

**Съезд учителей физики
30 июня (четверг), 11-00**

Современная акустика и физика нелинейных волн

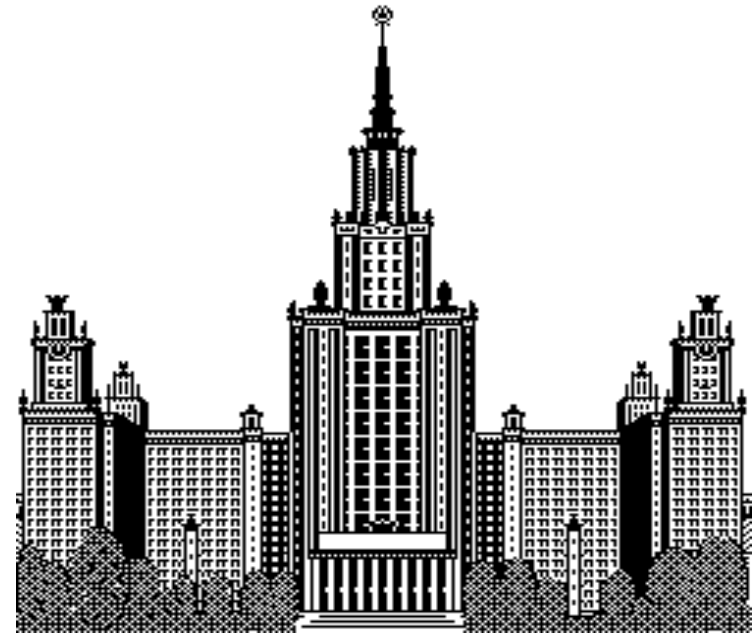
**О текущих и перспективных исследованиях в
области прикладной физики, связанных с
акустикой**

Руденко О.В.

Физфак МГУ, Лен горы 119991

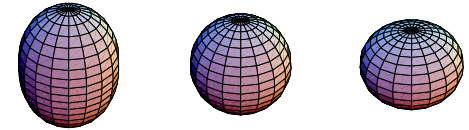
rudenko@acs366.phys.msu.ru

**Кафедра акустики МГУ – единственная
кафедра акустики на физических
факультетах классических университетов**

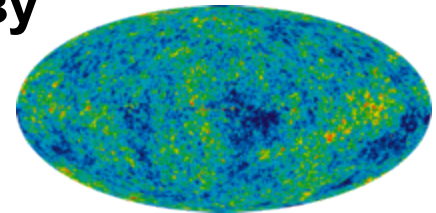
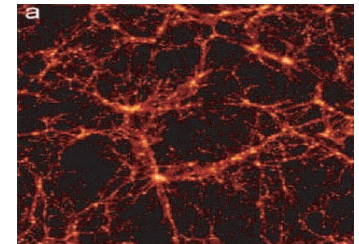


Принято считать, что акустика изучает главным образом речь, слух, музыкальные инструменты, аудиосистемы, концертные залы.

Это – распространенная и давно устаревшая точка зрения.



Акустические явления имеют место всюду. Диапазон масштабов – от 10^{-13} (капельная модель атомного ядра) до галактических (формирование структур галактик). Акустические волны были ответственны за формирование Вселенной сразу после Большого Взрыва.



Акустические проблемы решаются во всех 7 естественно -научных отделениях РАН. Число специалистов, занимающихся акустикой и ее приложениями, сравнимо с числом всех физиков. **Основные приложения** – медицина, геофизика, подводная связь, материаловедение, промышленность, разведка ископаемых и многое другое.

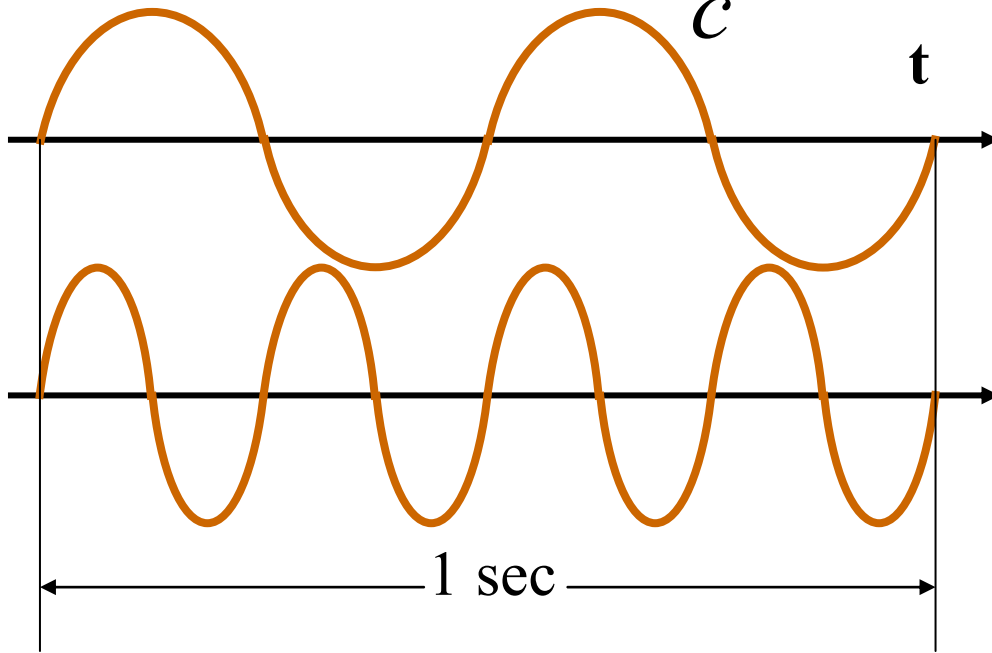
Акустические волны – это коллективные колебания частиц среды и связанные с ними колебания давления и плотности, бегущие со скоростью звука, переносящие энергию без существенного переноса массы среды



Акустическое давление в монохроматической волне изменяется во времени и в пространстве так:

$$p = A \sin \omega \left(t - \frac{x}{c} \right)$$

A -амплитуда, $\omega/2\pi$ -частота, c скорость звука



2 цикла за 1 секунду:
частота равна 2 Гц

4 цикла за 1 секунду:
частота равна 4 Гц

Акустические волны
правильно выбранной
частоты способны
проникать всюду

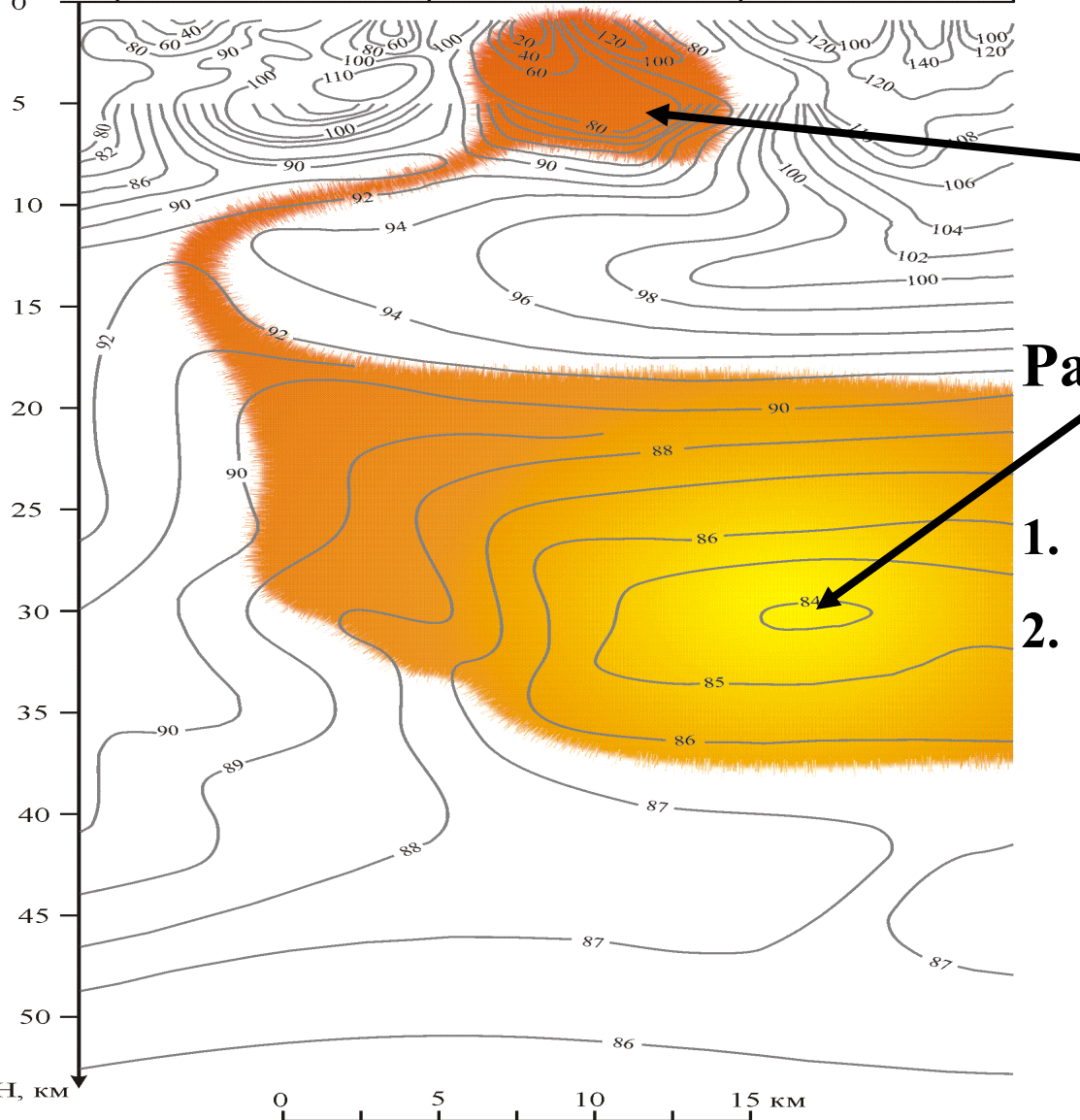


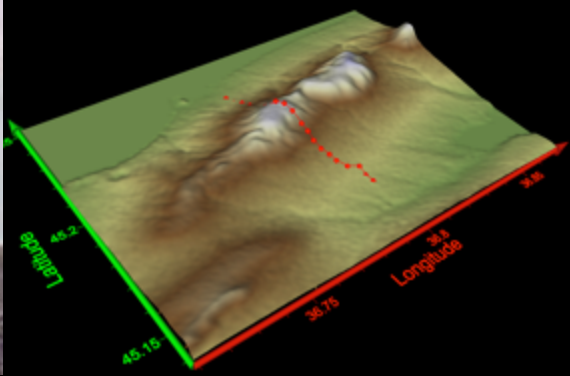
АРХИПЕЛАГ ЧАГОС

Акустические волны низких частот способны распространяться на тысячи км в океане, проникать сквозь Землю

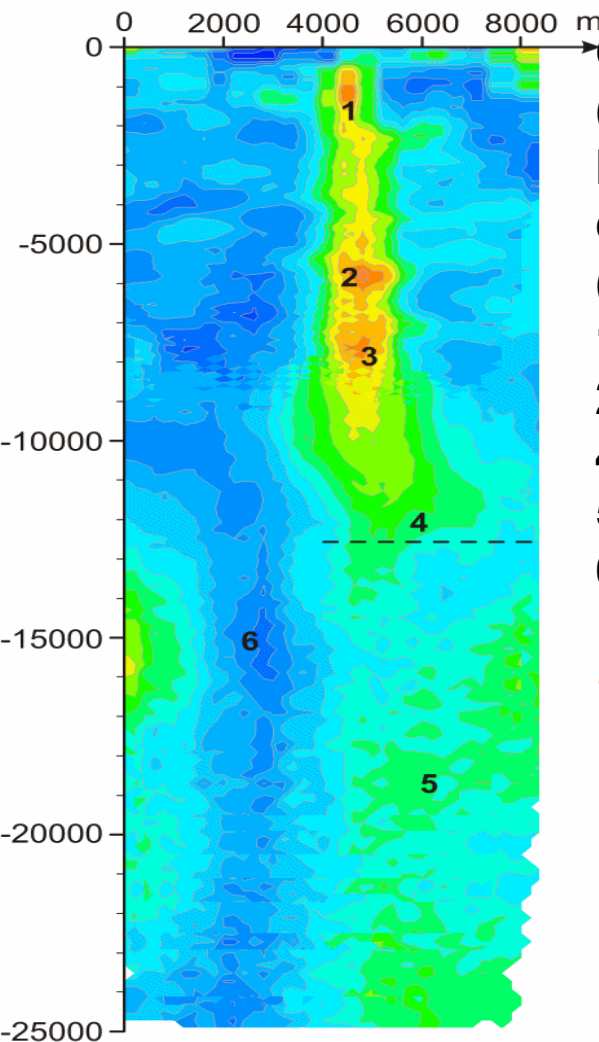


Вулкан Эльбрус



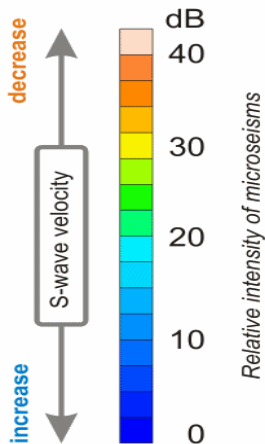


■ Зондирующий сигнал: естественный микросейсмический шум, источники которого - волнение моря и крупные атмосферные вихревые структуры над океаном

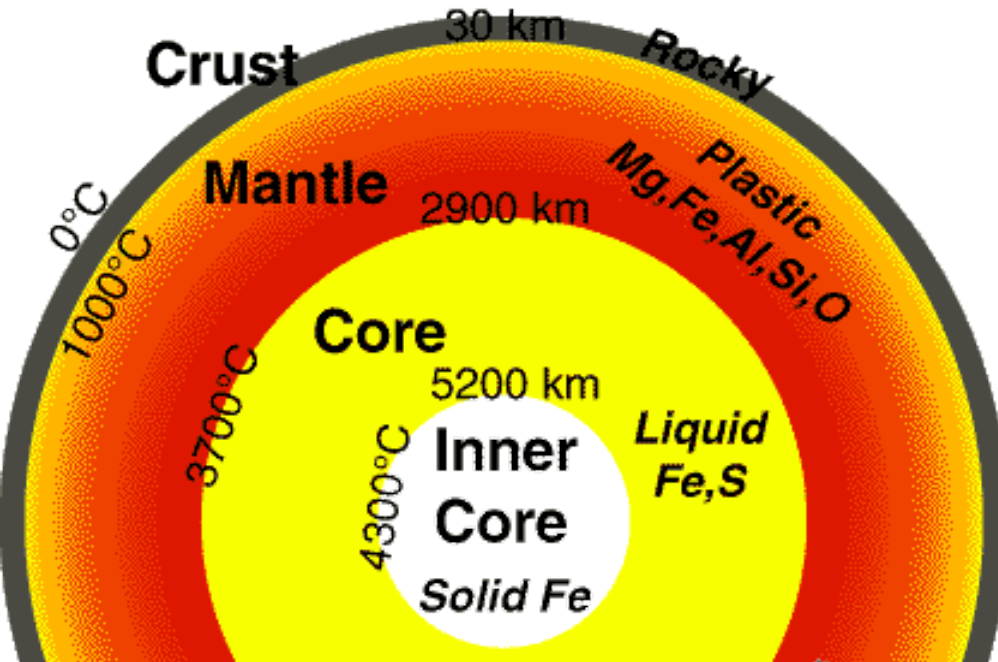


Строение грязевого вулкана горы Карабетова (методом НЧ микросейсмического зондирования). Вертикальный разрез по контрастам сейсмических скоростей (слева) вдоль геофизического профиля (вверху).

- 1 – грязевулканический резервуар;
- 2, 3 – глубинные области накопления грязебрекчии;
- 4 – область перехода к фундаменту;
- 5 – флюидопроводящие структуры
- 6 – консолидированные горные породы.

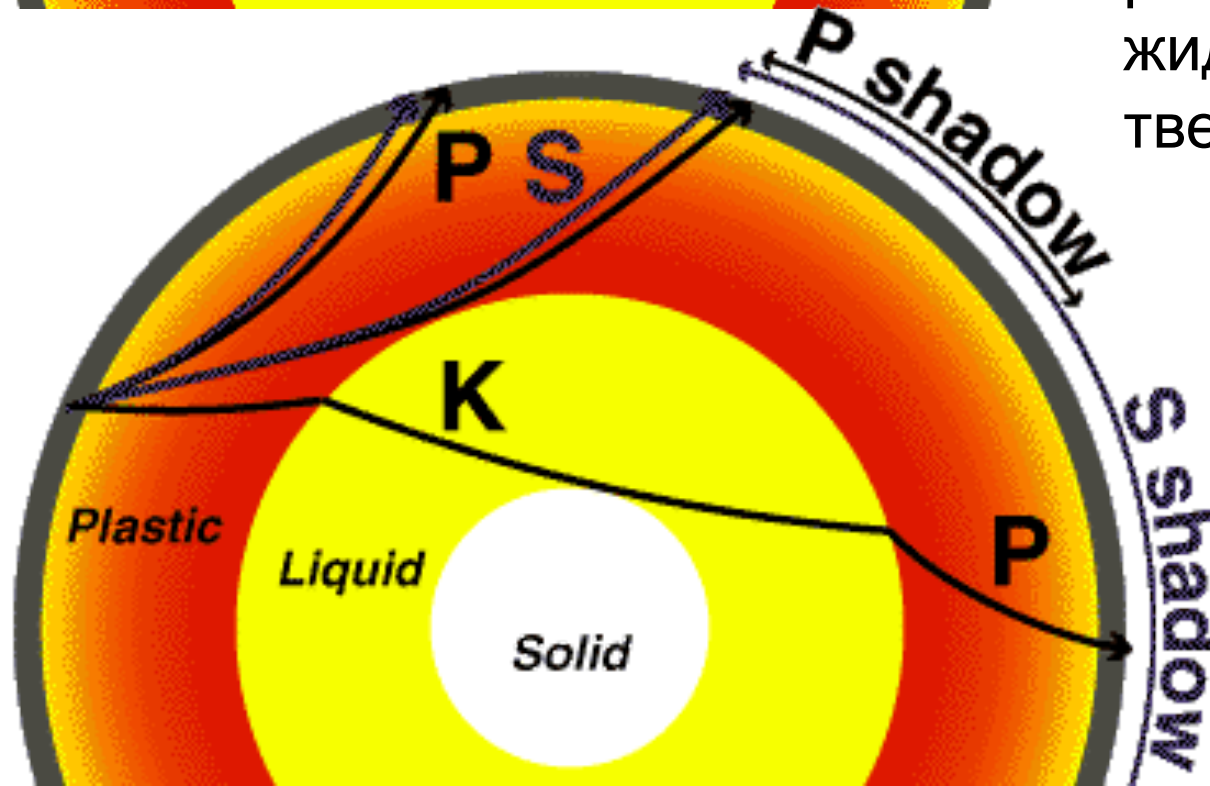


Работы на грязевых вулканах Тамани (Лаб.прикладной геофизики и вулканологии ИФЗ РАН, рук. Собисевич А.Л.)



