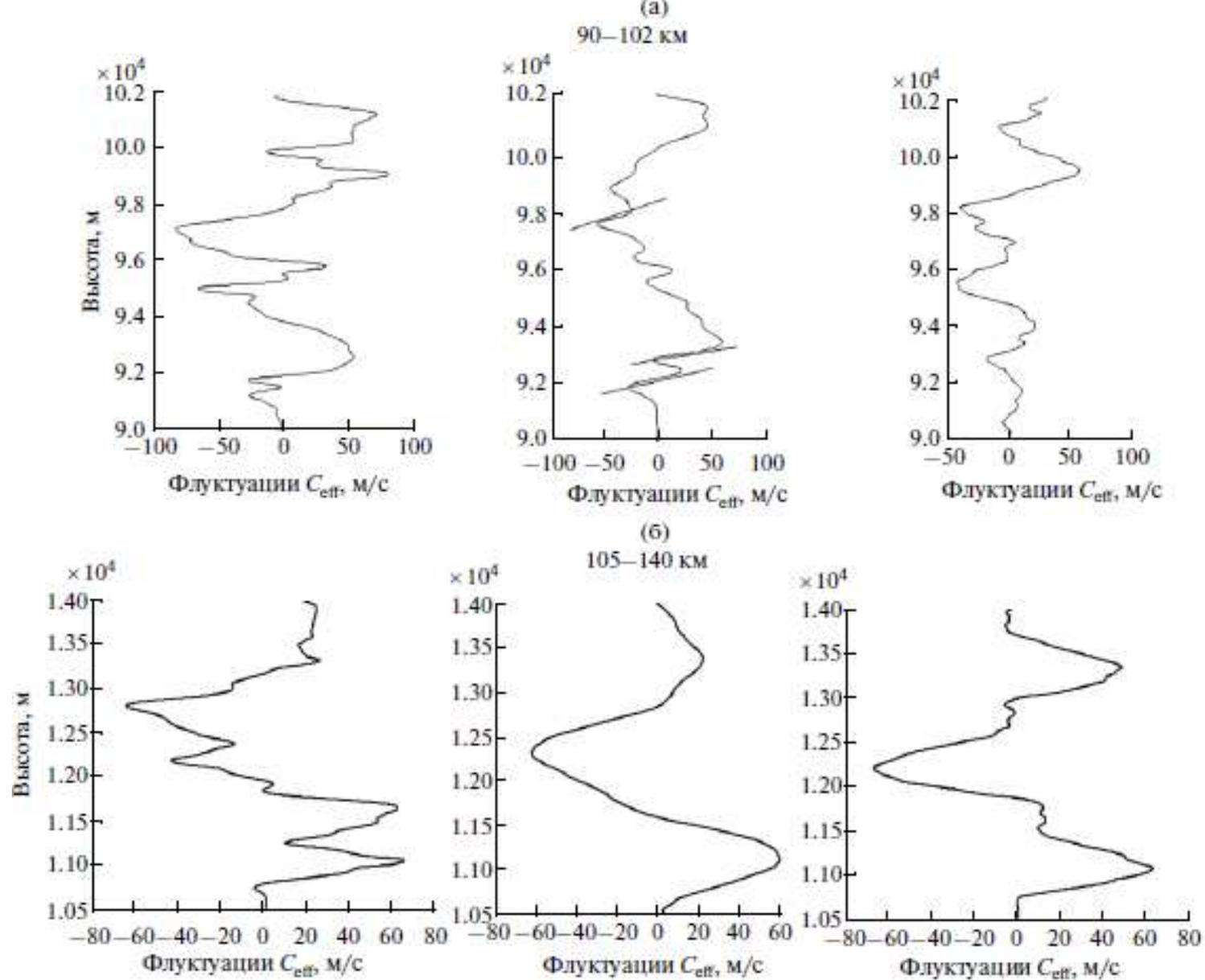


Результаты восстановления вертикального профиля флуктуаций $\Delta C_{ef}(z)$ в слое стратосферы (20–55 км) и слоях нижней термосферы, (90–102 км) и (105–140 км). *a* – профиль из модели атмосферы *Ground-to-Space* (G2S) с наложенными на него флуктуациями $\Delta C_{ef}(z)$. *б* – сигнал, рассчитанный методом ППУ в диапазоне частот 0.07–0.7 Гц; *в* – исходный сигнал, зарегистрированный в эксперименте.

ПРИМЕРЫ ВОССТАНОВЛЕННЫХ ФЛУКТУАЦИЙ ЭФФЕКТИВНОЙ СКОРОСТИ ЗВУКА В СТРАТОСФЕРЕ (слева) и ТЕРМОСФЕРЕ (справа)

- ◆ Tungurahua volcano (R~ 251 km, Equador)
(3 профиля; $\Delta t = 15$ min.) (I. Chunchuzov, 2015)





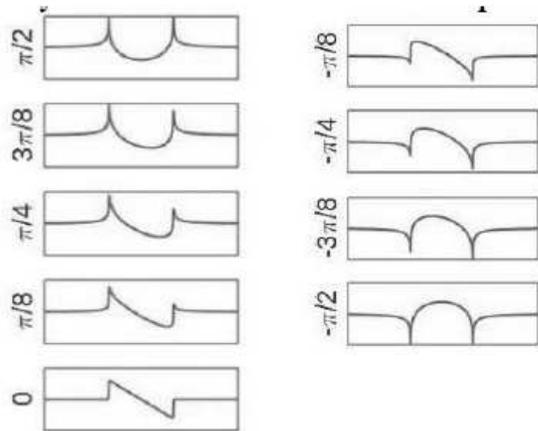
Вертикальные профили флуктуаций $\Delta C_{\text{eff}}(z)$ в нижней термосфере, восстановленные в диапазонах высот 90–102 км (а) и 105–140 км (б). Наклонными отрезками указаны слои атмосферы с экстремально большими вертикальными градиентами скорости ветра (более 1 м/с на 10 м).

Метод декомпозиции звуковых сигналов

Другим новым методом, который мы предлагаем использовать для акустического зондирования неоднородных структур в верхней атмосфере, является метод декомпозиции инфразвуковых сигналов, регистрируемых в областях геометрической тени на больших расстояниях от импульсных источников (Kulichkov et al. 2015).

Как известно, в области геометрической тени регистрируемый сигнал представляет из себя суперпозицию последовательно приходящих акустических импульсов в виде N и U – волн, распространяющихся вдоль отдельных лучей и соответствующих частичным отражениям исходных импульсов N волны, падающих на тонко-слоистые неоднородности стратомезосферы. Значения фазы Φ коэффициента частичного отражения от неоднородных слоев зависят от толщины слоя, а также от значений вертикальных градиентов квадрата акустического показателя преломления внутри отдельных слоев (Куличков 1989).