Структура ядра Земли установлена акустическими методами

2 типа акустических волн распространяются по-разному. Волны сжатия **P** распространяются как в жидкостях, так и в твердых телах.

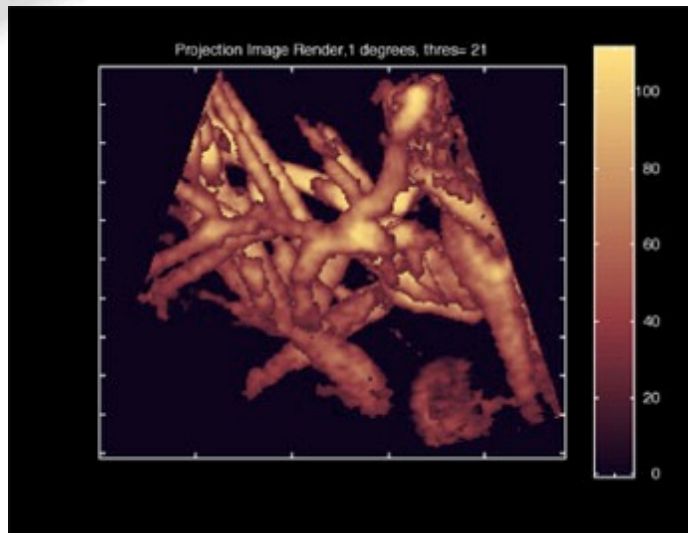


Сдвиговые волны **S** в жидкостях и в газах распространяться не могут. Поэтому они не проходят через жидкое внешнее ядро Земли

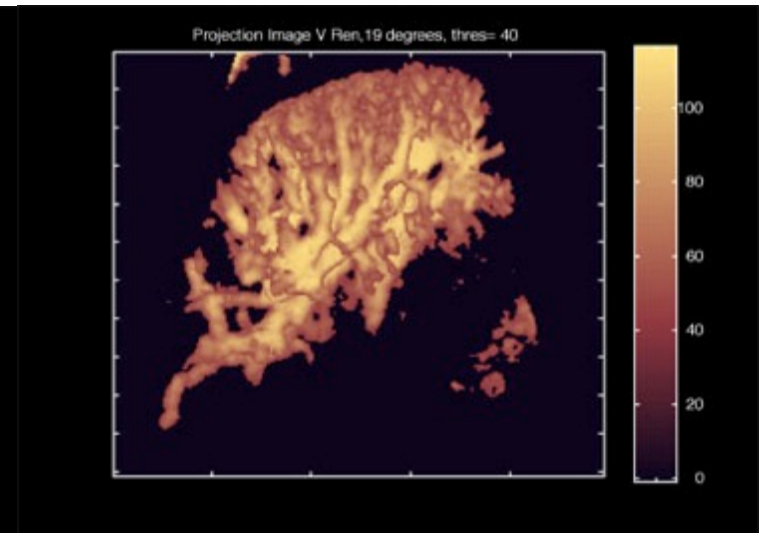
АКУСТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ В МЕДИЦИНЕ



Ультразвуковые
изображения лиц еще
не родившихся детей



3D CPA Image of Kidney



3D CPA Image of Liver



Сформировавшиеся направления:

Классич.линейная теория, волны в неодн.движ.средах, прямые и обратные задачи дифракции, ак.томография

Нелинейная акустика («сильные», интенсивные волны)

Речь, слух, ак-ка эхол.животных, психофиз., физиологич.ак-ка

Ак.связь, радиовещание, электроак-ка

Муз.ак-ка, архитектурная ак-ка, строительная ак-ка

Шумы, вибрации, структурная ак-ка, ак.экология

Ак-ка океана, гидролокация, гидроакустика

Ак-ка атмосферы, авиац.ак-ка, аэроак-ка

Молекулярная ак-ка, квантовая ак-ка, ак.спектроскопия

Кристаллоак-ка, акустоэлектроника, акустооптика, оптоакустика

Ак-ка ТТ, геоак-ка (сейсмика), ак.наследств.гистерез.сред

Ак.диагностика и неразр.контроль в промышл., строит., мед., геофизике

Медицинская и биофизич.акустика

Наноакустика

Некоторые известные люди, занимавшиеся в АН СССР и РАН преимущественно акустикой

Андреев Н.Н.- Академик (акустика)

Бреховских Л.М. – Академик (океанология)

Акуличев В.А. – Чл-корр (механика) Академик (океанология)

Бабешко В.А. – Академик (механика)

Гуляев Ю.В. - Чл-корр (радиофиз., эл-ка) Академик (материалы выч.техн. и диагностика)

Накоряков В.Е. - Чл-корр (механика) Академик (теплофизика)

Нигматулин Р.И. Чл-корр (механика) Академик (механика - океанология)

Пустовойт В.И. Чл-корр (автоматизация) Академик (приборостроение)

Техническая диагностика:

Алешин Н.П. – Академик (металлургия и диагностика материалов)

Клюев В.В. - Академик (машиностроение)

Акустические исследования ведутся, часто дублируя друг друга, в 7 Отделениях РАН, прежде всего, специалистами по механике, математике, наукам о Земле, машиностроению, материаловедению и биологии.

Кроме того, во многих отраслях – в прикладных институтах и КБ.

«Центробежные» тенденции полезны, пока не появится необходимость развивать новое направление – вне рамок имеющихся оргструктур, технологий и кадрового потенциала

Возможны разные точки зрения. Многие считают, что:

Акустика жидкостей и газов – это раздел механики (**гидро- и газодинамики**), изучающий колебательные движения сжимаемой среды.

Поскольку в акустике широко используется анализ спектров, методы обработки **акустич сигналов** – это часть **радиофизики**, понимаемой «в широком смысле»

Звук в твердых телах – это **ФТТ** или динамическая **теория упругости**

Звук в океане – это **океанология**

Звук в атмосфере – это физика **атмосферы**

Звук в Земле – это **сейсмика** (Книга J.E.White “Underground Sound”, Elsevier, 1983, появилась в русском переводе как «Возбуждение и распространение сейсмических волн»)

Ультразвук в медицине – это **медицинская техника**

Методы **акустической диагностики** материалов и структур – это **пром техника**

Акустические методы строительного мониторинга – это **строительство**

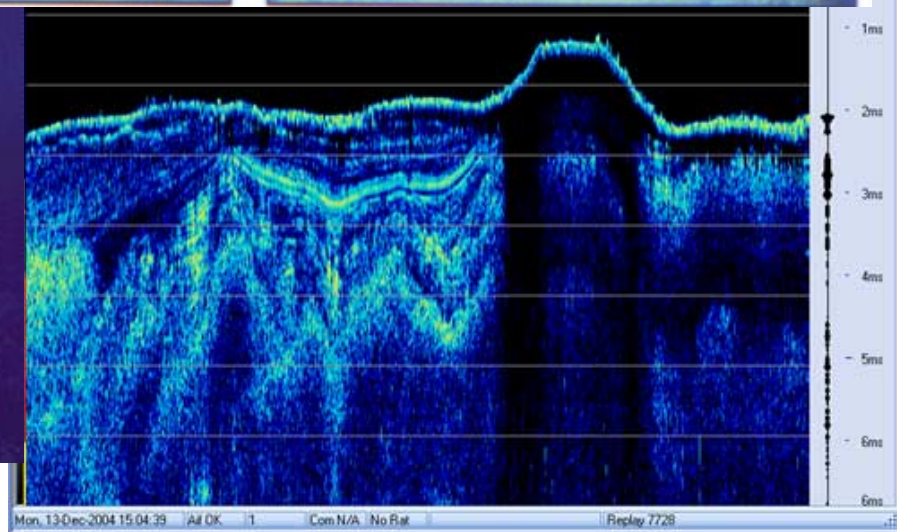
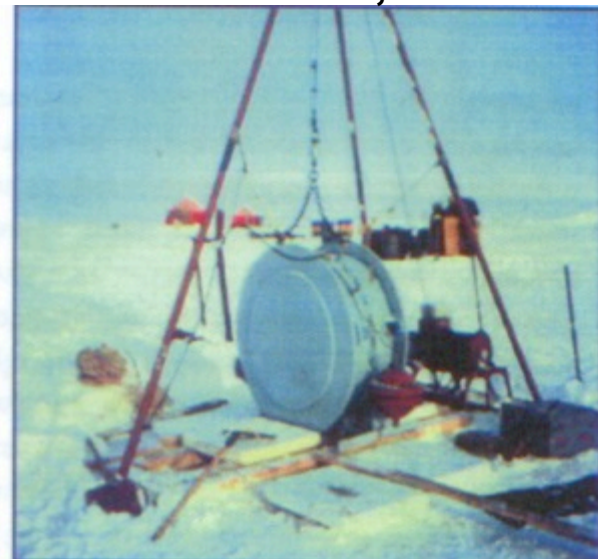
Снижение шума самолетов, автомобилей, кораблей – это **авиация, авто- и кораблестроение** (Акустический Институт вышел из состава АН СССР и перешел в Минсудпром, поскольку сочли, что вся акустика – это гидролокация. Сейчас АКИН стал филиалом ЦНИИ им. Крылова, поскольку решили: вся акустика – это корабельная акустика).

Отношение неспециалистов к **акустике** характеризуется ее сравнением с **оптикой**: «Лучше 1 раз увидеть, чем 100 раз услышать»

Примеры качественно новых проблем, потребовавших участия физиков

Низкочастотные (70-600 Гц) гидроакустические излучатели ЭМ типа, созданные в ИПФ РАН

Совместно с ИОФ РАН



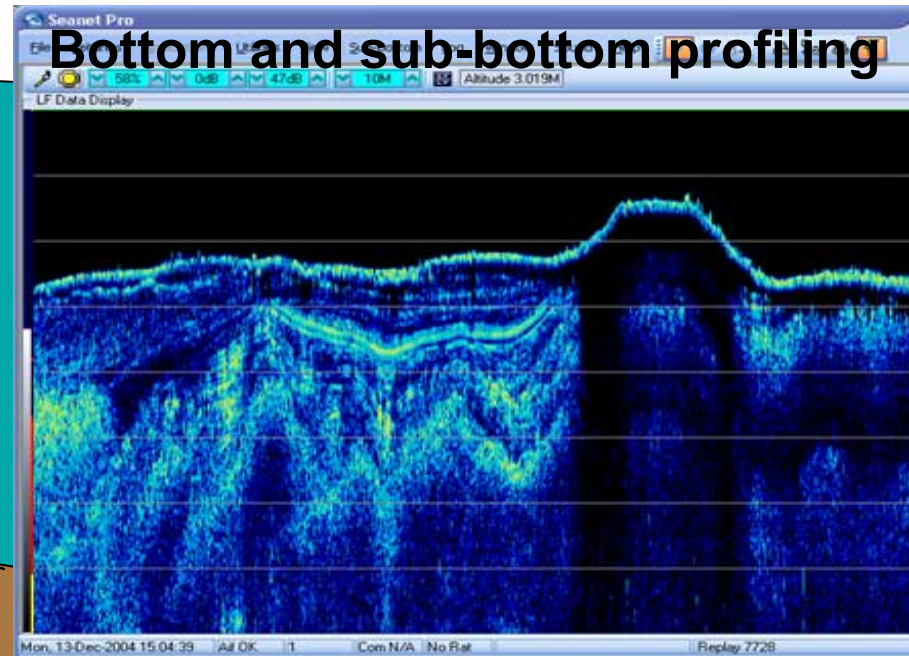
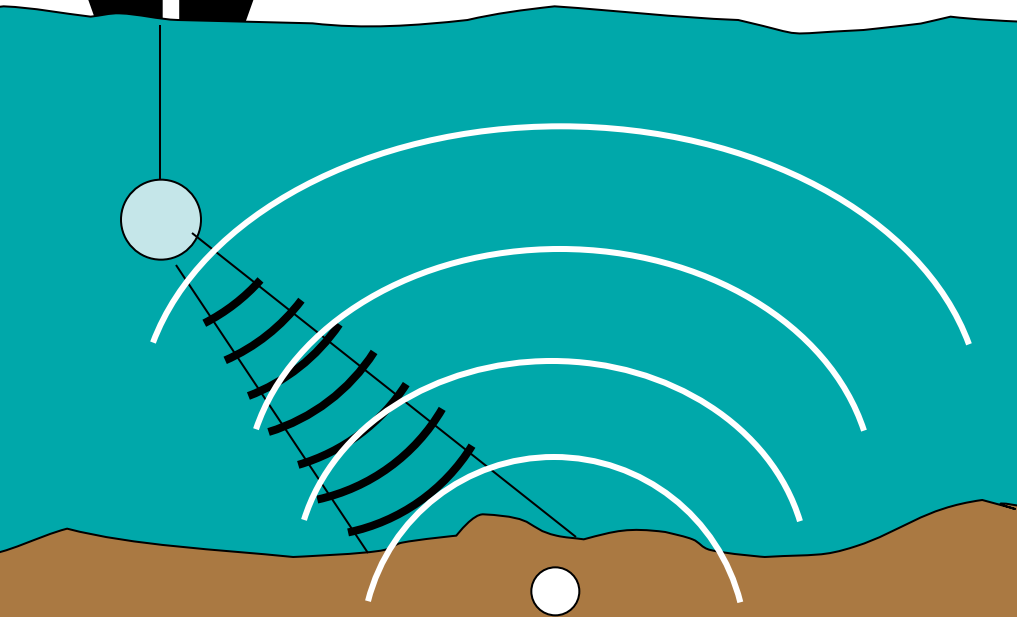
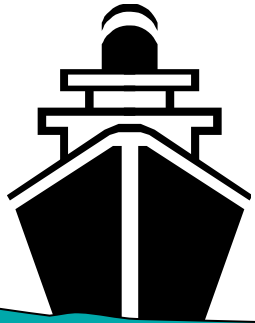
Освоение Мирового океана, разведка и добыча мин ресурсов, нефть на шельфе, подводная связь, ориентация под водой

Профилирование дна и слоев под дном (нелинейный гидроакустич НЧ излучатель – МГУ, ТРТИ)

ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ ГИДРОЛОКАТОР

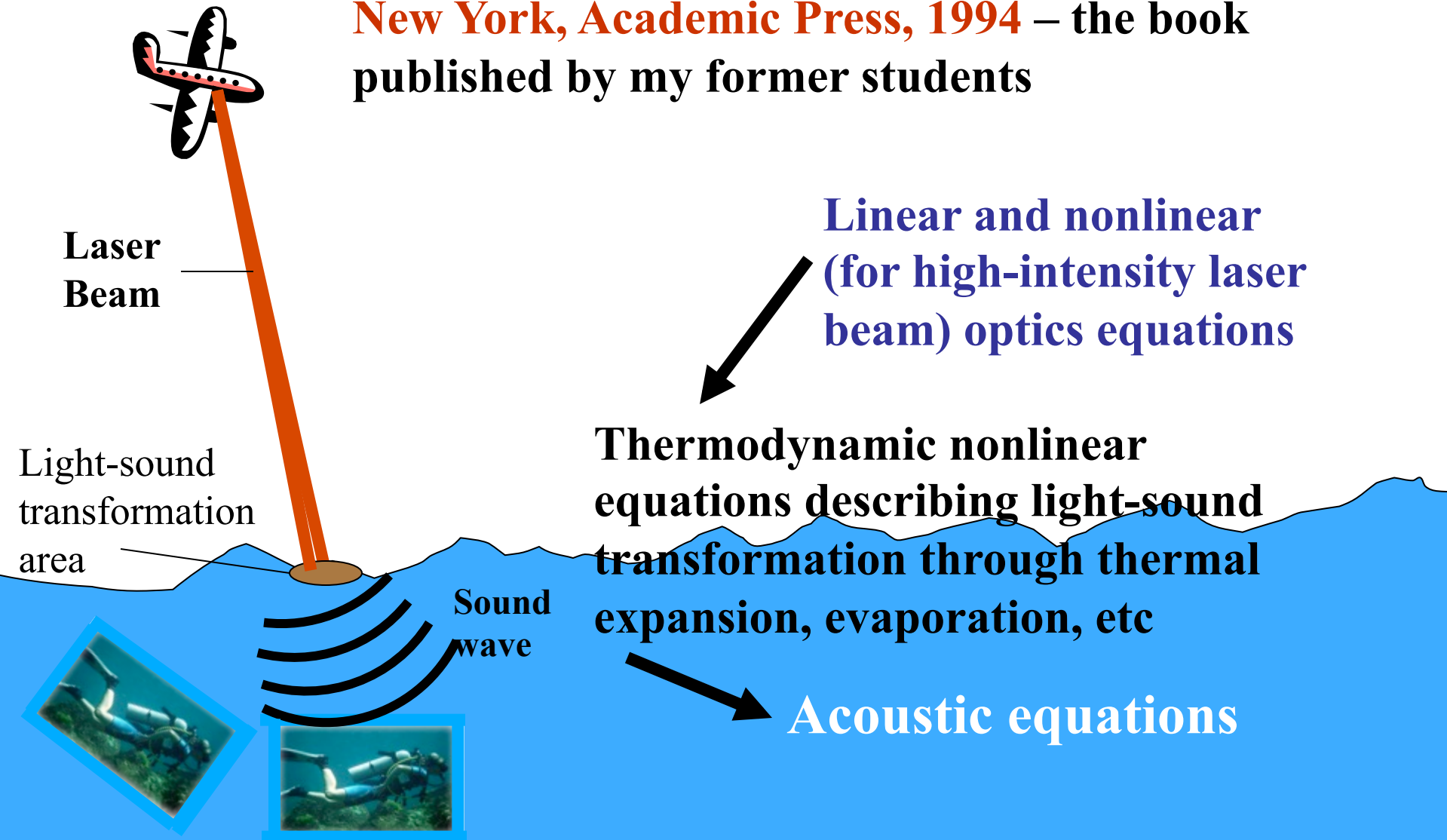
Используется для профилирования дна, рыболокации, поиска затонувших объектов, изучения донных слоев. Инженерные методы расчета приборов развиты физиками (See details in the book: **V.K.Novikov, O.V.Rudenko, V.I.Timoshenko** “Nonlinear Underwater Acoustics”, American Inst.of Physics, 1987 – translated from Russian ed., 1981)

$$\frac{\partial}{\partial \tau} \left(\frac{\partial p}{\partial z} - \frac{\varepsilon}{c^3 \rho} p \frac{\partial p}{\partial \tau} - \frac{b}{2c^3 \rho} \frac{\partial^2 p}{\partial \tau^2} \right) = \frac{c}{2} \Delta_{\perp} p$$



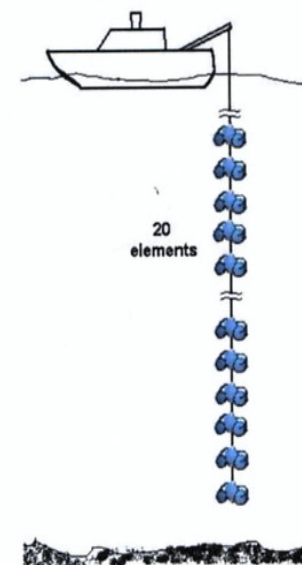
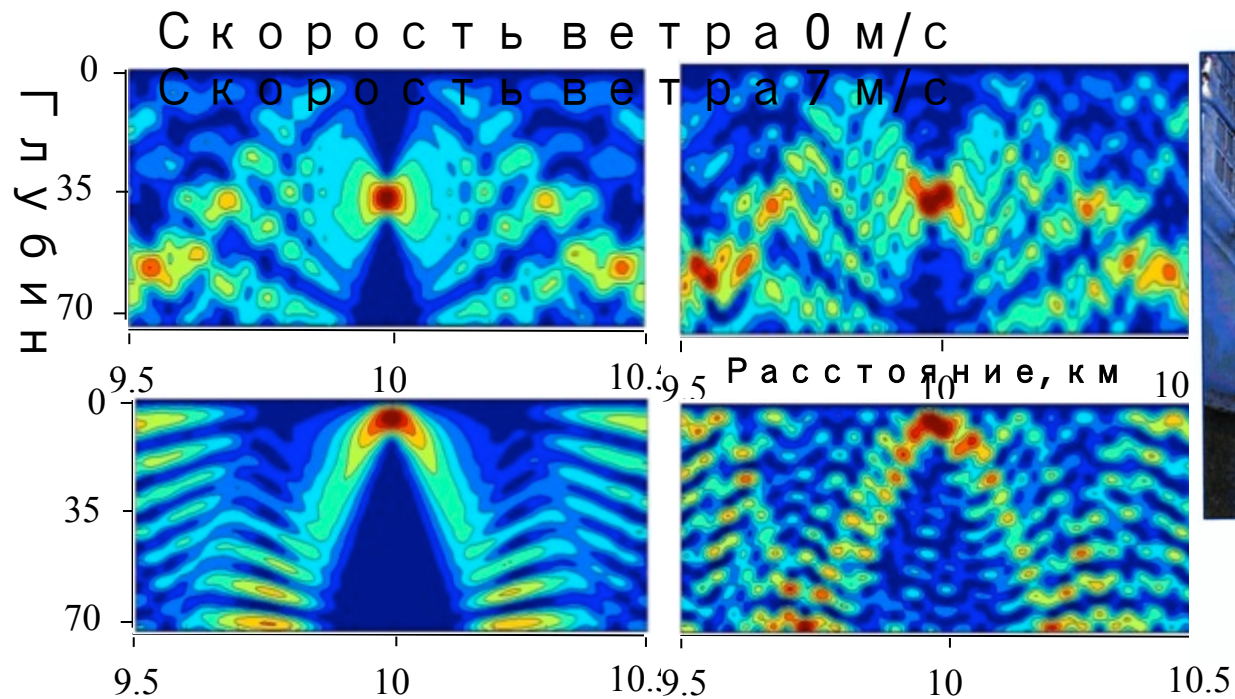
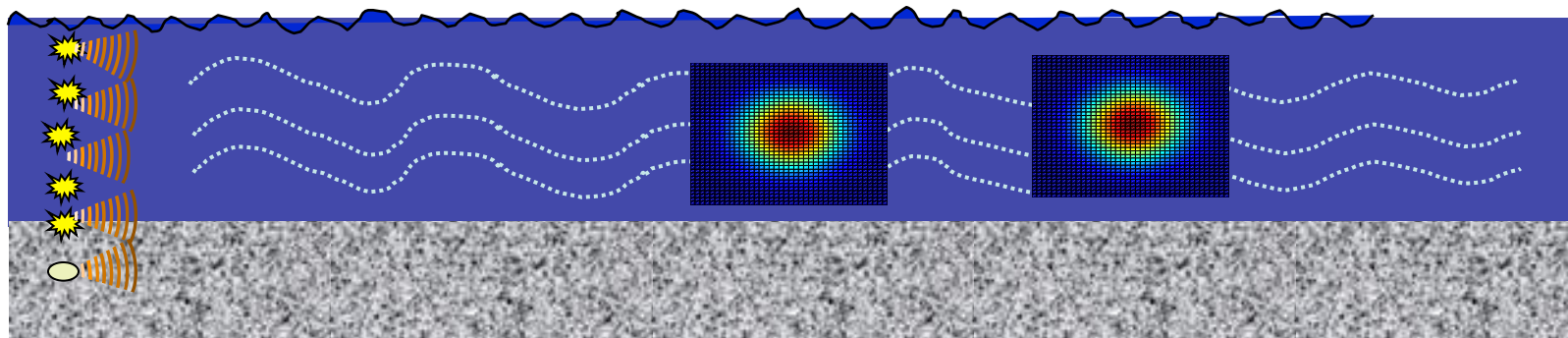
Signal transmission from air to underwater

V.E.Gusev, A.A.Karabutov. Laser optoacoustics.
New York, Academic Press, 1994 – the book
published by my former students

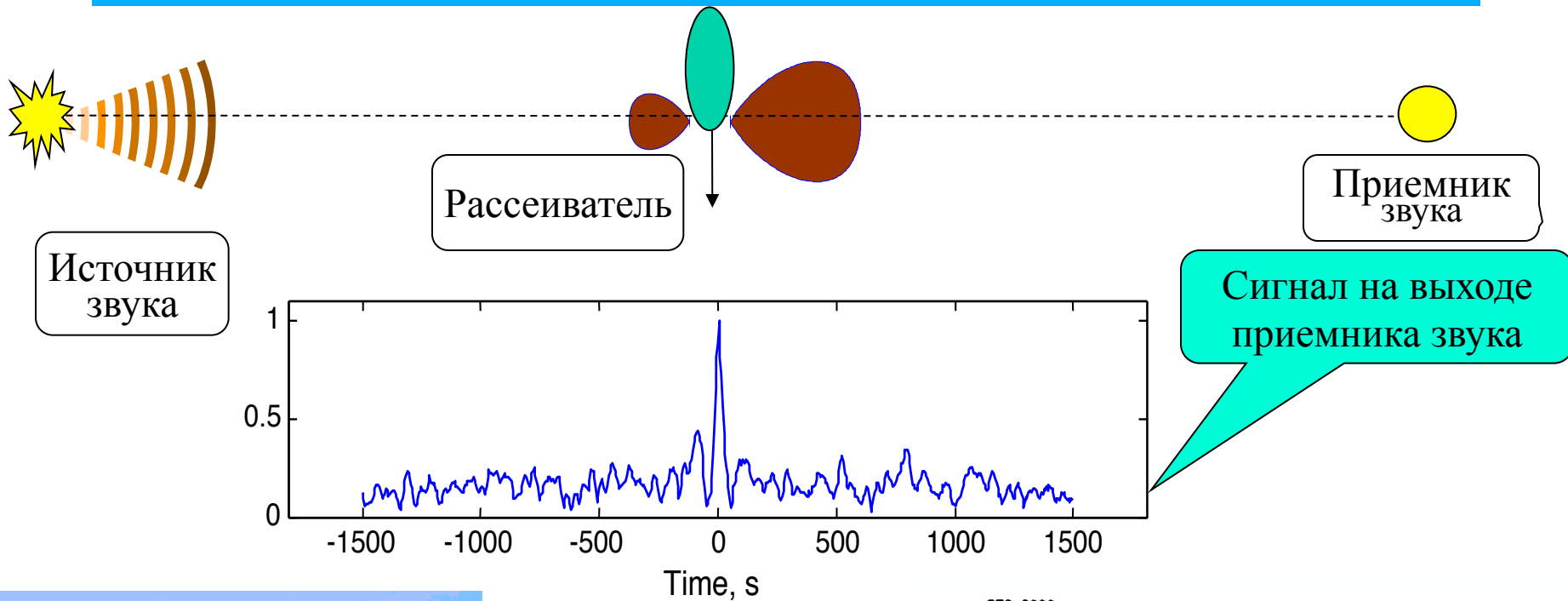


Фокусировка звукового поля в волноводе с использованием обращения сигнала во времени

ИПФ Р А Н И О Ф Р А Н

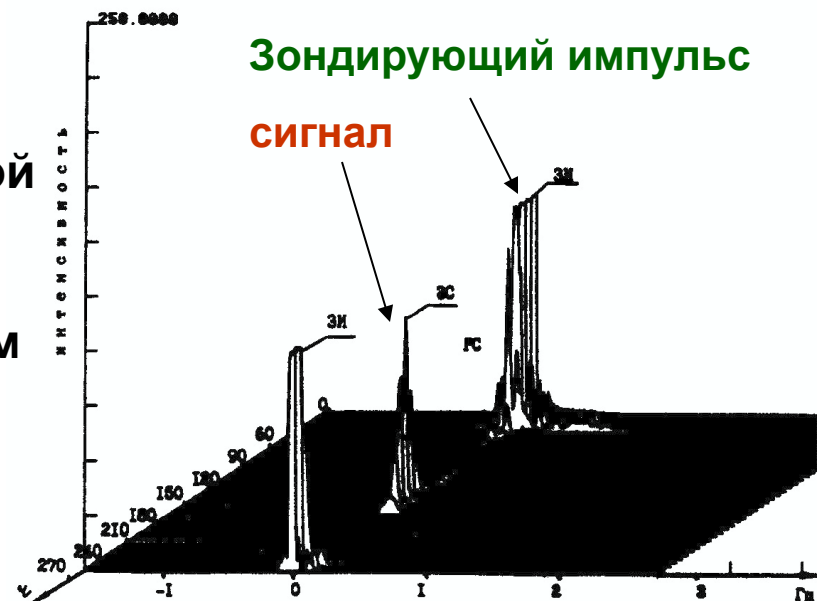


Гидролокация на просвет (ИПФ РАН ИОФ РАН)



Серые киты
Длина $L = 10$ м,
Диаметр $d = 3$ м

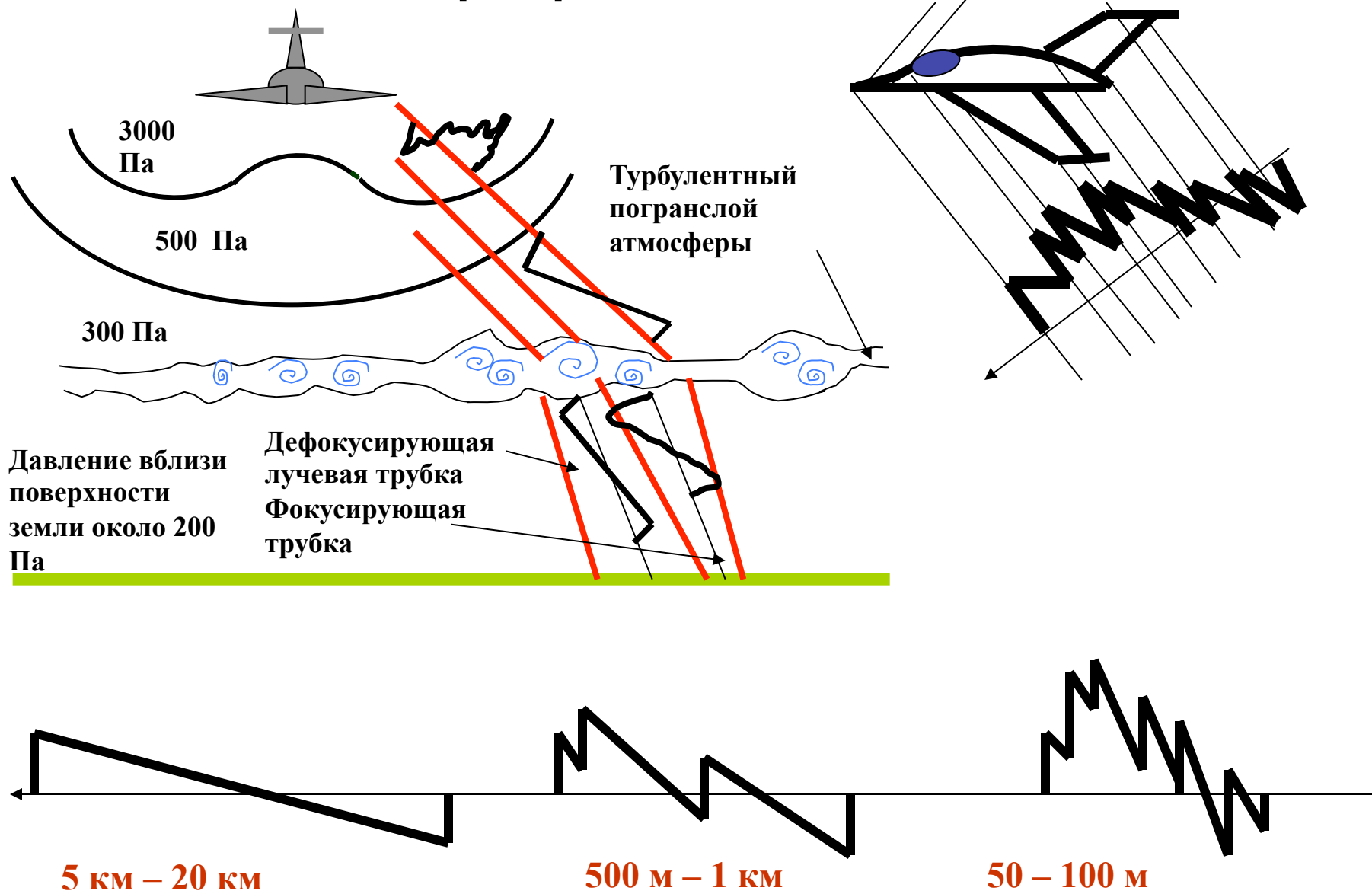
Сигнал от локальной неоднородности (подводной горы) удаленной на 150 км от приемной системы



**Звуковой Удар и оптическое проявление
«Акустической турбулентности» при полете вблизи
поверхности**

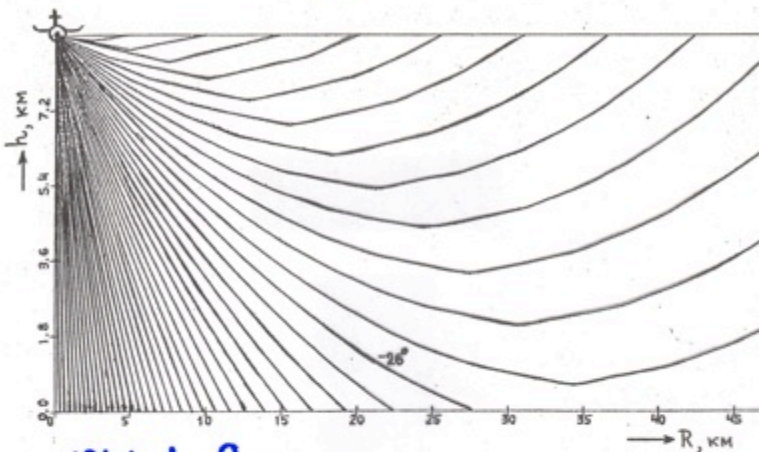


Формирование волны ЗУ



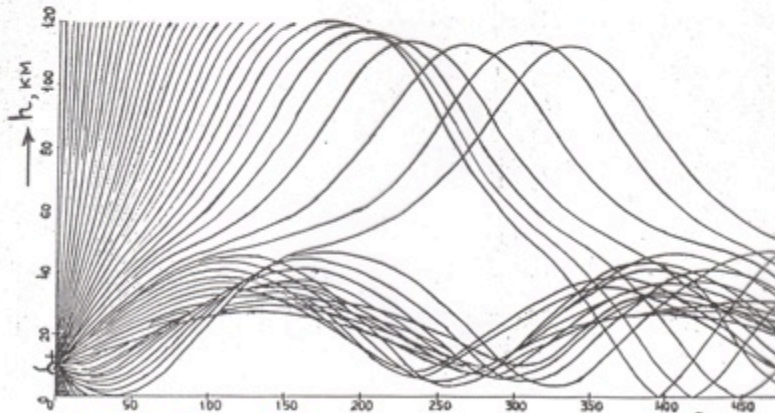
Rays in the Standard Atmosphere and SPA profiles

Ray pattern for the standard atmosphere
in the absence of wind



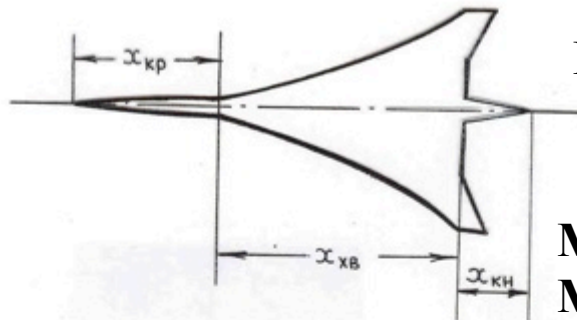
Altitude 9 km

Линейные акустические лучи от источника на высоте 9 км.