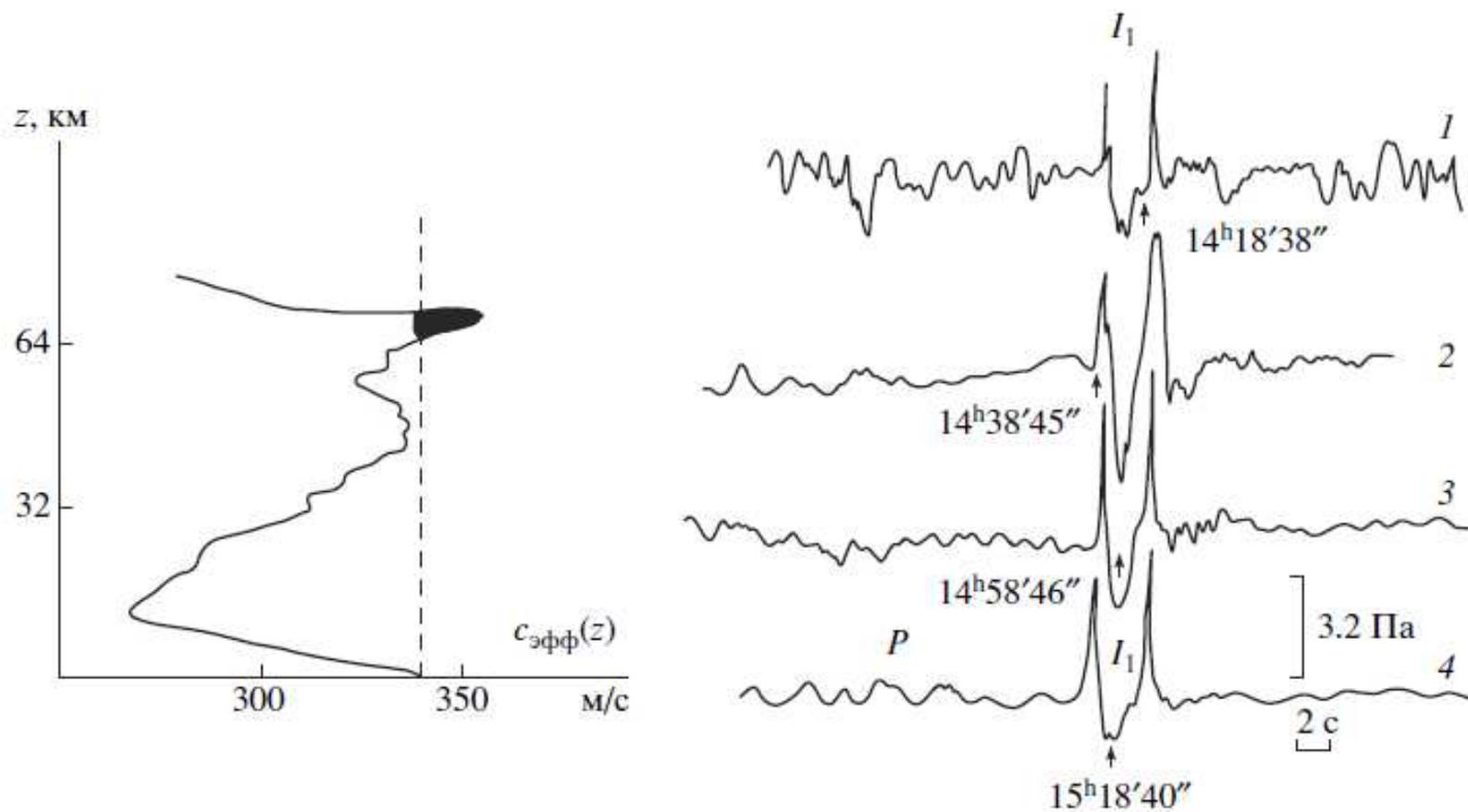
Форма волновых профилей акустических сигналов отраженных от отдельных неоднородных слоев в верхней атмосфере формируется из формы N волны путем добавления к фазе всех её спектральных компонент значений фазы коэффициента отражения Φ в интервале от $\Phi = -\pi/2$ до $\Phi = +\pi/2$. Схематично такая форма будет иметь некоторый промежуточный вид между сигналами на рис. , поскольку в общем случае значения фазы Φ для различных спектральных компонент N волны принимают различные значения. Коэффициент частичного отражения звука от тонких слоев в атмосфере можно определять с использованием различных моделей кусочно-линейного вертикального профиля квадрата акустического показателя преломления (Куличков 1989).



Пример трансформации формы акустического сигнала при различных значениях фазы Φ (значения фазы Φ указаны слева от сигналов) коэффициента частичного отражения от неоднородных слоев. В качестве падающего на слой акустического сигнала рассматривается сигнал в виде N волны (нижний сигнал на левой панели).

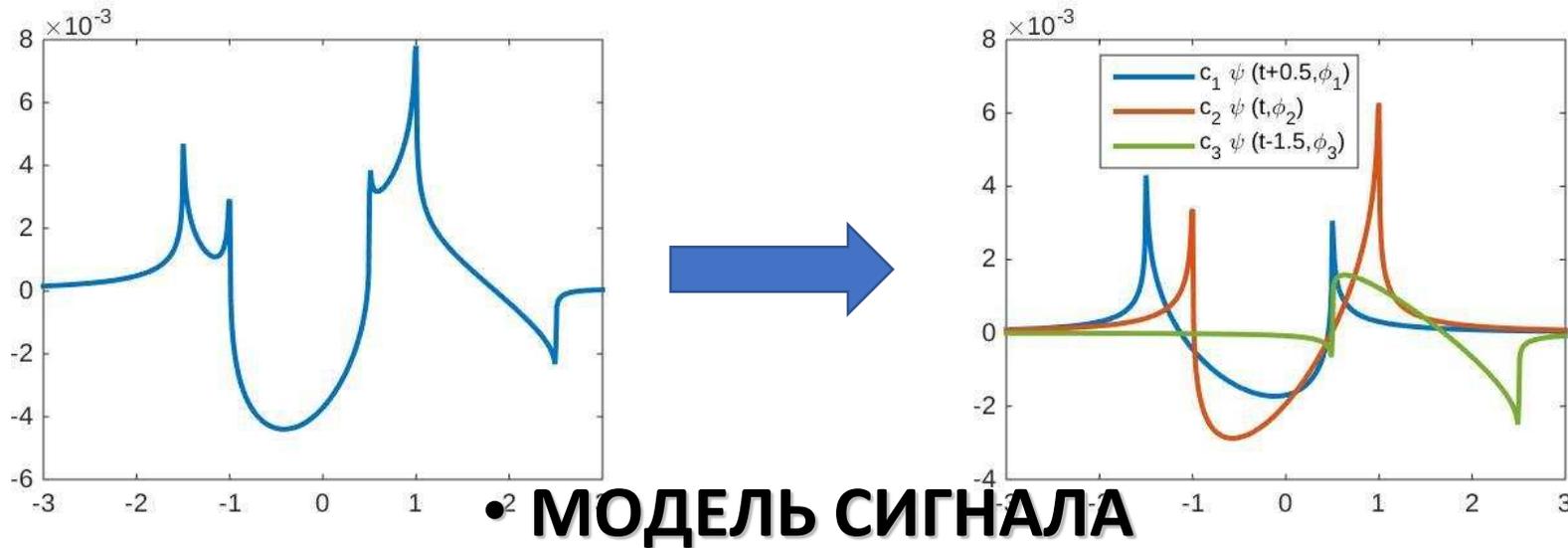
С учетом вышеизложенного, можно определить метод декомпозиции как метод разложения регистрируемого продолжительного акустического сигнала на отдельные его составляющие в виде N и U – волн, соответствующих различным высотам частичного отражения и приходящих в пункт наблюдений с различными интервалами времени.

Предлагаемый метод декомпозиции имеет некоторую схожесть с общеизвестным методом вейвлет анализа (*Welch, Peter D. 1967*), однако в нашем методе регистрируемый сигнал разлагается на отдельные его составляющие N и U – волны, имеющие ясную физическую природу, в то время как в вейвлет анализе соответствующее разложение происходит на некоторые вейвлеты, например - вейвлет Морле (*Welch, Peter D. 1967*), физический смысл которых совсем не очевиден.



Справа – записи инфразвуковых приходов в зоне рефракционной акустической слышимости на расстоянии 300 км от четырех взрывов (1–4) с энергией 20–70 т тнт, произведенных с интервалом 20 мин в дневное время 19.05.1990 г. Слева – профиль эффективной скорости звука $c_{\text{эфф}}(z)$ (область поворота лучей заштрихована). I_1 – локализованный (импульсный) приход; P – осциллирующий приход.

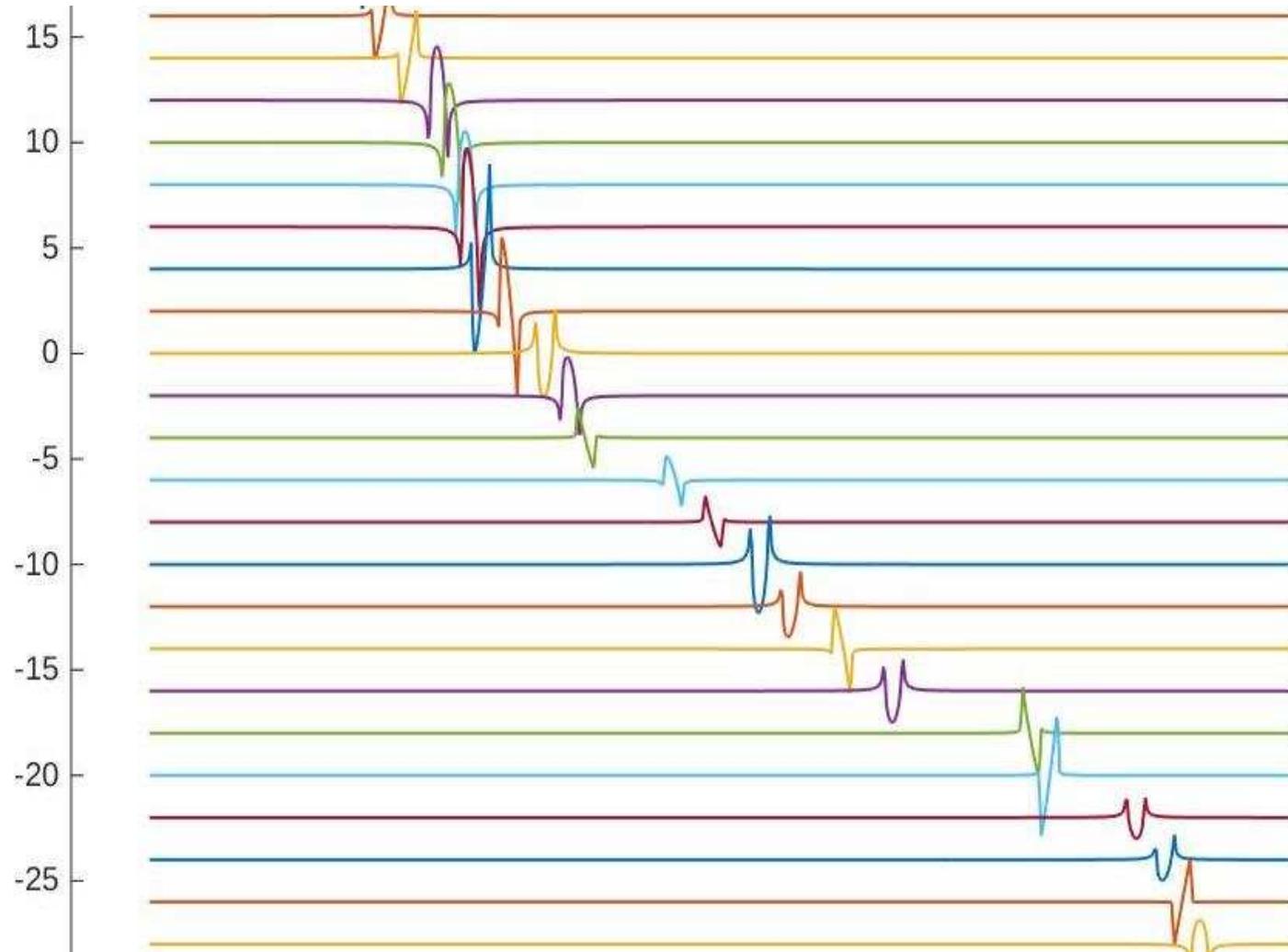
Вторым методом был метод разложения (декомпозиции) регистрируемого продолжительного акустического сигнала на отдельные его составляющие в виде импульсов N и U – волн, соответствующих различным высотам частичного отражения от неоднородностей и приходящих в пункт наблюдений с различными интервалами времени



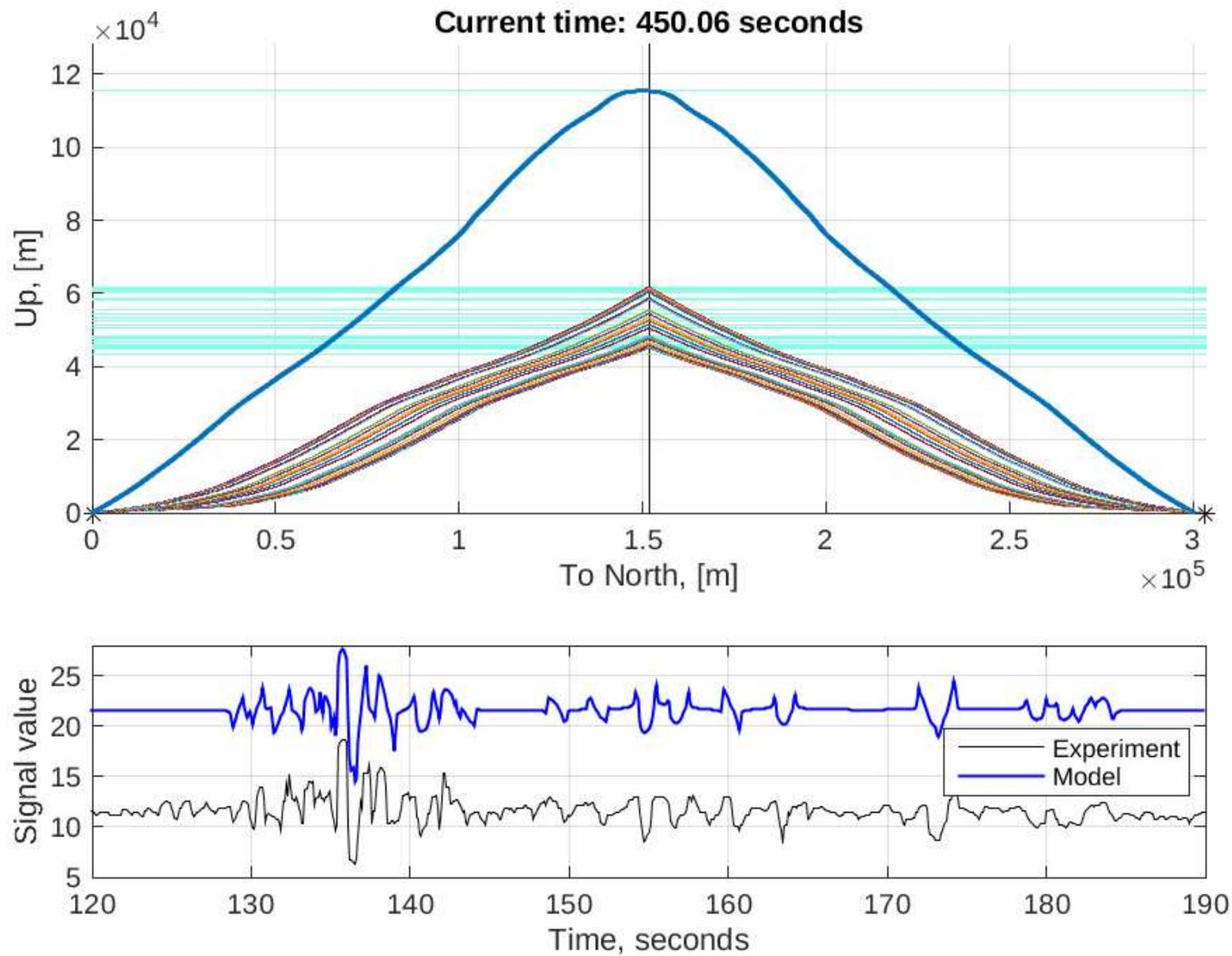
• (суперпозиция N и U – волн)