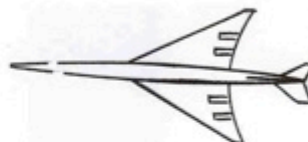
Altitude 10 km

Формирование каустик, атмосферного волновода, зон тени в случае источника на высоте 10 км

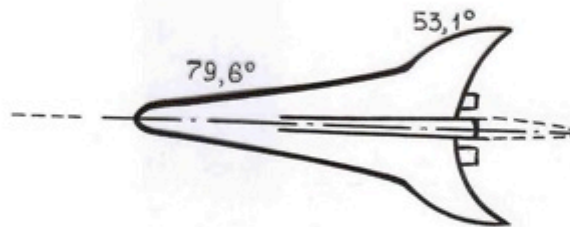


Расчетная модель

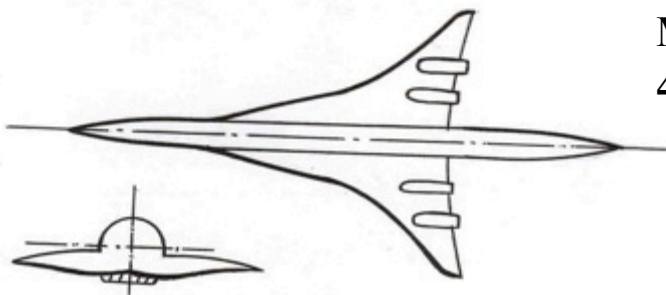
McDonnell Douglas
M=2.4, m=350 T,
S=10000 km, H=21.5 km,
97,5 m x 41.3 m



Проект центра
Лэнгли (USA) M=3,
250 pass, S=12000
km, 91m



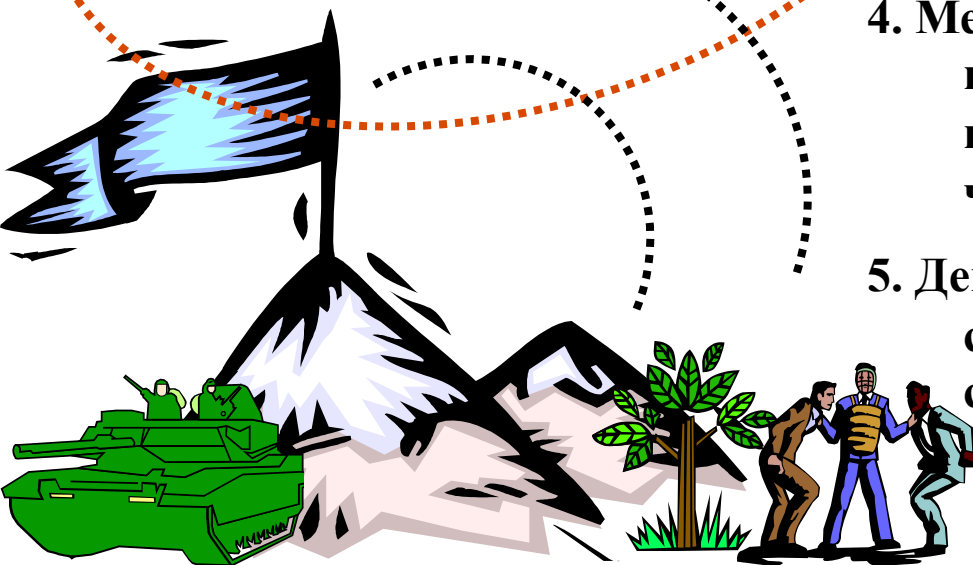
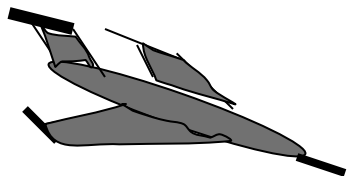
France (проект)
M=2, 350 T, 76 m x
42.6 m



Экспертная система для выбора оптимальных режимов и трасс полета СПС

Необходимые для учета факторы

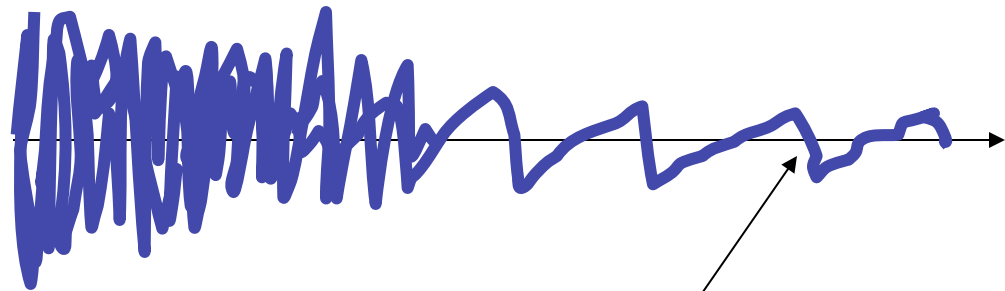
1. СПС: аэродинамические х-ки, скорость полета, маневрирование, трасса
2. Атмосфера: стратификация, регулярные неоднородности, турбулентность, влажность, молекулярный состав, ветер
3. Волна: нелинейность, дифракция, рефракция, рассеяние, затухание, релаксация
4. Местность: рельеф, акустические св-ва границ, отклик на импульсное воздействие, проникновение в океан через неровную пов-ть
5. Действие на: живые организмы (человек, сухопутные и морские животные), строения, технику





Очень сильный шум возникает при старте больших ракет. Например, Сатурн-5 или Шаттл возбуждают шум на уровне 170 дБ на 10 м от двигателя.

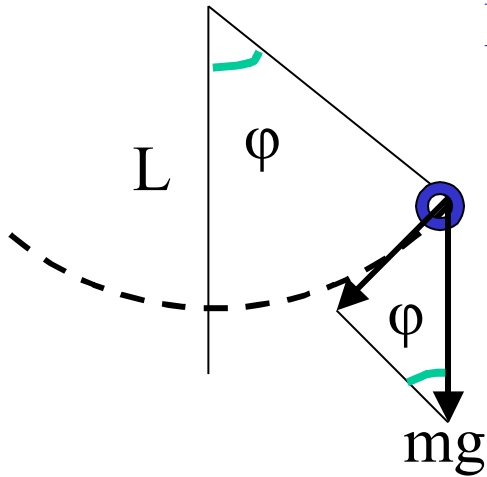
Ударные волны в волне частотой 500 Гц возникают на расстоянии менее метра и существуют вплоть до расстояний в десятки км.



It is evident that nonlinear phenomena will be experienced at large distances from the rocket. That is the reason why it is possible to hear the “crackling sound” standing far from the launch position.

Нелинейность: что это такое?

Простейший пример: маятник



Легко вывести ур-ние движения: масса на ускорение = возвращающей силе

$$mL \frac{d^2 \varphi}{d t^2} = -mg \sin \varphi$$

$$\frac{d^2 \varphi}{d t^2} + \omega_0^2 \sin \varphi = 0, \quad \omega_0^2 = \frac{g}{L}$$

Это нел ур-ние. Если угол отклонения мал,
 $\sin \varphi \approx \varphi - \frac{\varphi^3}{3!} + \frac{\varphi^5}{5!} + \dots$

Ограничиваясь 1-м членом разложения в ряд, получим **линейное ур-ние и линейное решение:**

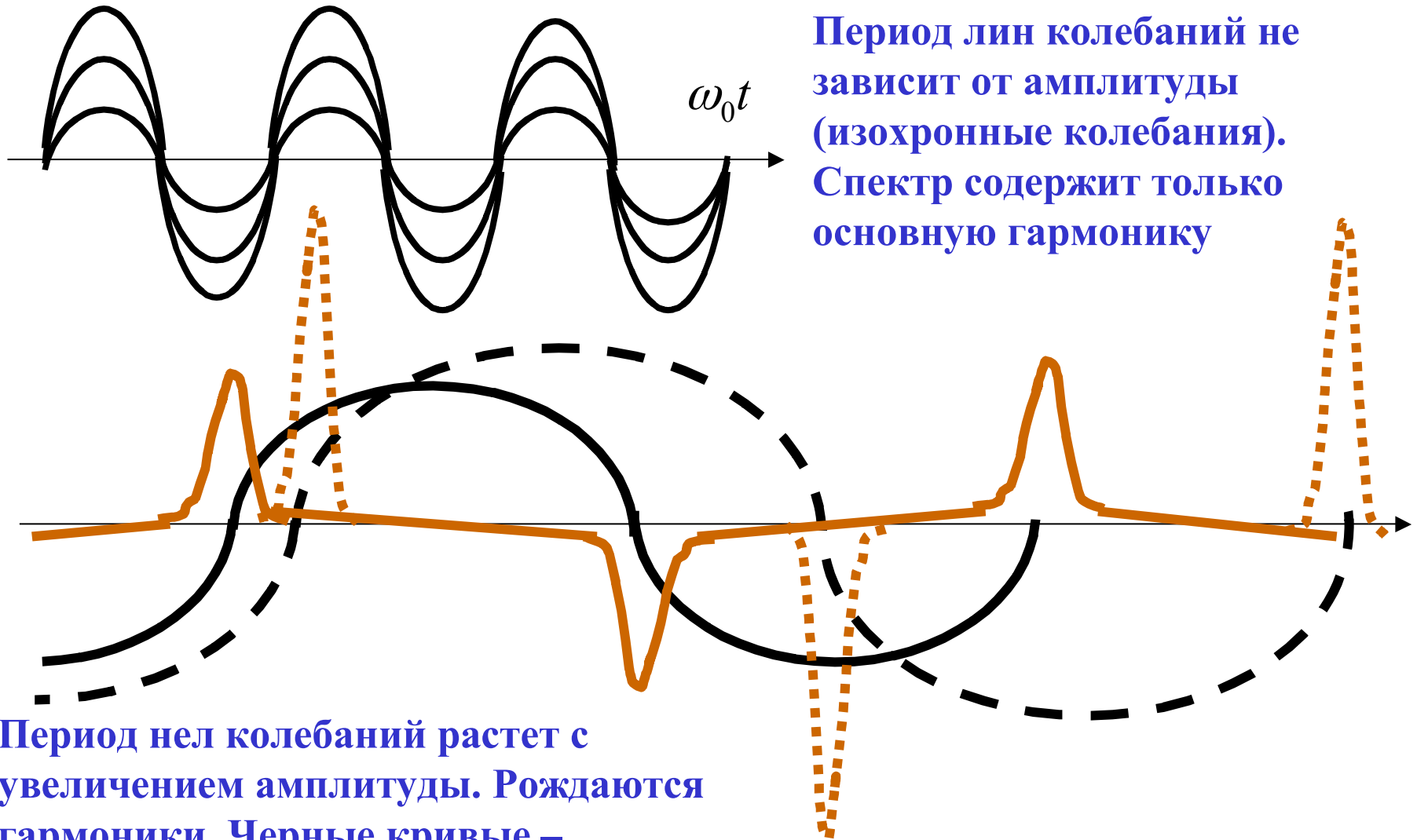
$$\frac{d^2 \varphi}{d t^2} + \omega_0^2 \varphi = 0, \quad \varphi = A_1 \cos \omega_0 t + B_1 \sin \omega_0 t$$

Если удержать 2 члена разложения, получим **слабо нелинейное ур-ние и решение**, содержащее основную частоту и ее высшие гармоники:

$$\frac{d^2 \varphi}{d t^2} + \omega_0^2 \varphi \left(1 - \frac{\varphi^2}{6} \right) = 0, \quad \varphi = A_1 \cos \omega_0 t + B_1 \sin \omega_0 t + A_3 \cos 3\omega_0 t + B_3 \sin 3\omega_0 t + \dots$$

Сильно нелинейное решение для маятника

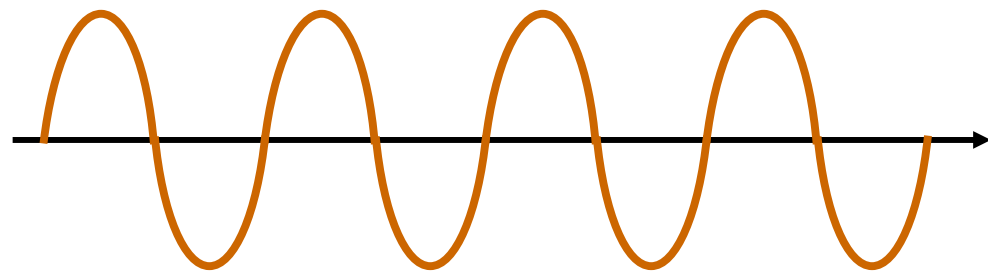
выражается через спецфункции (эллиптич ф-ции Якоби). Интересно сравнить линейное и нелинейное поведение маятника:



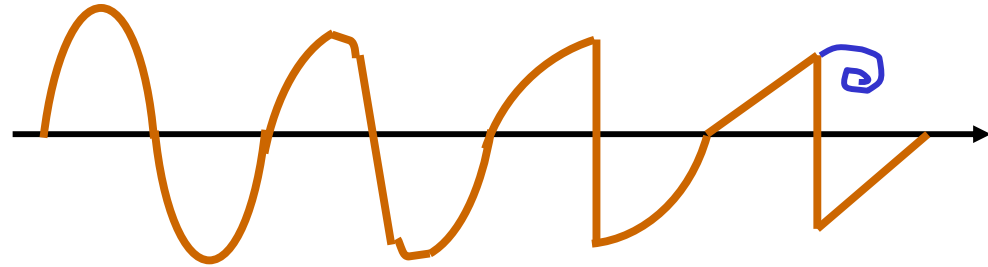
Период лин колебаний не зависит от амплитуды (изохронные колебания). Спектр содержит только основную гармонику

Период нел колебаний растет с увеличением амплитуды. Рождаются гармоники. Черные кривые – отклонение, красные – скорость.

Введение: Простейшие нелинейные волновые явления

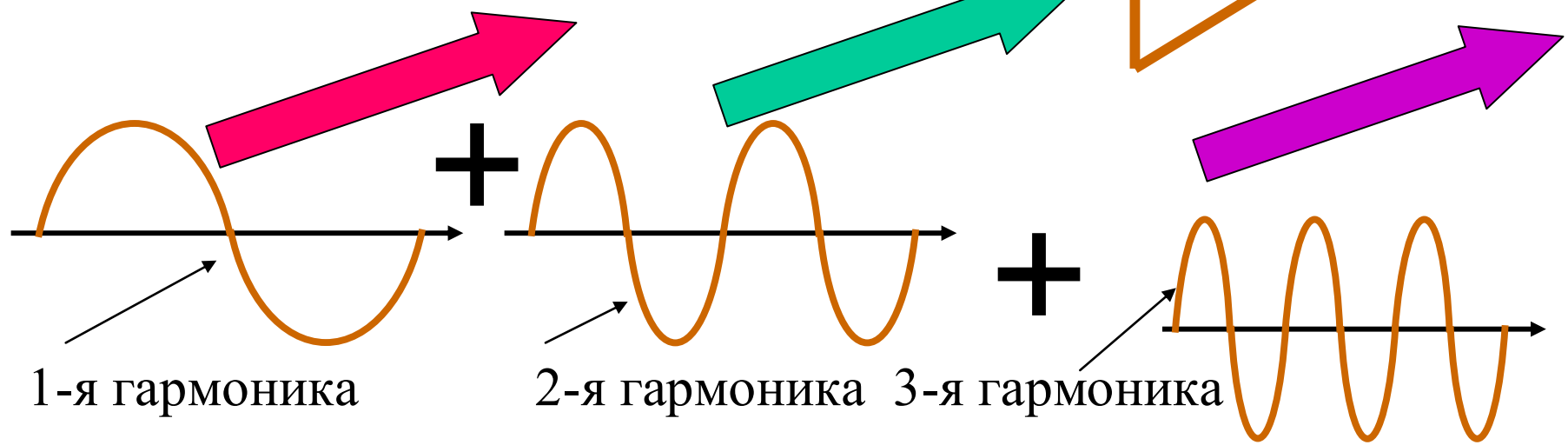
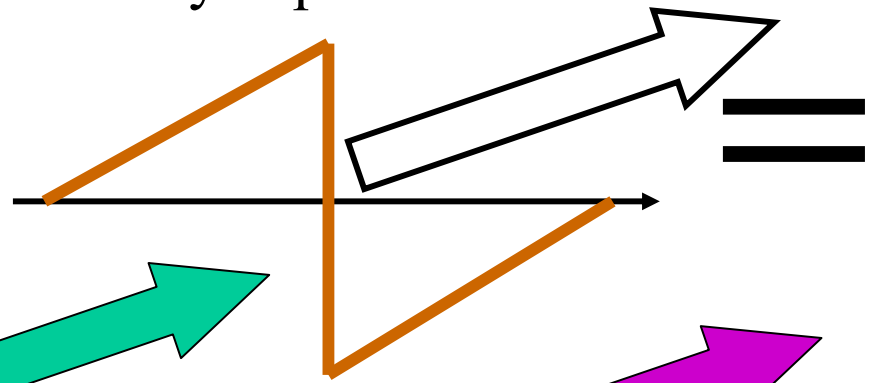


X Слабая (**Линейная**) волна сохраняет форму

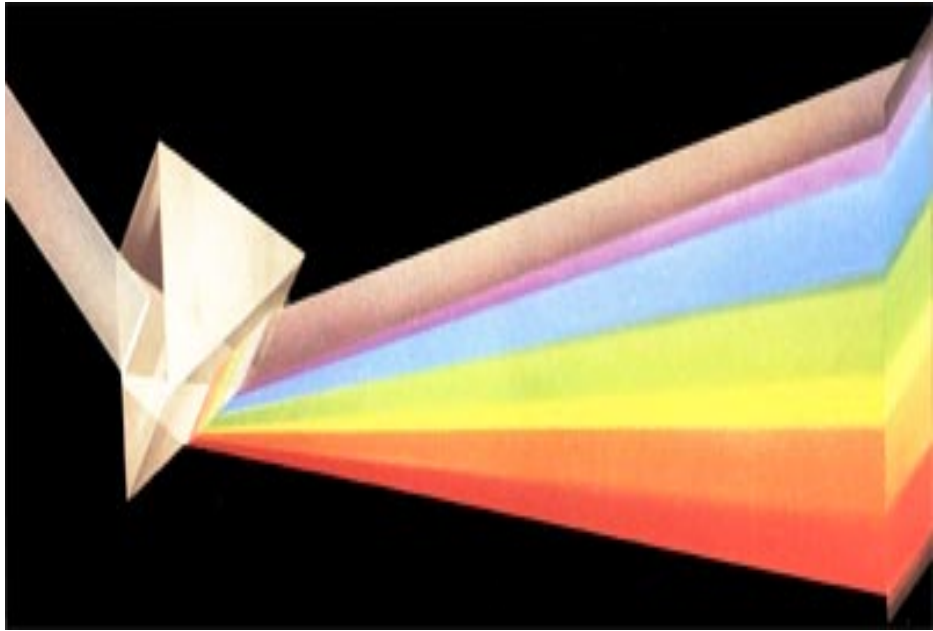


Сильная (**Нелинейная**) волна X искажается как морская волна у берега

Гармонич волна превращается в пилообразную. Спектр «**ПИЛЫ**» содержит гармоники : $\omega, 2\omega, 3\omega, \dots$



Разложение белого света на цвета призмой

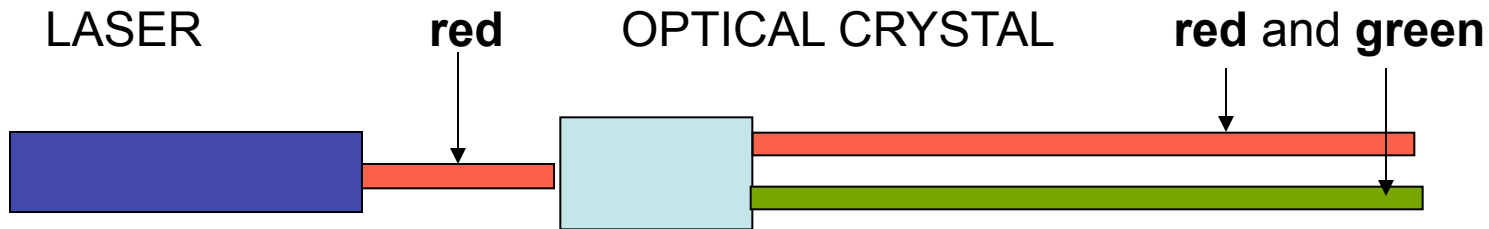


Каждый цвет отвечает определенной частоте.