- *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.*

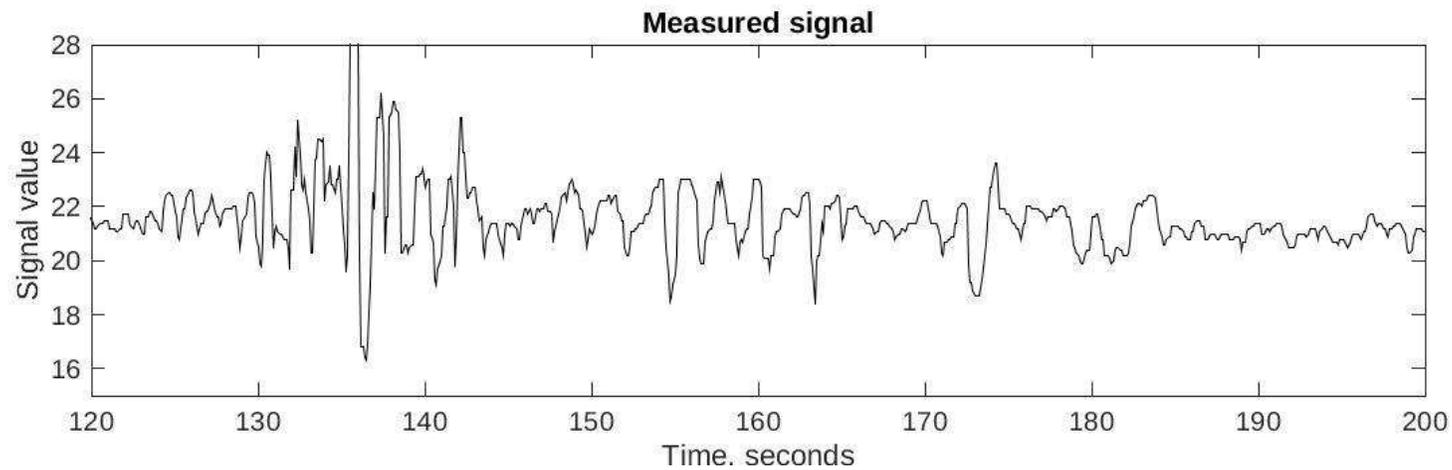
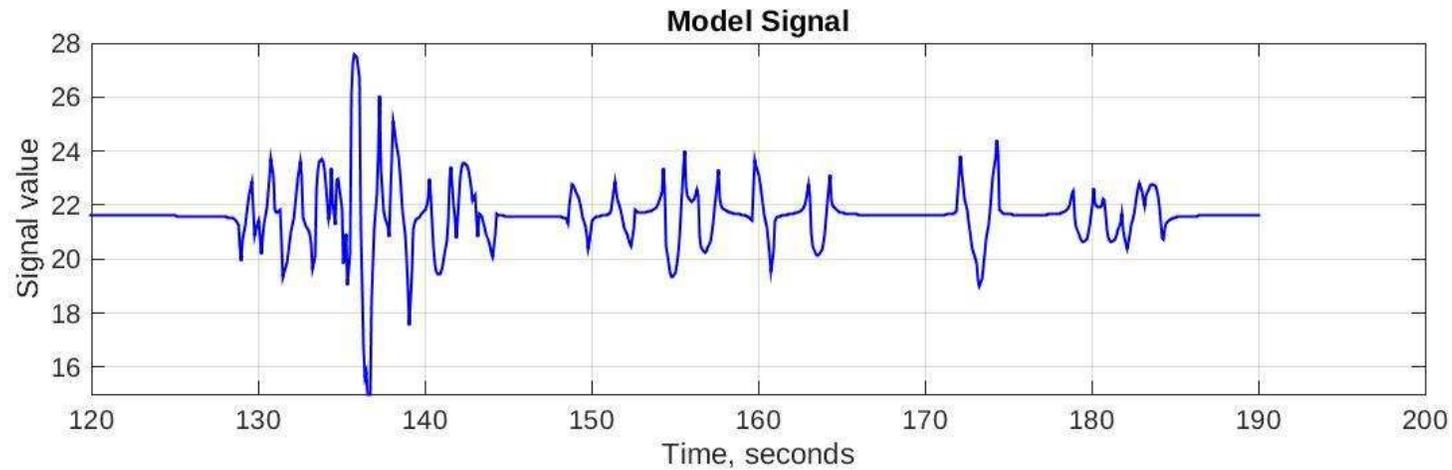
МЕТОД ДЕКОМПОЗИЦИИ РЕГИСТРИРУЕМОГО СИГНАЛА