Если световой пучок слабый, новых частот (цветов) не возникает

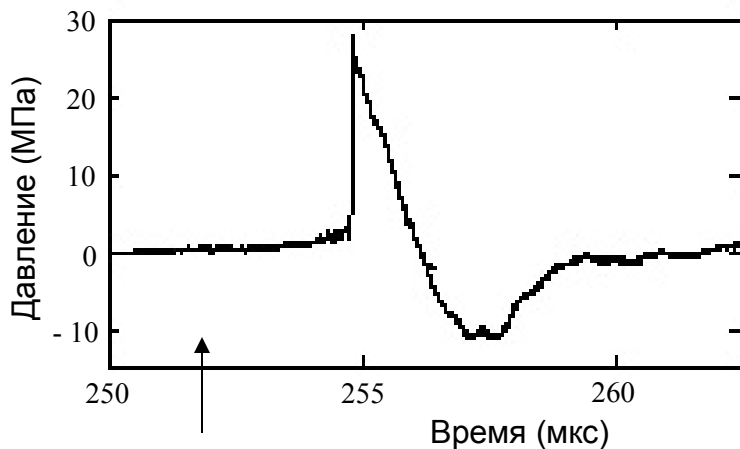
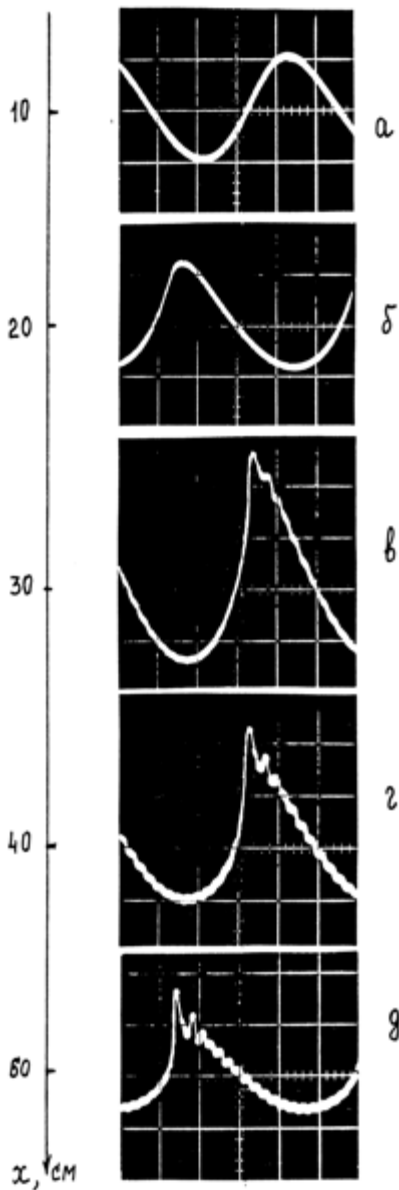
Если световой пучок имеет высокую интенсивность (лазерный пучок), появляются новые цвета.

Например, красный лазерный пучок может в кристалле превратиться в зеленый.



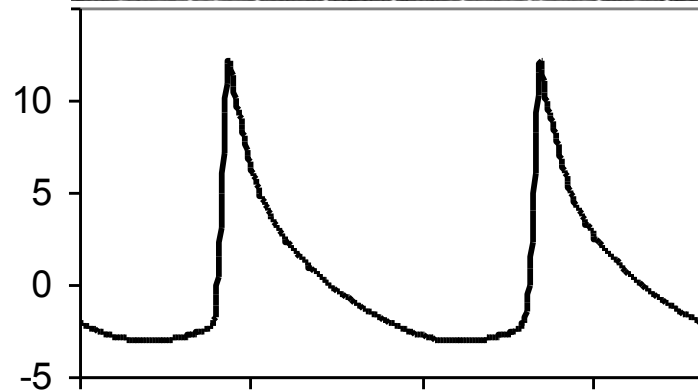
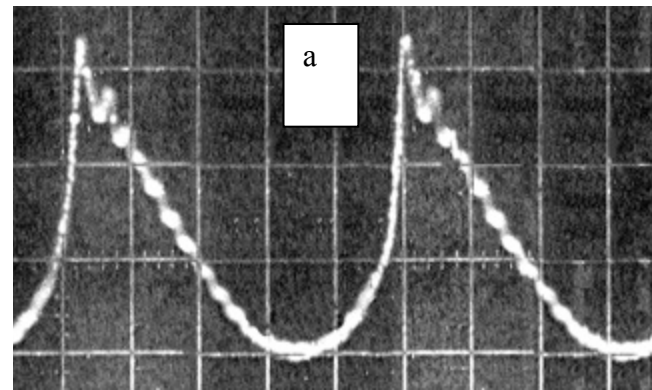
Это – простейший нелинейный оптический эффект (генерация второй гармоники). Красный свет с частотой ω возбуждает зеленую волну удвоенной частоты 2ω . Похожее явление происходит в интенсивных акустических полях

Искажение формы профиля волны с образованием крутых ударных фронтов



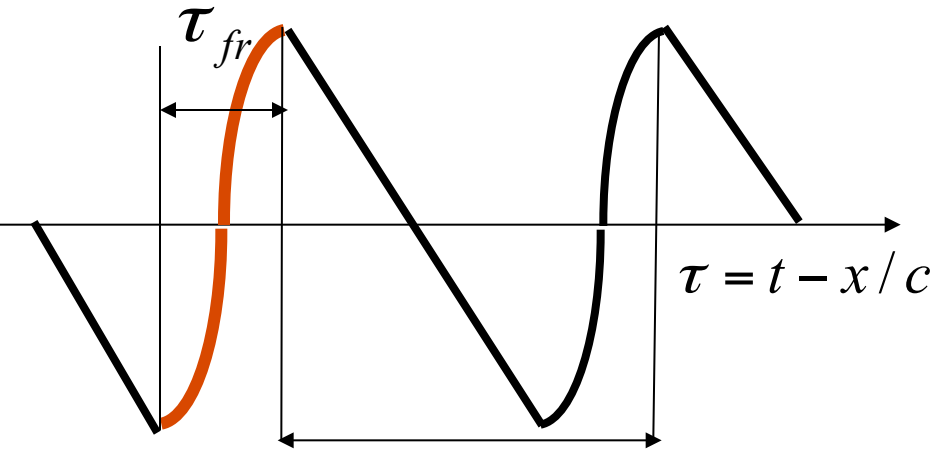
Волна, в фокусе литотриптера. Пик (+) давления предшествует растянутому хвосту (-) давления. Для разрушения почечного камня требуется ~1000 импульсов, (частота повторения 1 – 2 Гц).

Нел искажение волны на оси пучка с ростом пути x , см. Интенсивность 1 Вт/см², $N=0.2$. (а,б)-2.8 атм/дел, (в-д) -1.1 атм/дел



Асимметричное искажение волны (гармонич на входе) при совместном действии нел-ти и дифракции. а) Профиль в дальней зоне (фокусировки нет) б) Профиль у фокуса. Частота 1 МГц.

Оценки ширины ударного фронта и ускорений на фронте



Среда – вода:

$$c = 1.5 \cdot 10^5 \text{ см/с}, \quad \rho = 1 \text{ г/см}^3,$$

$$\varepsilon = 4, \quad b = 4 \cdot 10^{-2} \text{ Пз}$$

Параметры волны:

$$f = 10^6 \text{ Hz}, \quad I = 1 \text{ kW/cm}^2$$

$$T = f^{-1} = 10^{-6} \text{ с} \quad (\lambda = 1.5 \text{ мм})$$

Колебательная скорость: $u_0 = \sqrt{\frac{2I}{c\rho}} = 0.7 \text{ м/с}$

Обратное число Рейнольдса (число Гольдберга): $\Gamma = \frac{\pi b f}{\varepsilon \rho c u_0} = 3.5 \cdot 10^{-3}$

Длительность пространственная ширина ударного фронта:

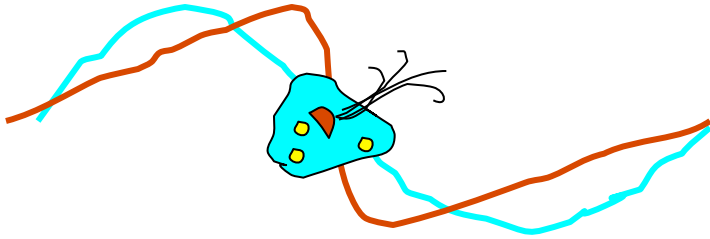
$$\tanh\left(\frac{\pi f}{\Gamma} \tau\right), \quad \tau_{fr} = \frac{\Gamma}{\pi f} = 2 \cdot 10^{-10} \text{ с}, \quad l_{fr} = c \tau_{fr} = 0.3 \text{ мсм}$$

Ускорение $a = u_0 / \tau_{fr} = 2 \cdot 10^9 \text{ м/с}^2 = 2 \cdot 10^9 \text{ г}$ Смещение частиц в поле волны: 0.5 мкм

Длина образования разрыва: $x_{SH} = \frac{c^2}{2\pi \varepsilon f u_0} = 2.5 \text{ см}$

На расстояниях, больших 3 см, нелинейное поглощение сильнее линейного в $1/\Gamma=1000$ раз!

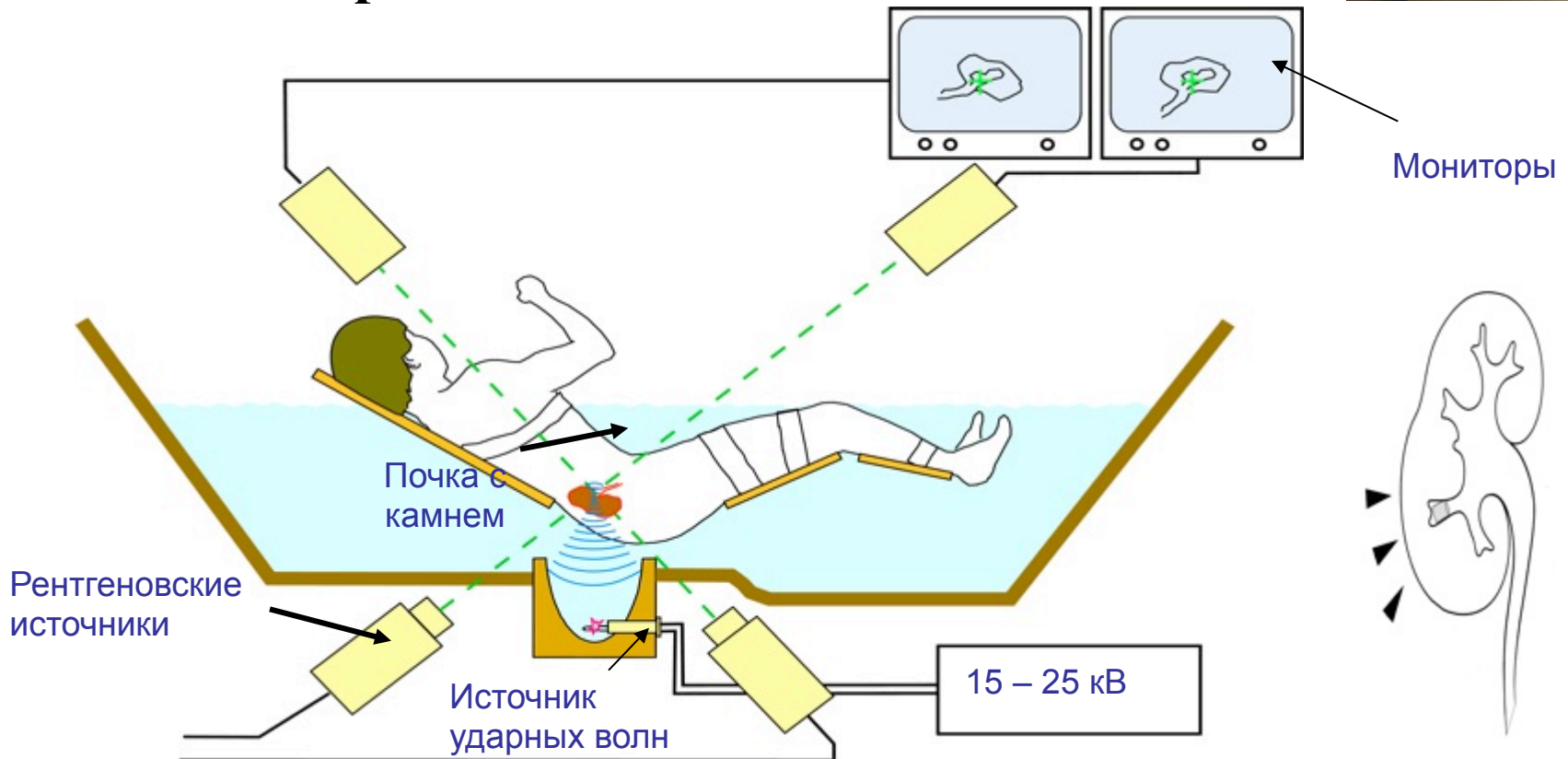
Может ли такая волна разрушить клетку или повредить мягкую ткань ?



1. Протяженность фронта меньше размера клетки. Возникают большие градиенты давления
2. Деформация клетки ~ 10 выходит далеко за область обратимых гуковских деформаций
3. Внутри клетки имеются включения, слабо отличающиеся по плотности от воды: более легкие (жироподобные) и более тяжелые. При колебаниях в жидкости из-за огромных ускорений между такими включениями возникают инерционные напряжения порядка 10^9 dyne/cm^2 , превосходящие предел прочности клетки.
4. Ударные фронты воздействуют на клетку с частотой 1 миллион раз в секунду. Накапливаются усталостные повреждения.
5. В тканях возникает УЗ кавитация
6. Внутри клеток возникают акустические течения, создающие большие сдвиговые напряжения

Фрагментация почечных камней

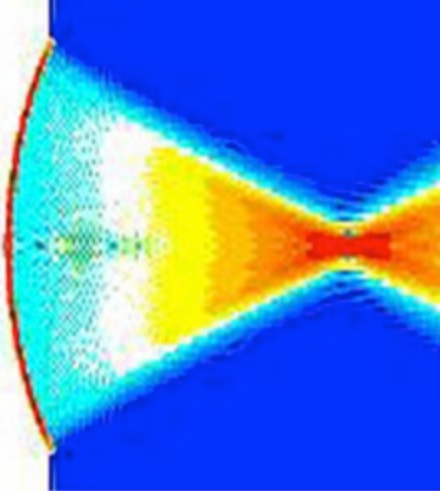
Экстракорпоральная литотрипсия



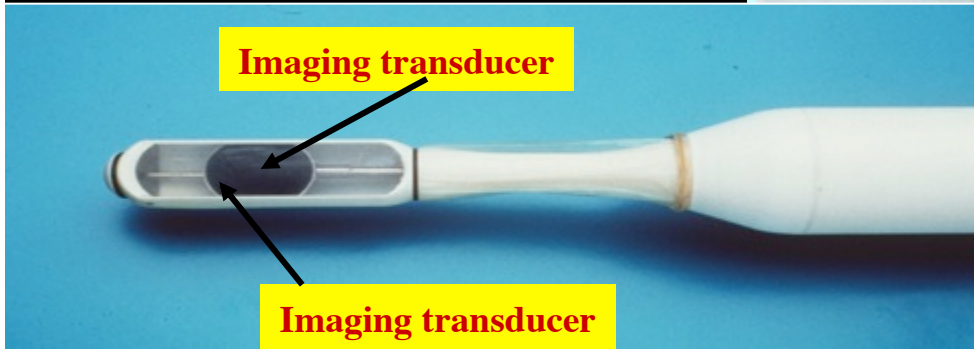
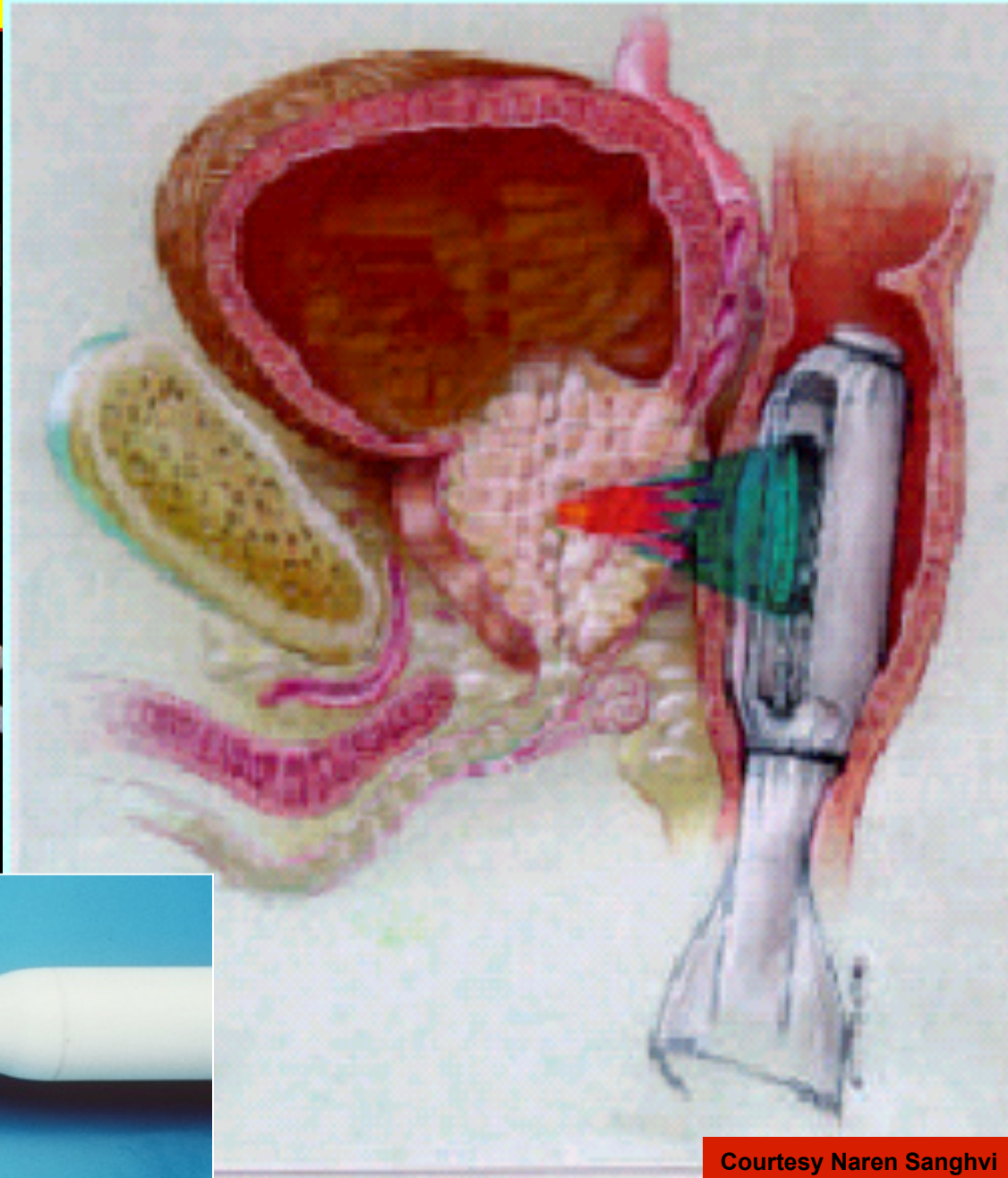
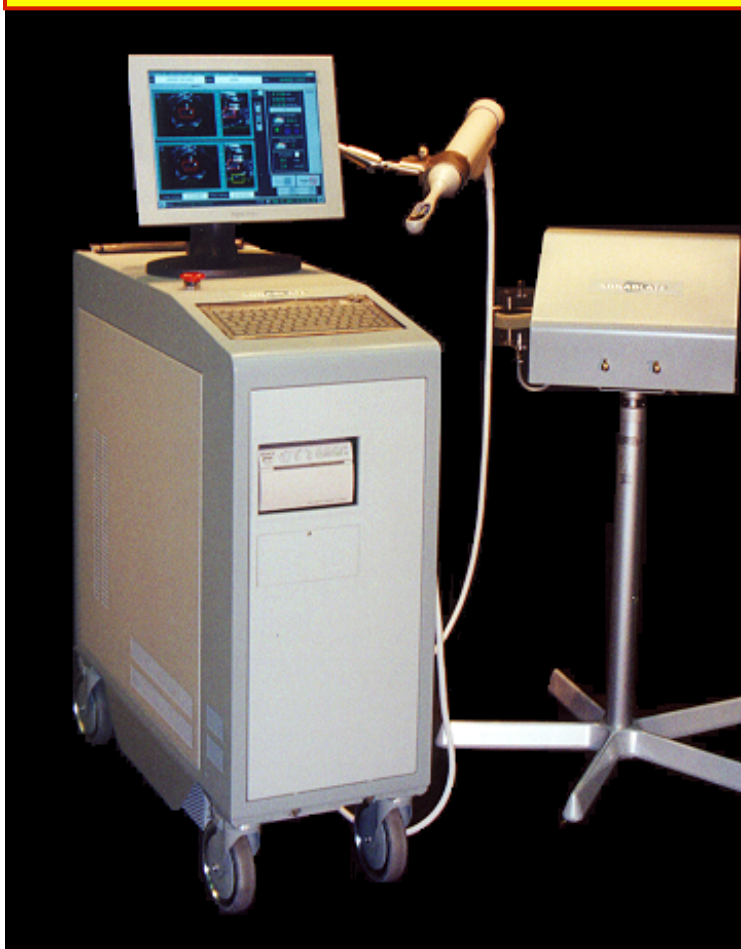
7. УЗ может нагреть ткань за счет линейного или нелинейного поглощения на единицы градусов (гипертермия) или десятки градусов (УЗ абляция)

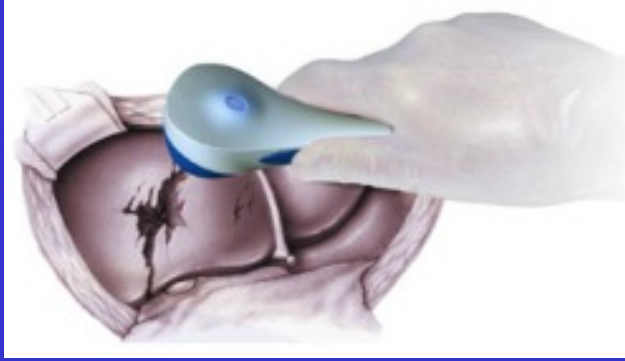
Локальное разрушение ткани в окрестности фокуса

Распределение температуры в фокусированном УЗ пучке

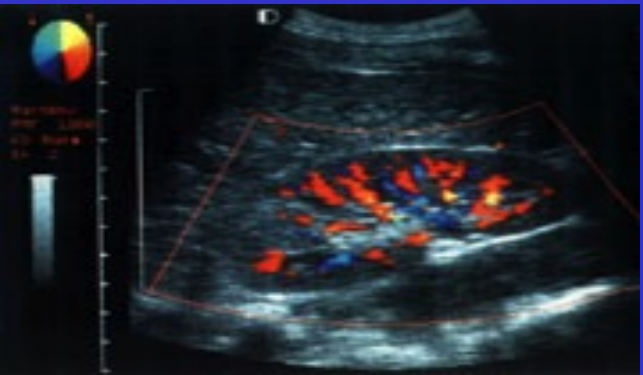


The Sonablate 500 System Focus Surgery, Inc.

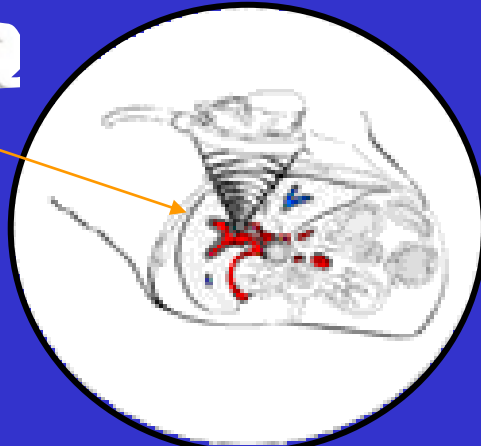
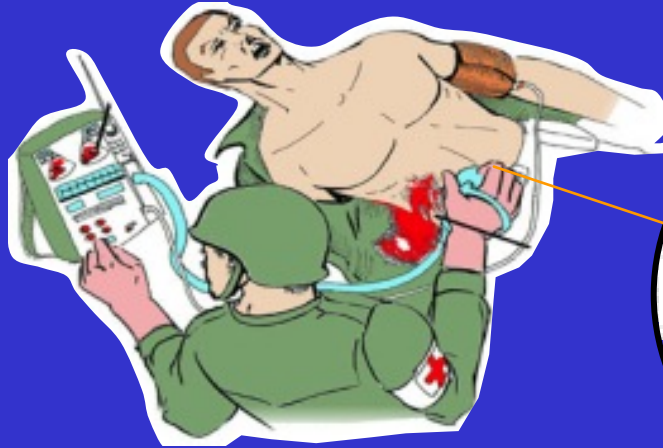
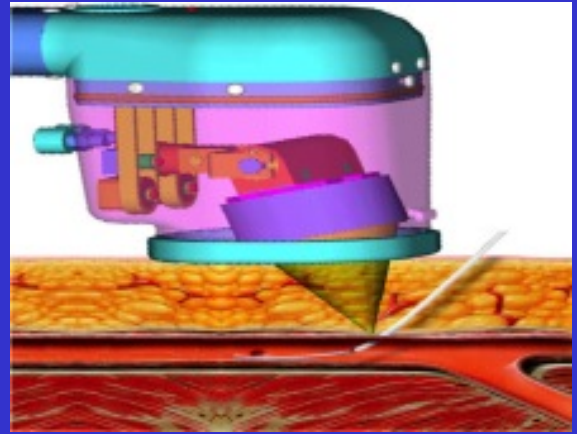




Π F - - ? = D
|| ? ? ? = ? = (|| e , || = e)



« || ? »
= - D || = -



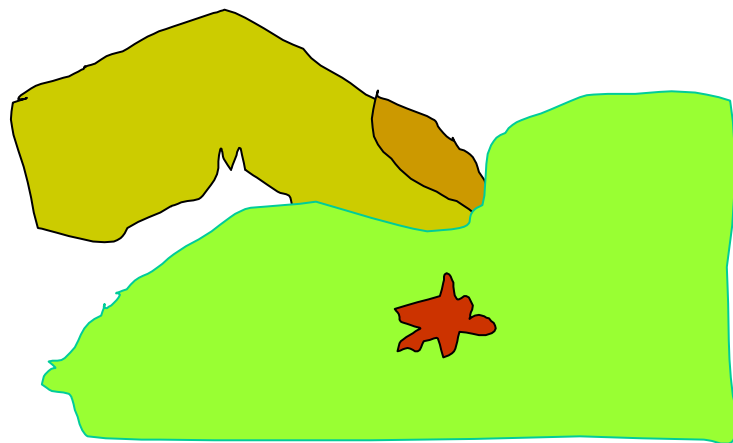
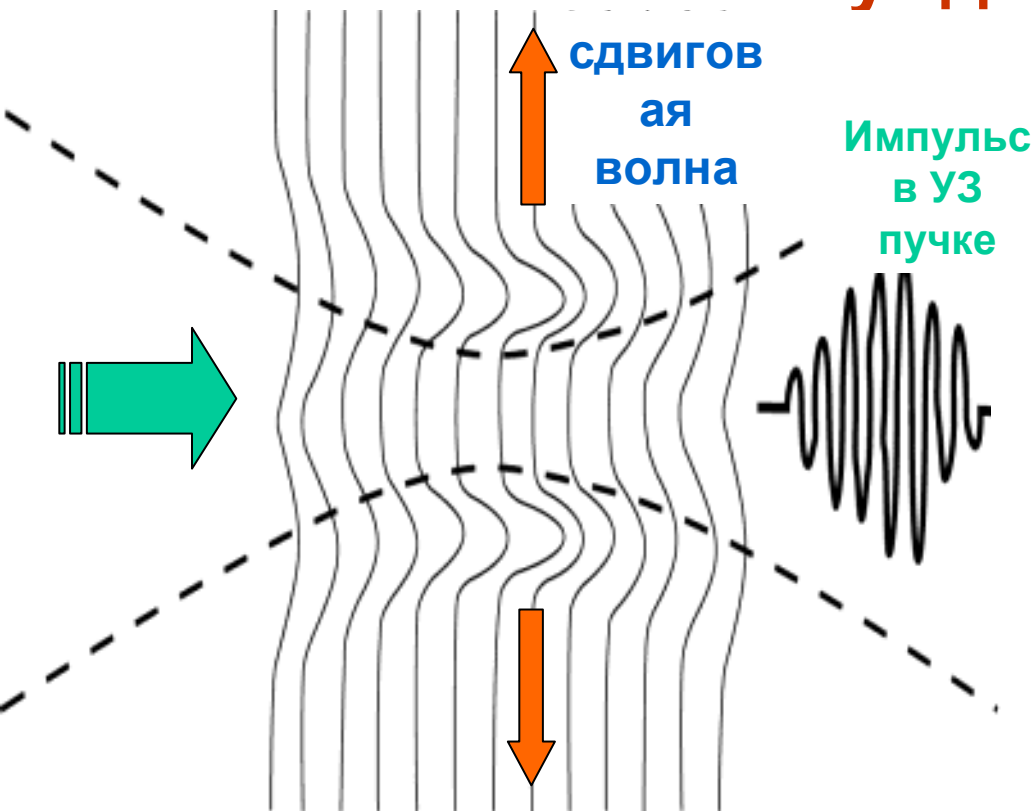
40%
A A- D e || ? A = - e
D- ? ? = = e e
D- ? =
« ? » - - D
= = ? = = e



жк. течение - начало.wmv

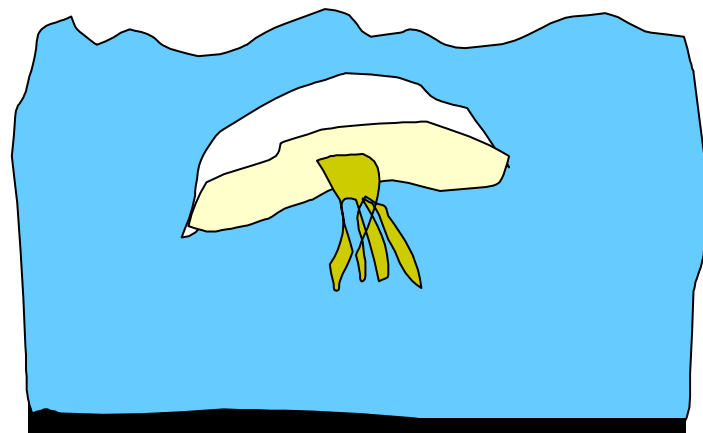
**8. Ультразвук создает большие
Радиационные Силы, используемые
для «прощупывания» органов**

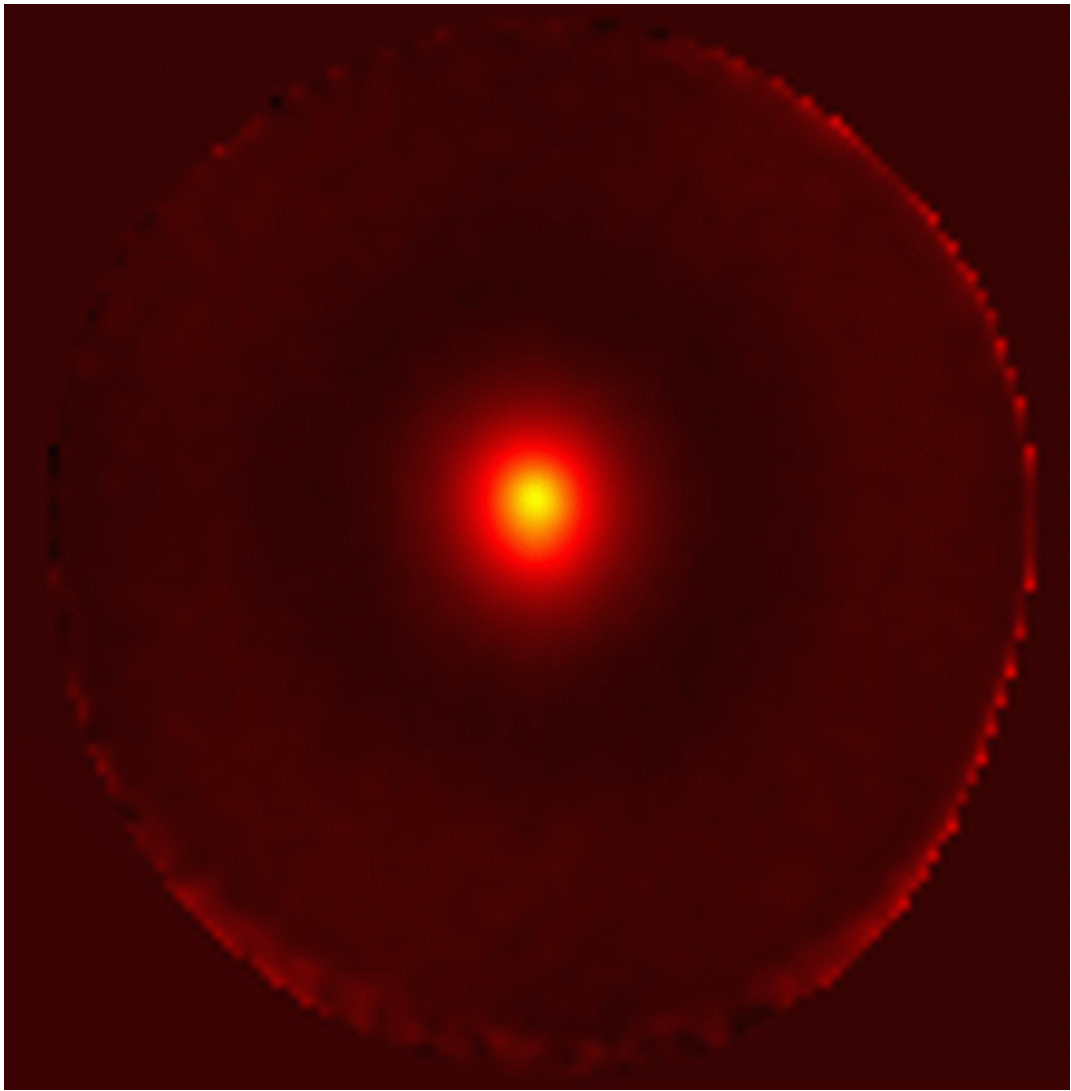
Модулированное радиационное давление для бесконтактного возбуждения сдвиговых волн

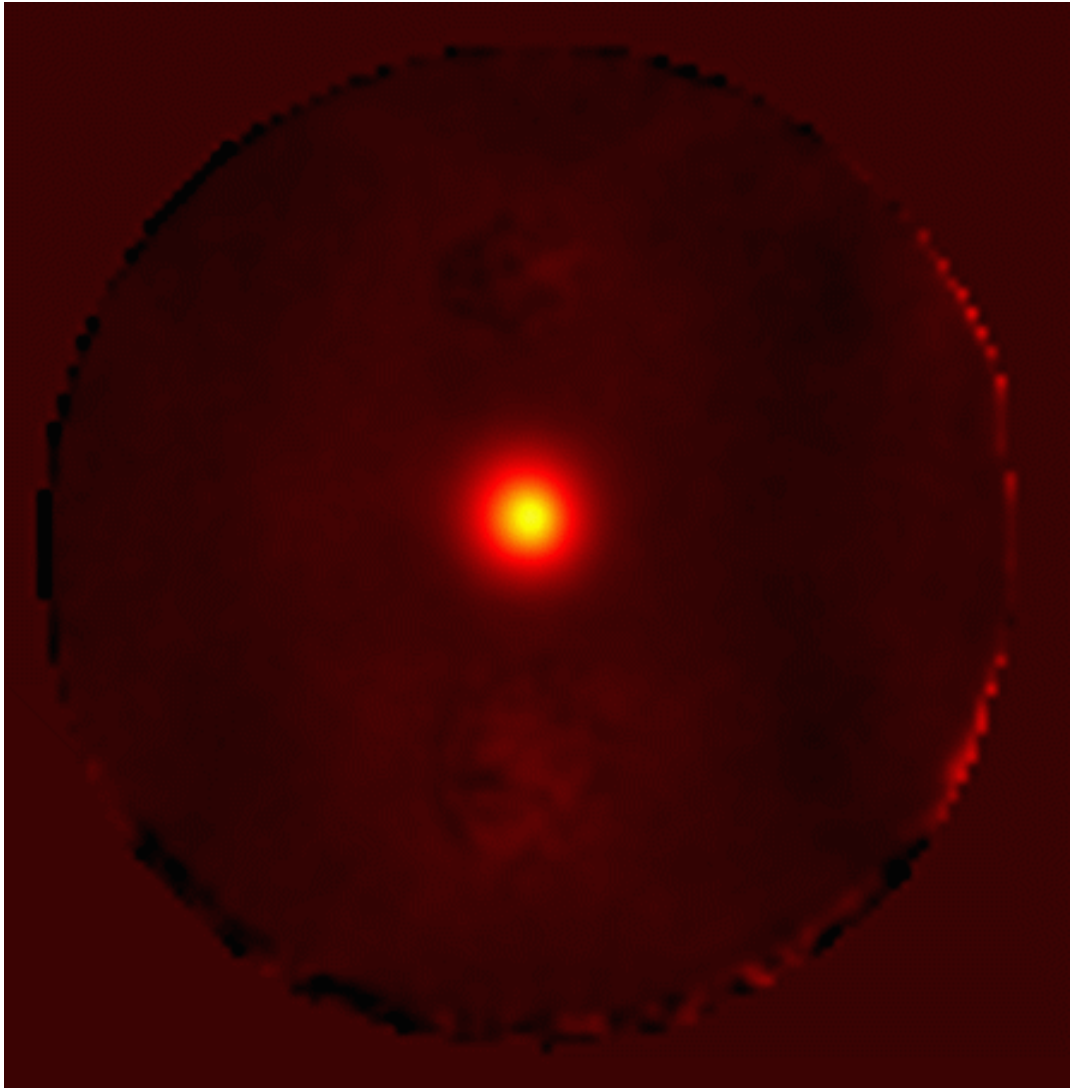


Применение в диагностике:
Shear Wave Elasticity Imaging

Sarvazyan and Rudenko. US Patent
5,810,731 (Sept.22, 1998)

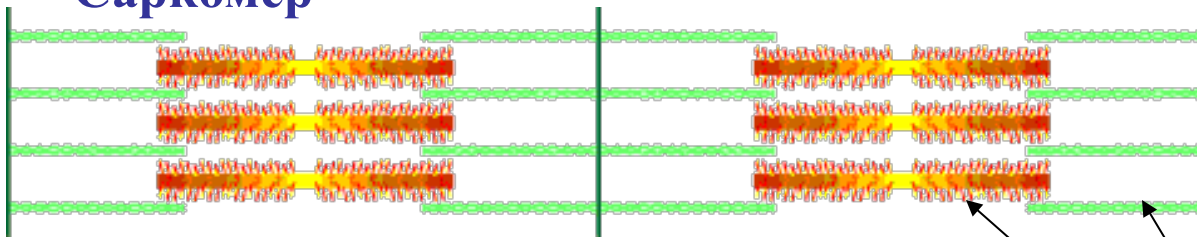






Структура мышечного волокна

Саркомер

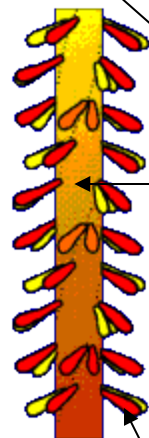


Волокно состоит примерно из 10000 последовательных саркомеров, каждый из которых, содержит 10^6

Пары тонких и толстых нитей параллельны и контактируют через «миозиновые мостики». Эти мостики расположены упорядоченно на толстых нитях

При сокращении мышцы увеличивается сдвиговая вязкость и упругость ткани. Напрягая мышцы, мы предохраняем скелет от ударов.