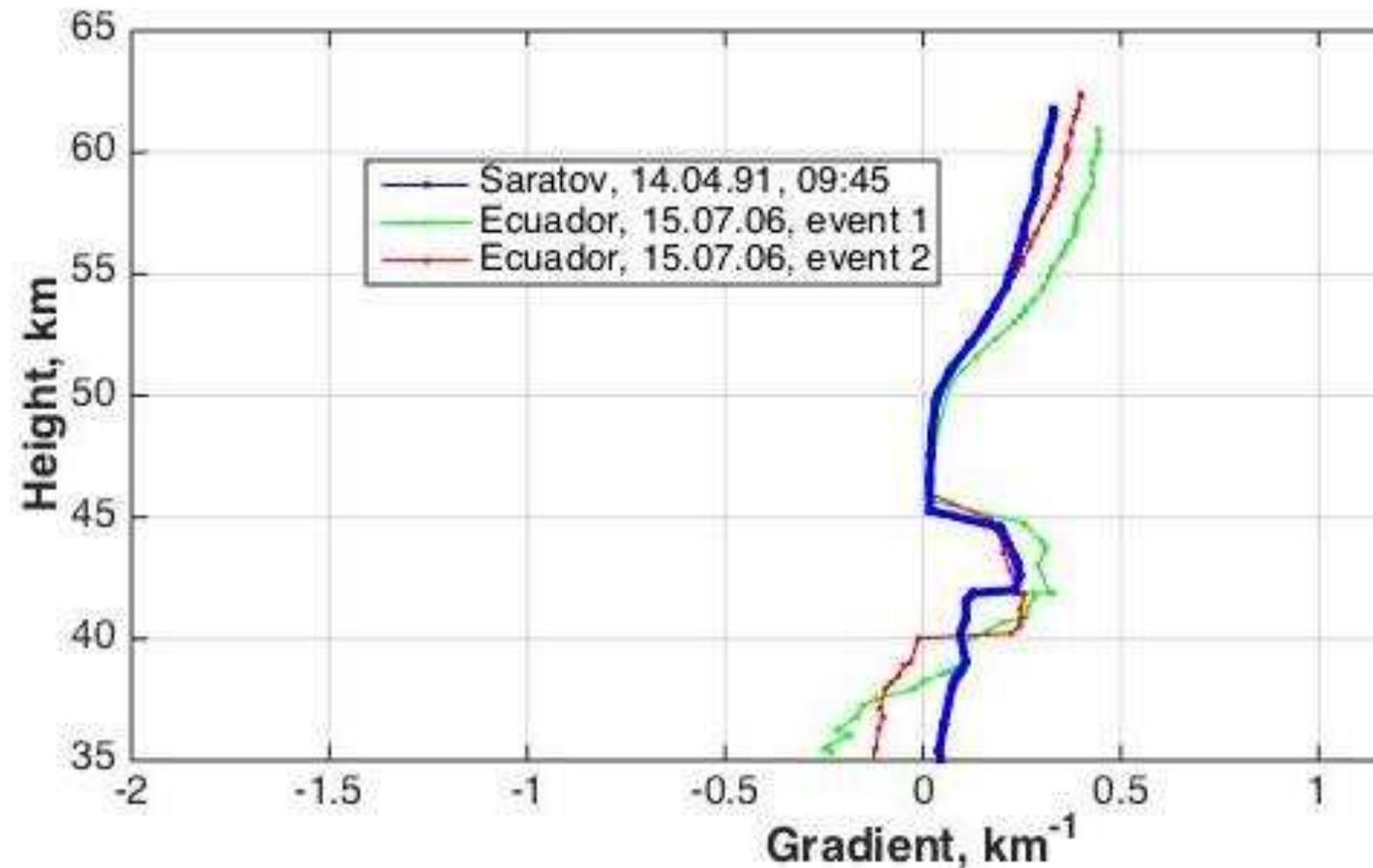
24

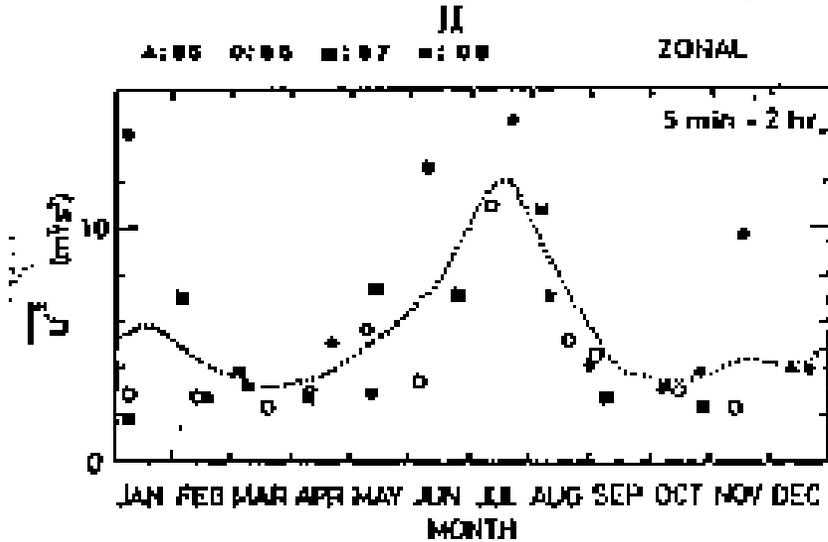
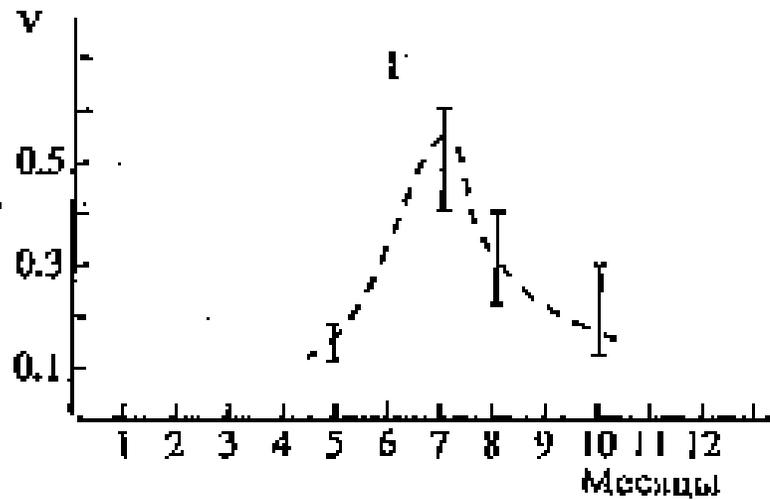


СРАВНЕНИЕ данных измерений 14.04.91 и результатов моделирования



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, JGR VOL. 117, 2012; Assink et al, JGR - справа**

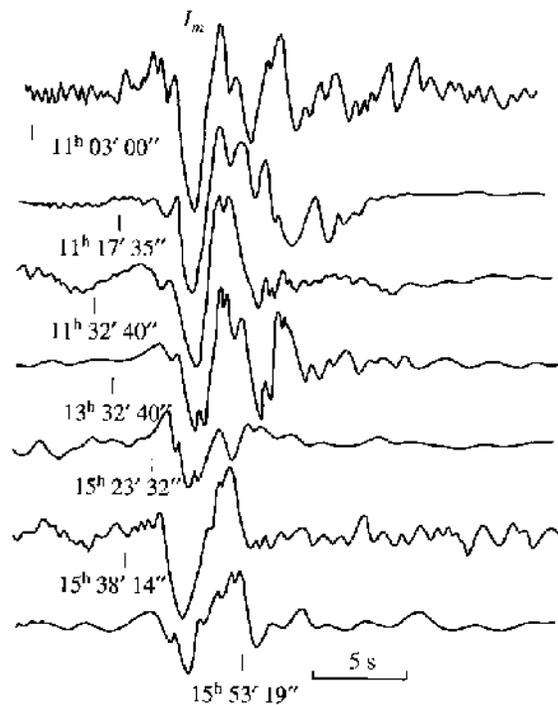
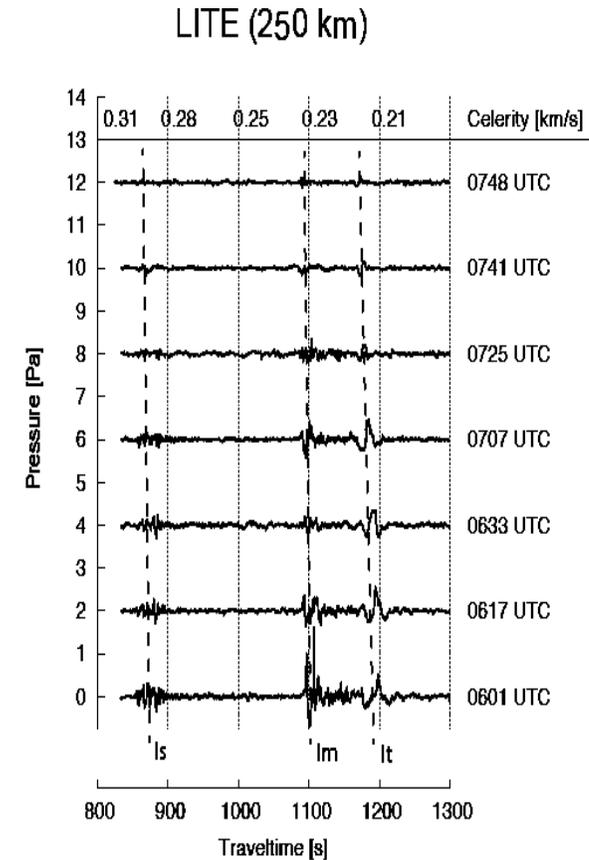
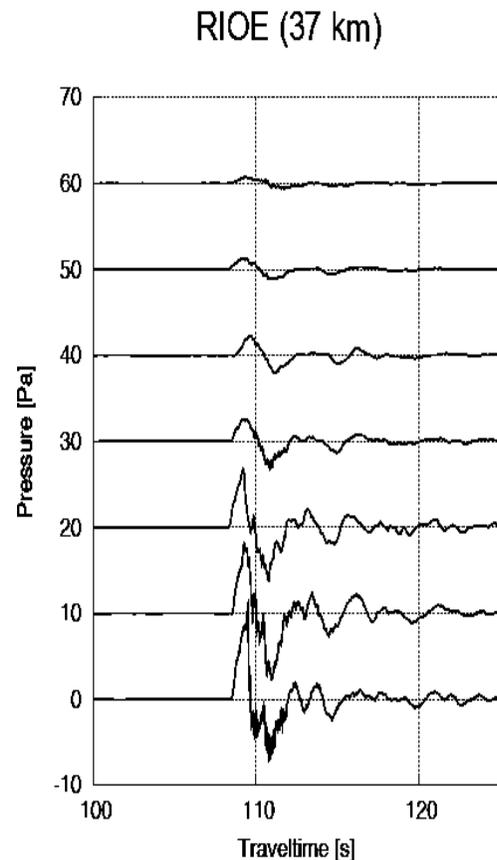
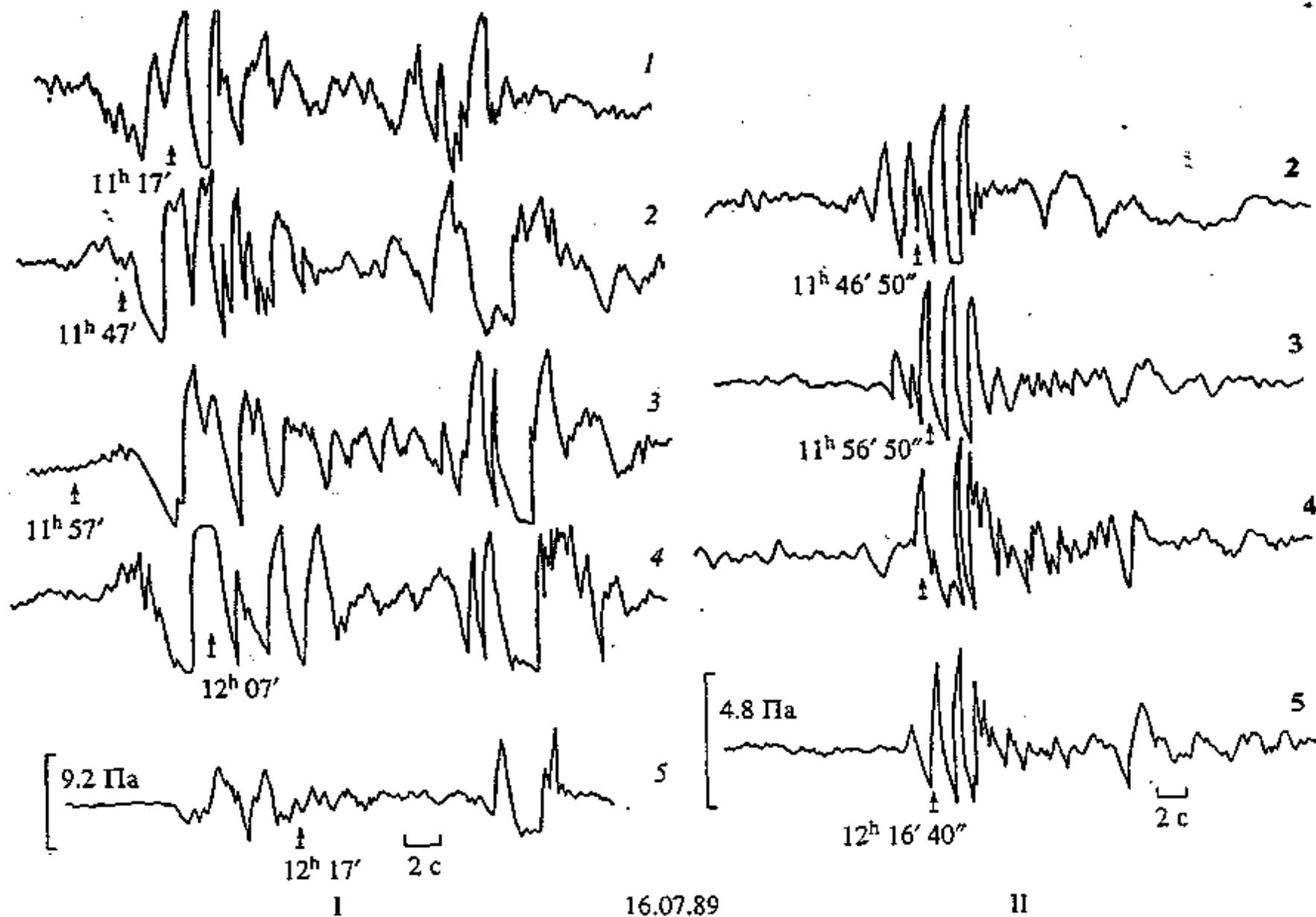