нитей: тонких (белок актин) и толстых (миозин). «Актомиозин» - эффективный механо-химический преобразователь энергии АТФ



МИОЗИНОВЫЕ МОСТИКИ



Способность мышц защищать суставы от травм за счет рассеяния и поглощения волновой энергии сформировалась в результате эволюции



Дистанционное возбуждение волн в кости пульсирующим радиационным давлением: измерение содержания кальция (остеопороз, артроз и др болезни костей и суставов)

Waveform Generator

Digital Oscilloscope

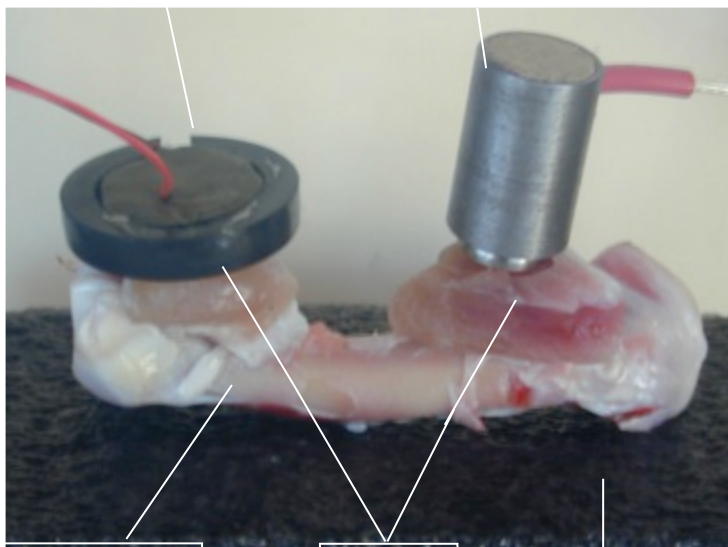


Amplifier

Radiation Force Transmitter

Broadband Receiver

Pulsating Radiation Pressure excites the wave propagating along the bone. The higher is the calcium content, the higher is the velocity of propagation. The time delay T of pulse passing the distance L between points of excitation and detection determines the velocity $C=L/T$.



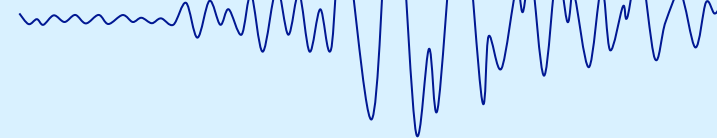
Turkey femur

Muscle layers

Foam

лабораторная установка

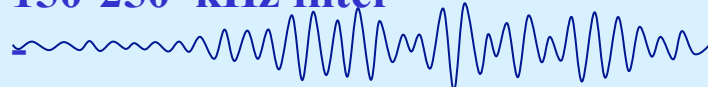
Received broadband signal



70-130 kHz filter



150-250 kHz filter



КОНТРАСТНЫЕ АГЕНТЫ

(газовые пузырьки с искусственной упругой оболочкой)



Более 1 млрд. долларов уже потрачено разными компаниями на разработку контрастных агентов

Echovist (Germany), Alburnex (USA), Levovist (Germany), EchoGen (USA), Quantison (UK), Brl (Switzerland), BY963 (Germany), Imagent US (USA), Aerosomes (USA), Sonovist (Germany), FS-O69 (USA)

$$\frac{d^2 w}{dt^2} + \omega_0^2 w (1 - \varepsilon_G w) = -\omega_0^2 \frac{p(t)}{c_G^2 \rho_G}$$

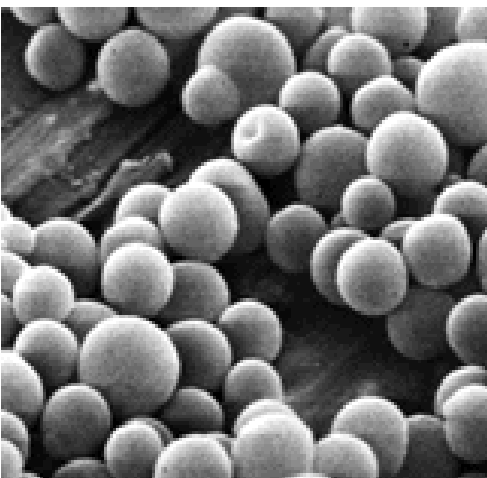
$$\Delta p - \frac{1}{c_L^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = -\rho_L n V_0 \frac{\partial^2 w}{\partial t^2}$$

Макс нел-ть достигается при газосодержании $0.7 \cdot 10^{-4}$

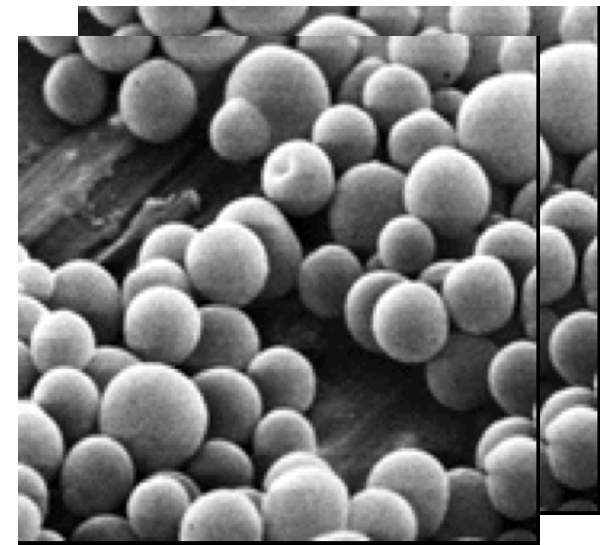
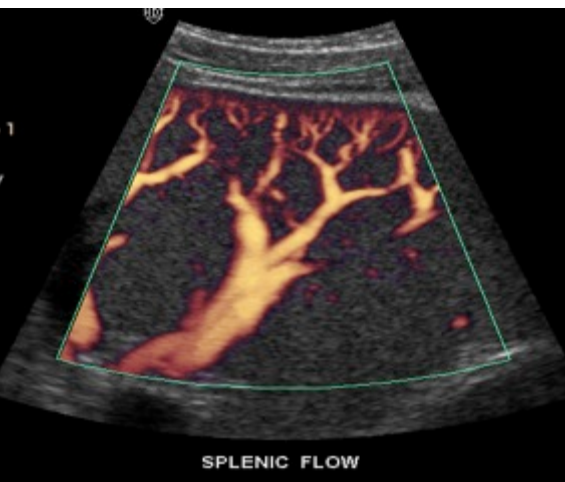
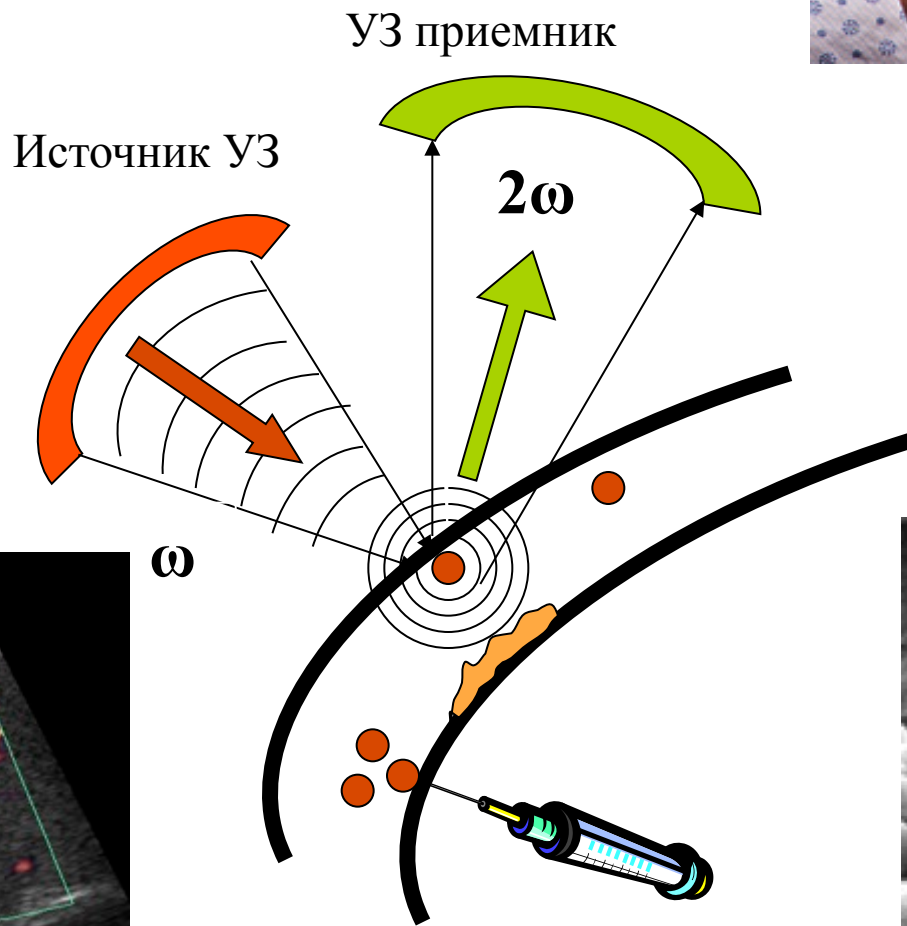
Макс нел параметр воды с пузырьками: 4700.

Нел параметр воды: 3.5

Нел параметр двухатомного газа: 1.2



Акустические контрастные агенты радикально улучшают ультразвуковую визуализацию кровотока и сосудистого русла

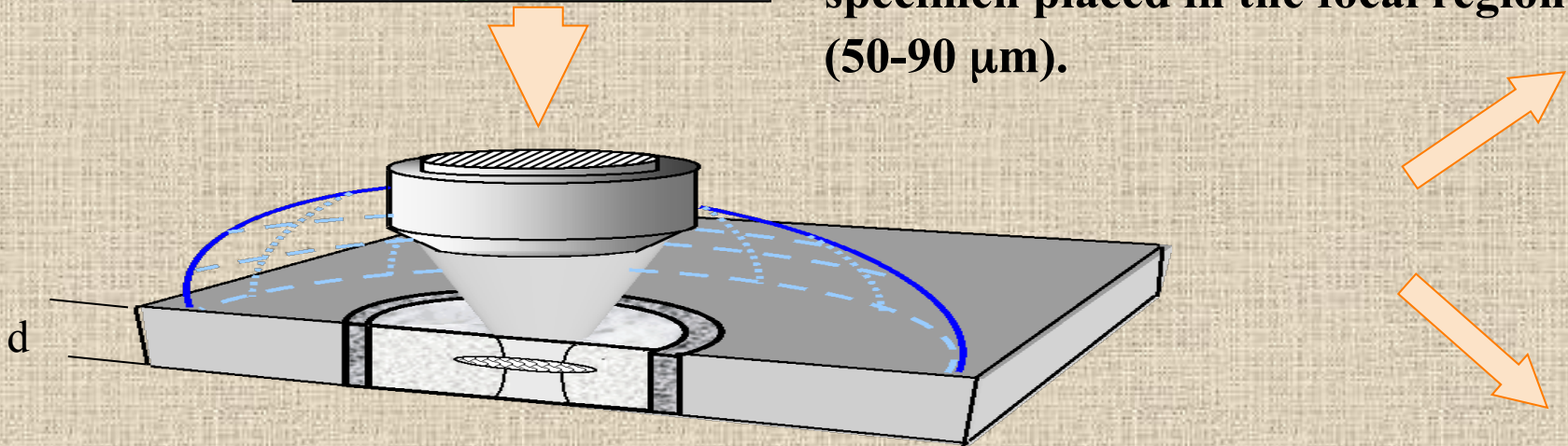


Microacoustical technique

Acoustic microscopy is based on application short pulses of high-frequency focused ultrasound for measuring elastic wave velocities and visualizing bulk microstructure of objects.

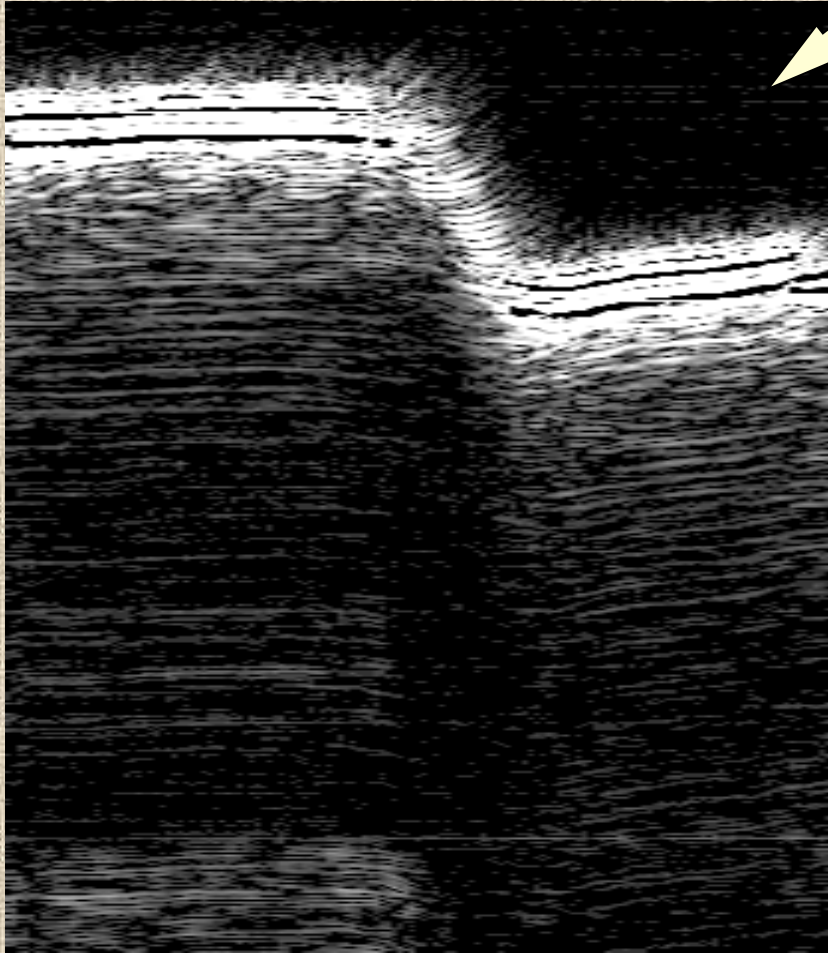
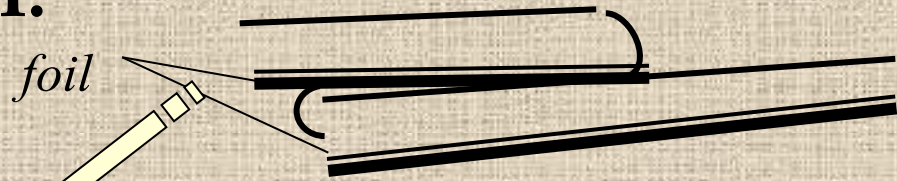


Short pulses (~ 30 ns at $f=50$ MHz) of focused ultrasound are excited in a coupling fluid and interact with a specimen placed in the focal region ($50-90$ μm).



B. Seam area I

B-scan of the seam area I:



The B-scan is a complicated layered structure that involves:

- 1) traces of echoes caused by reflection of the main part of the probe pulse at real interfaces inside the specimen body
and

- 2) lines of signals resulted from reflection of weak peaks, which enter into the tail of the probe pulse, at the specimen face.

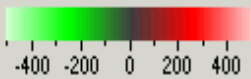
The specific peculiarity is caused by a high level of ultrasonic attenuation in pressboard - amplitudes of echo signals reflected from elements of internal microstructure are extremely small.

Special enhancement of hard- and software should be performed to divide these groups of echo signals.