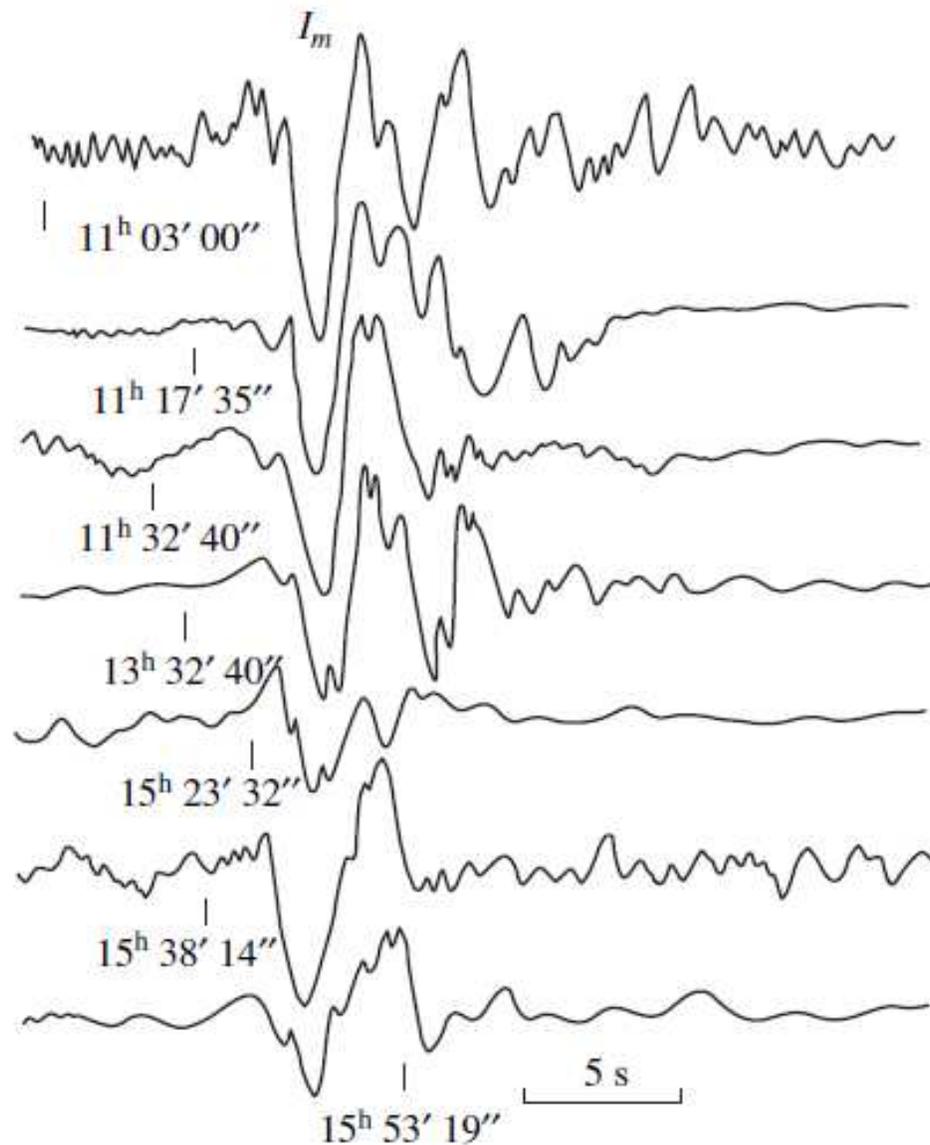
Fig. 5. Localized (pulsed I_m) infrasonic signals recorded in the geometric shadow zone at a distance of 300 km from the explosions equivalent to 20–70 t of TNT implemented on October 20, 1990.



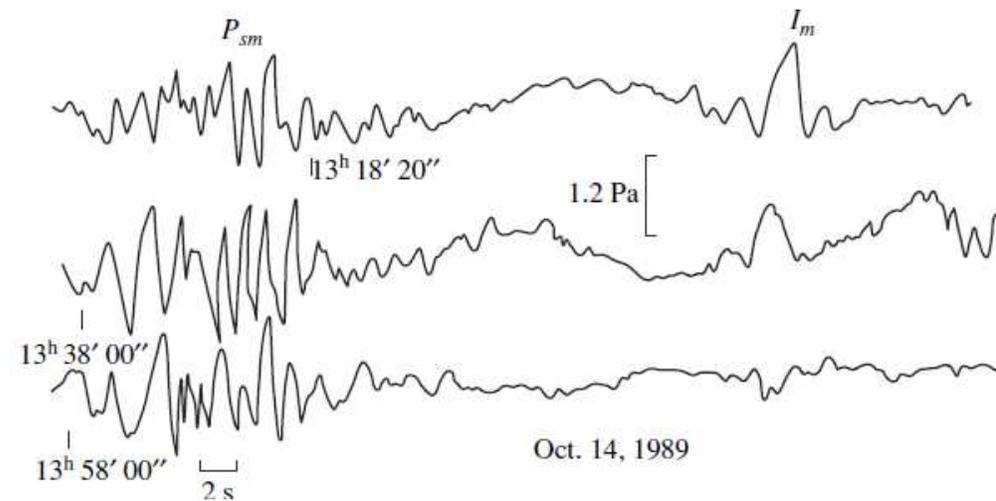


Регистрограммы акустических сигналов, наблюдавшихся в западном (I) и северном (II) направлениях от взрывов, проводимых 16 июля 1989 года.

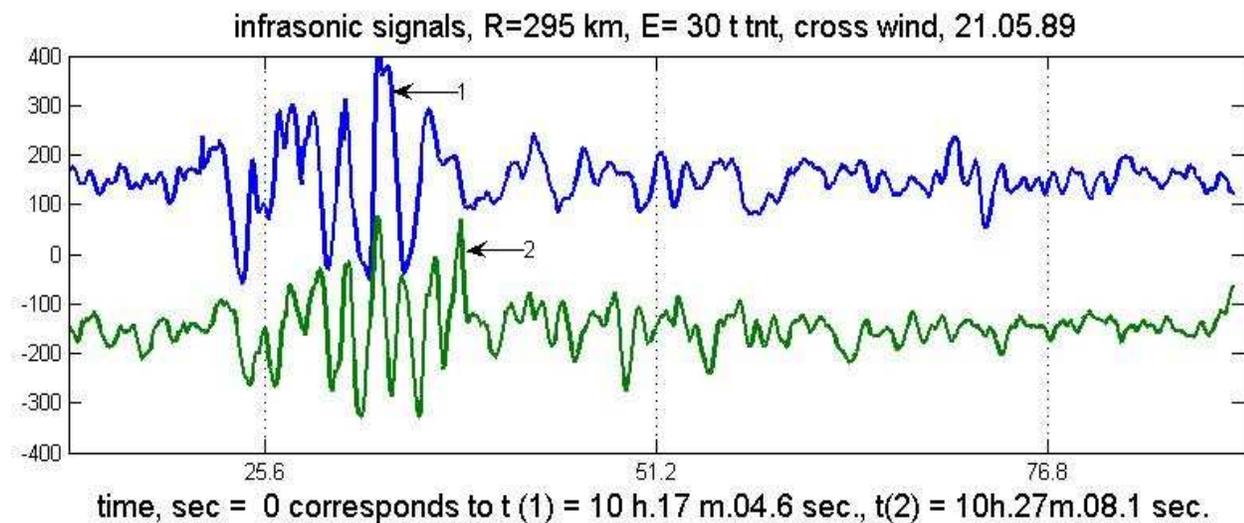
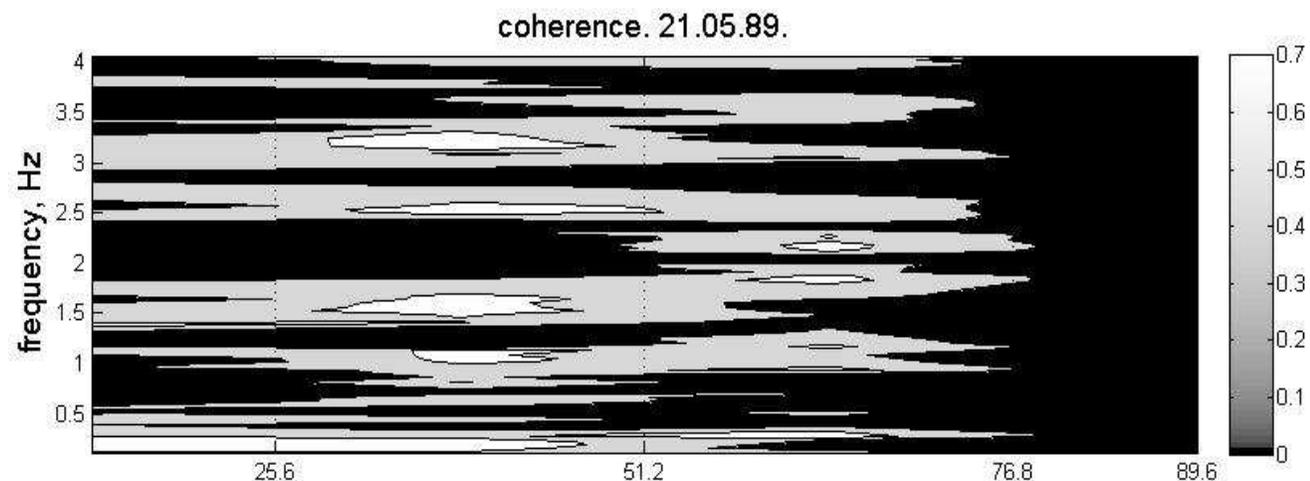
**ИНФРАЗВУКОВЫЕ СИГНАЛЫ
В ЗОНЕ ТЕНИ $r \sim 305-307$ км
Отражение от слоя сдвига ветра
“wind – corner” ($z \sim 70$ км.)**

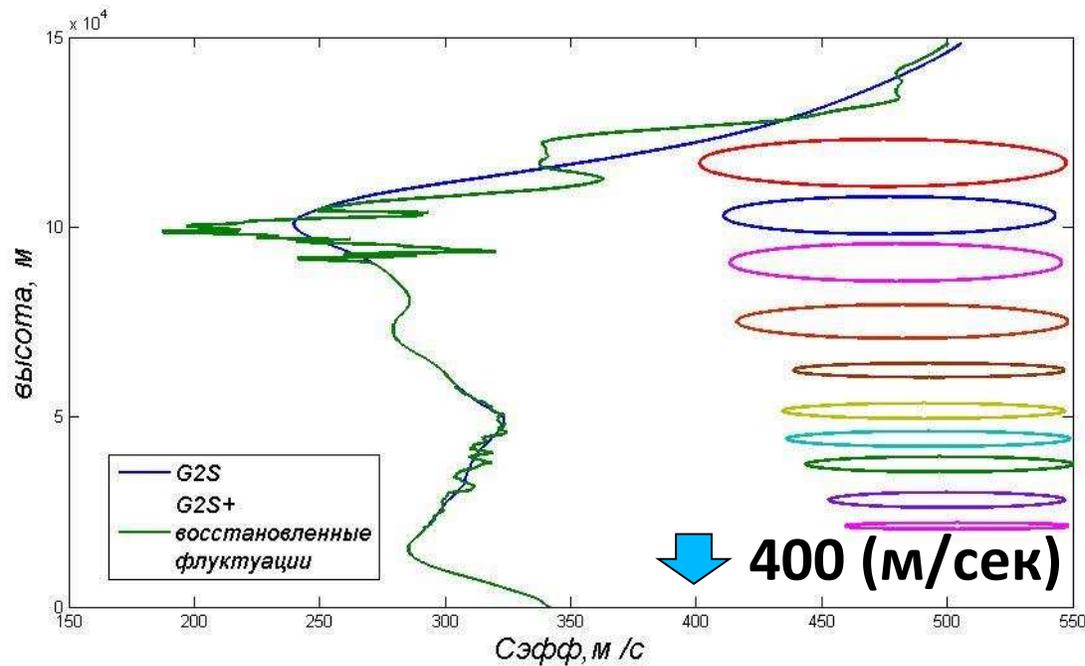


Localized (pulsed I_m) infrasonic signals recorded in the geometric shadow zone at a distance of 300 km from the explosions equivalent to 20–70 t of TNT implemented on October 20, 1990.



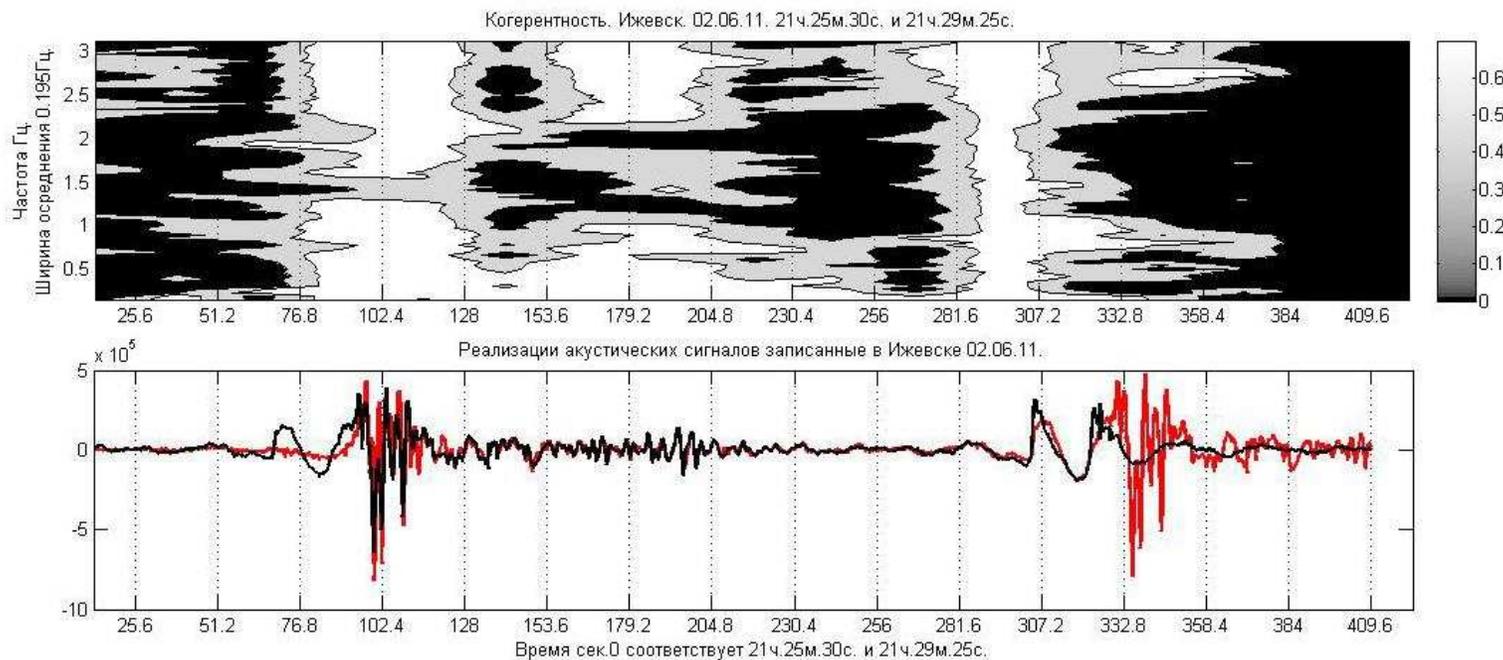
ЗОНА ТЕНИ (E= 30 т ТНТ; $\Delta T = 20$ мин.; R = 295 км)





◆ тонкая слоистая структура атмосферы

◆ когерентность между сигналами от взрывов

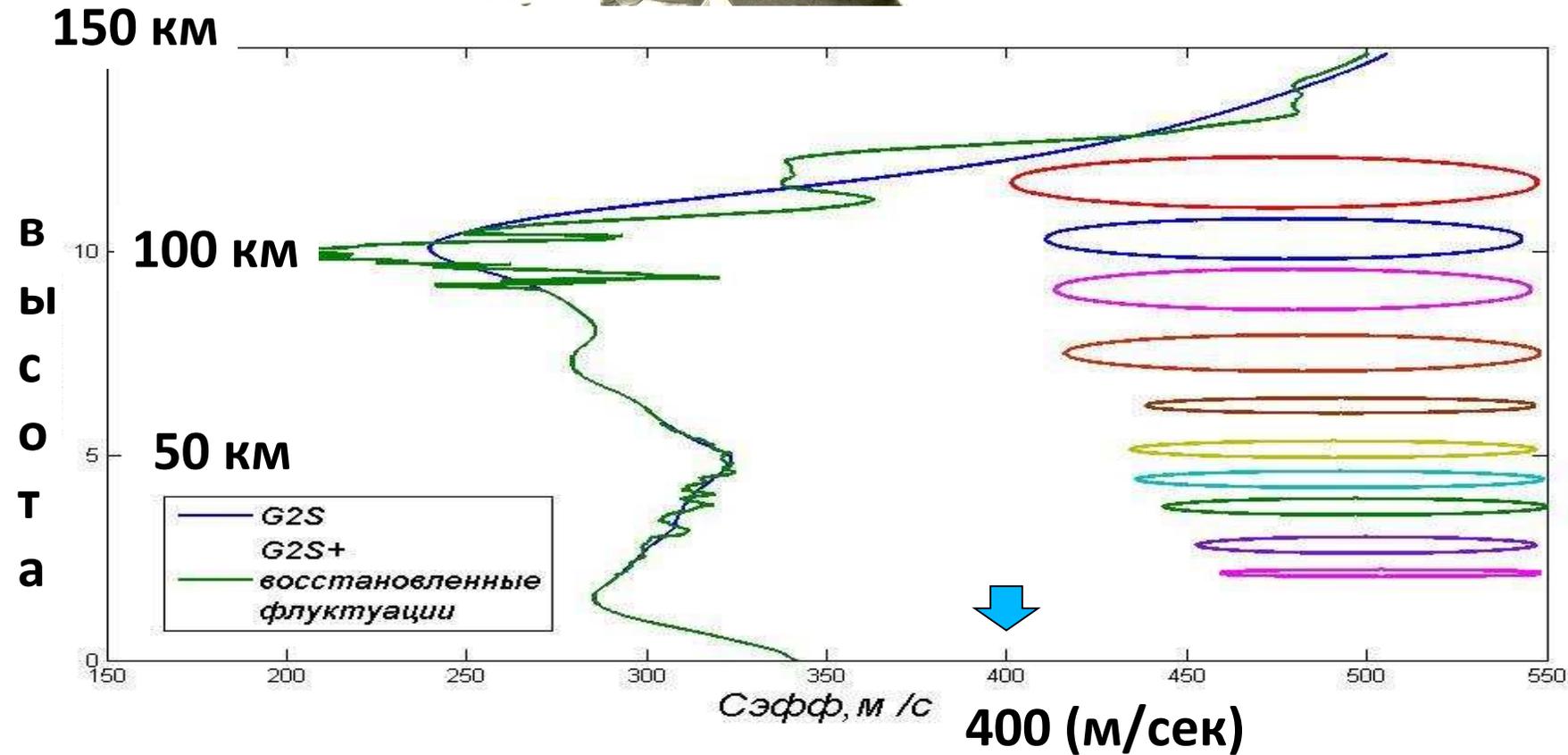


- ◆ Акустическим методом обнаружено наличие в атмосфере и нижней ионосфере долгоживущих тонко-структурных слоистых неоднородностей температуры и ветра, имеющих аномально большие вертикальные градиенты.
- ◆ Впервые установлено, что тонкая слоистая структура заполняет практически всю толщу атмосферы (по 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!