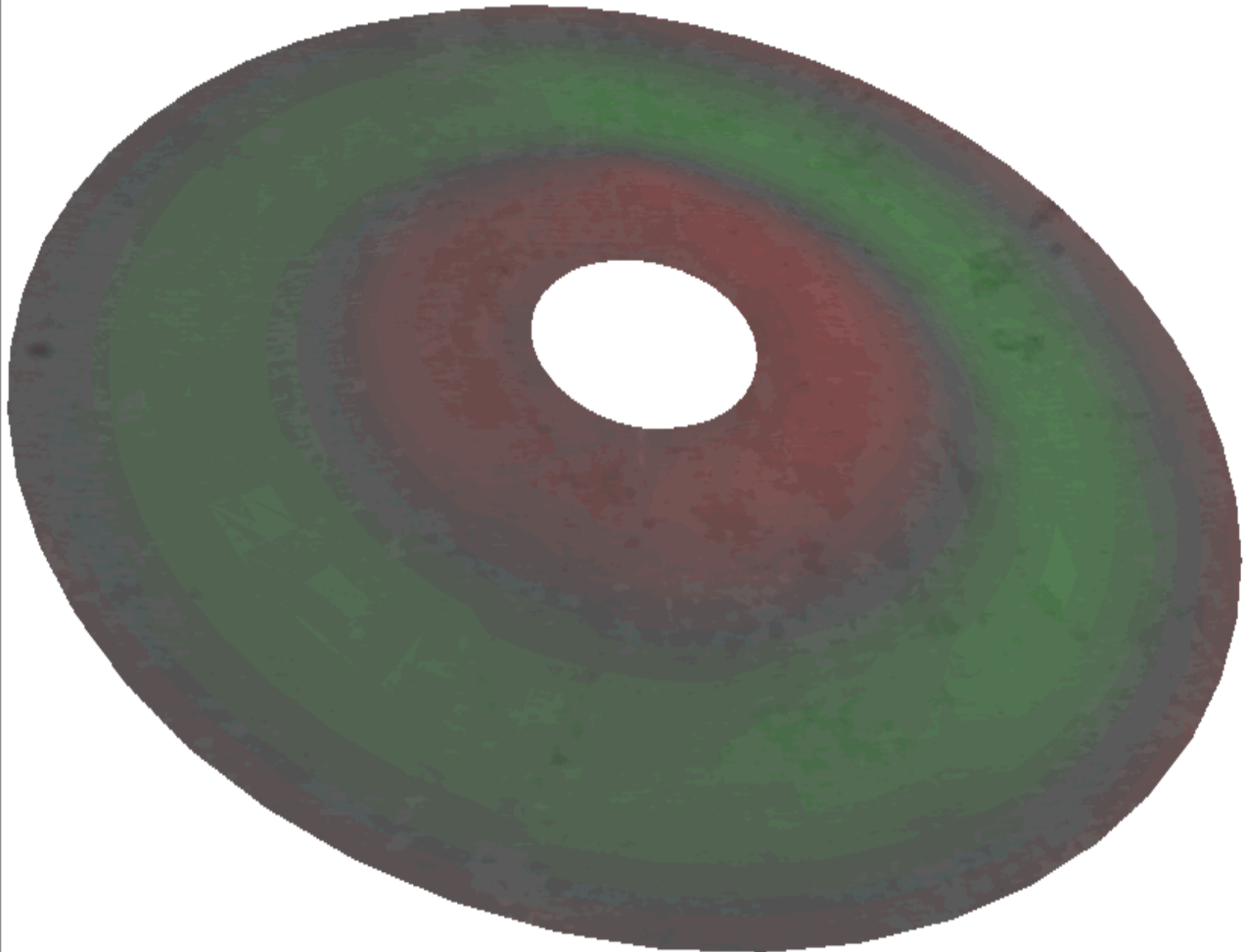
Domain FFT

Signal Vib Velocity

Inst. Value mm/s



-400 -200 0 200 400



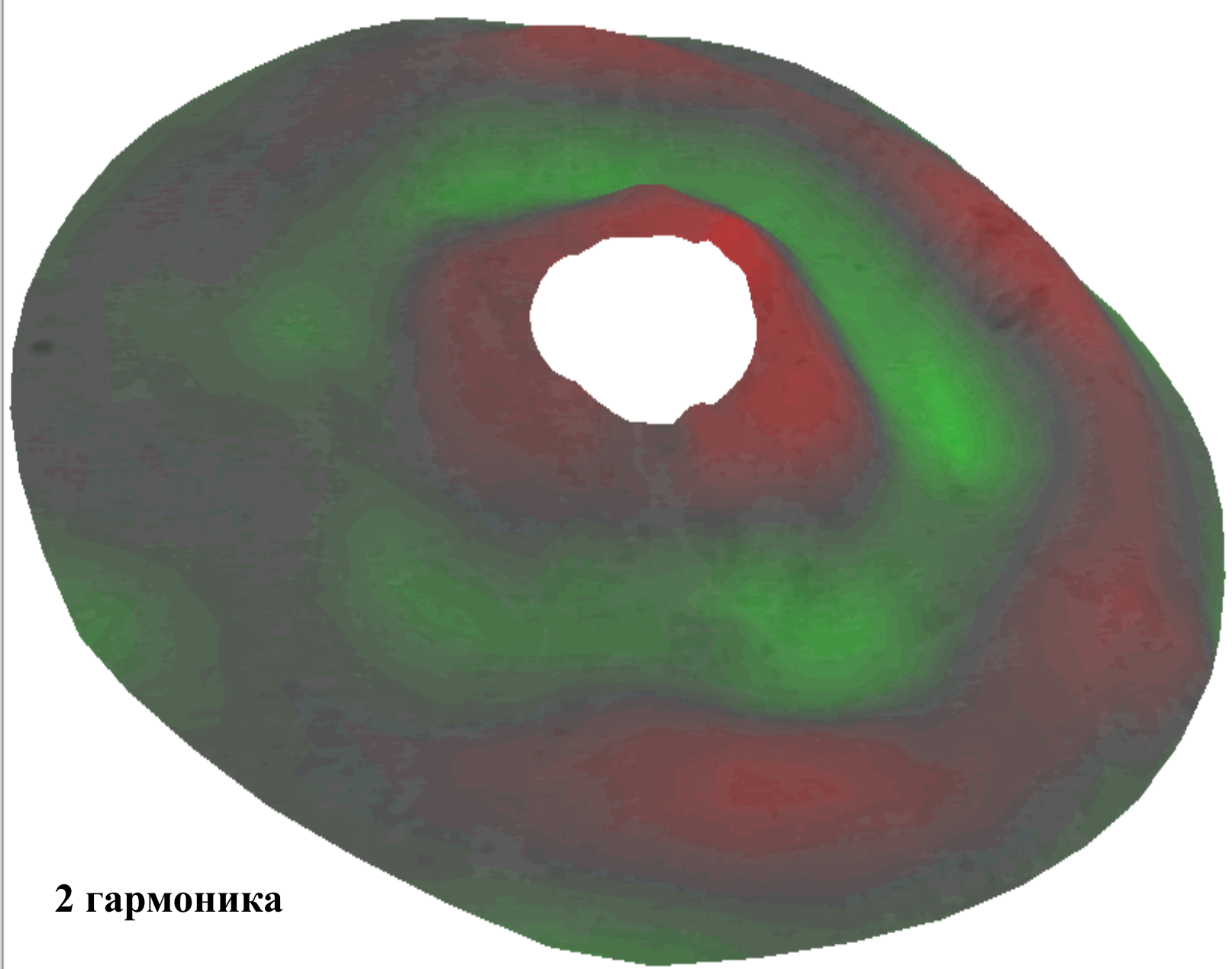
1 гармоника 2528 Гц

Domain FFT

Signal Vib Velocity

Inst. Value mm/s

-2 0 2




2 гармоника

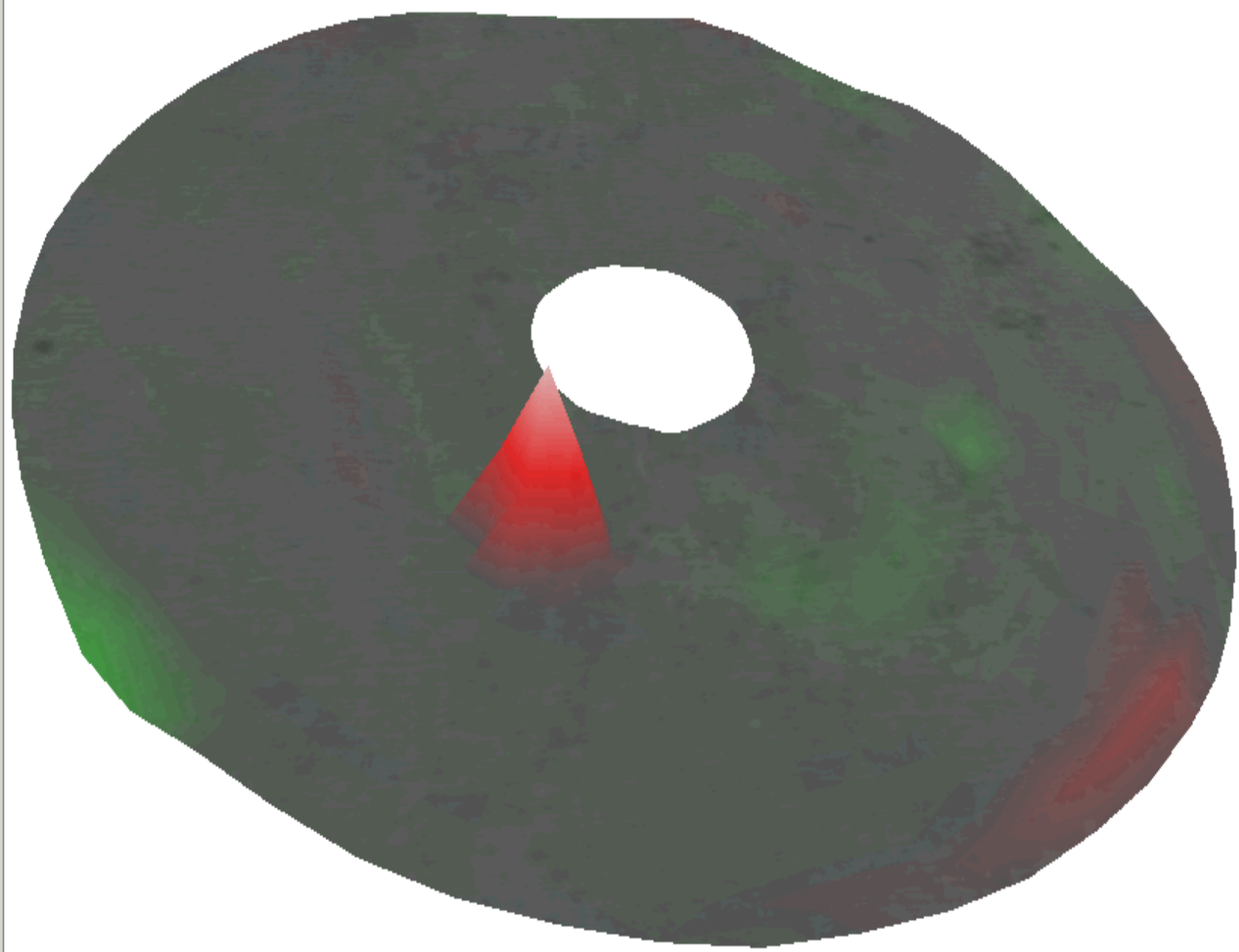
Domain **FFT**

Signal **Vib Velocity**

Inst. Value **mm/s**



A color scale legend for vibration velocity in mm/s. The scale ranges from -1 (green) to 1 (red), with 0 being black. The units are labeled as mm/s.



3 гармоника

"Половина из присутствующих не знает, что такое нанотехнологии, но знает, что без этого жить нельзя".

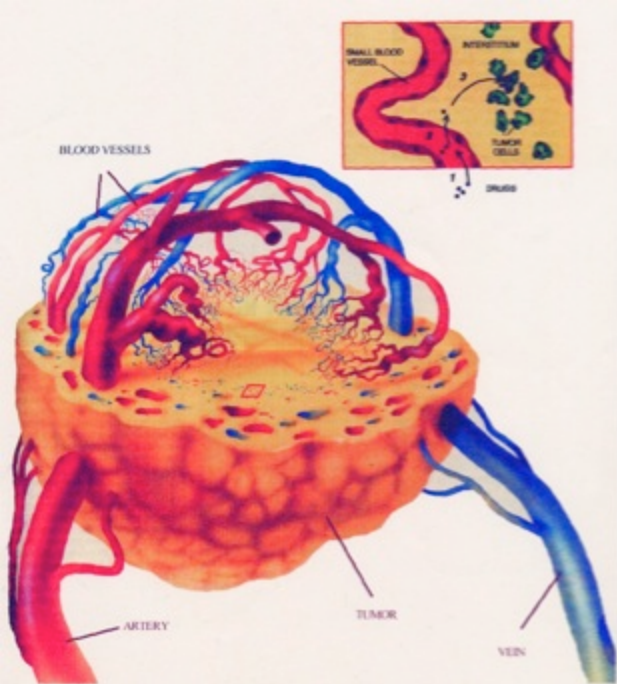
(Премьер Михаил Фрадков на заседании правительства).

Наноакустика:

1. Есть ли «акустические масштабы» порядка 1- 100 нм?
2. Может ли действие акустических волн вызывать изменения в облучаемых объектах на масштабах порядка 1- 100 нм?

Например: Медицинская наноакустика - комплекс методов и технологий, позволяющих достигать диагностических и лечебных эффектов на наномасштабном (молекулярном) уровне при УЗ воздействии.

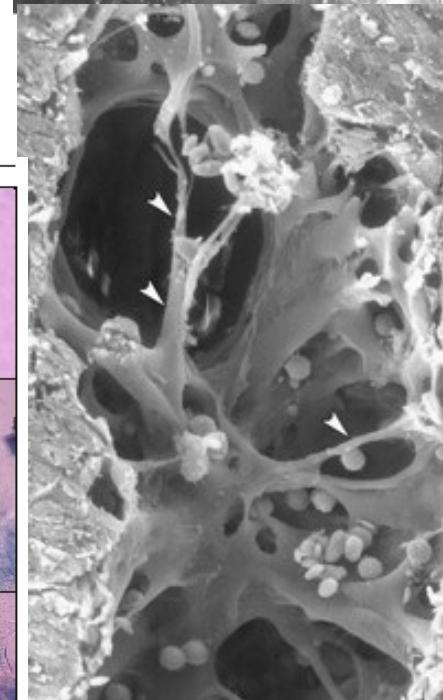
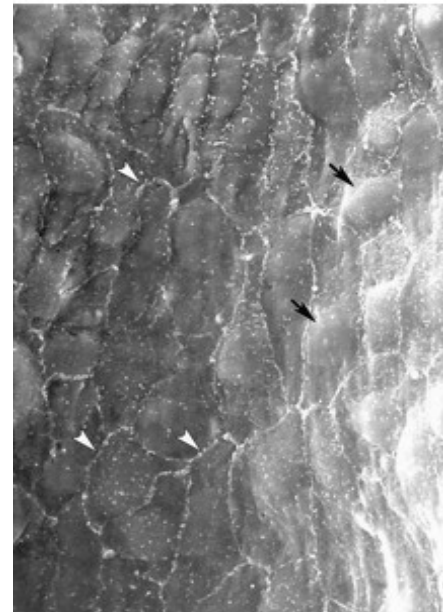
1. **Речь:** ак давление 0.002 Па, кол скорость $4 \cdot 10^{-6}$ м/с, смещение молекул воздуха **1 нм**
2. **Ширина УФ** пилообразных волн, генерируемых современными УЗ системами, уменьшается с ростом интенсивности и бывает **~100 нм**
3. **Ширина акустического погранслоя** при обтекании препятствий
$$\delta = \sqrt{\nu / \omega} \sim \mathbf{100 \text{ нм}}$$
 (на частоте 10 МГц)
4. **Характерный масштаб акустических микропотоков** в живой клетке **~ 100 нм**
5. **НМ дефекты** влияют на ак параметры сред, а звук оказывает на них обратное действие



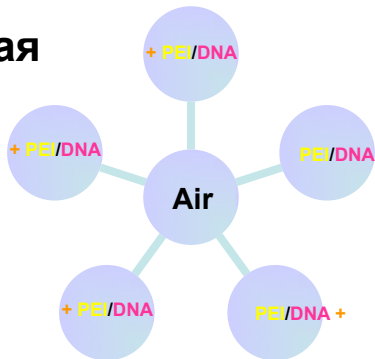
Барьеры на пути доставки лекарств:
 1 - стенки кровеносных сосудов
 2 - внутритканевое пространство
 3 - мембрана раковой клетки

Стенка кровеносного сосуда
В нормальной ткани →
В опухоли →

Частицы с размерами
менее 300 нм могут
накапливаться в
опухолях из-за наличия
пор в стенках сосудов



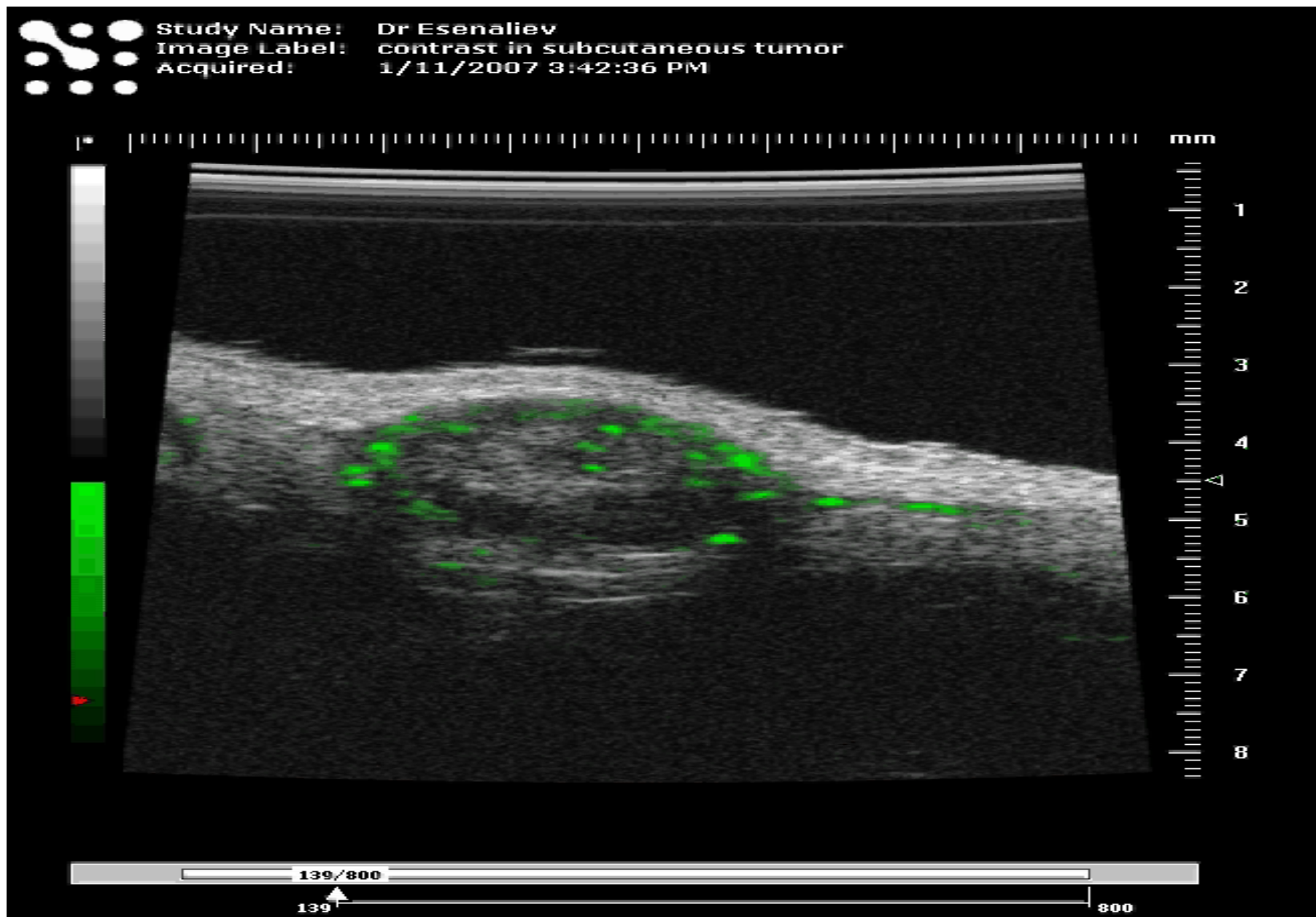
PLGA
частица,
нагруженная
маркерной
DNA



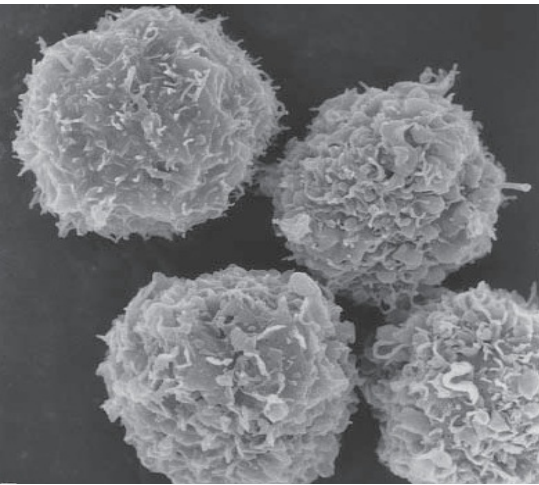
	without ultrasonication	with focused ultrasonication
PLGA + DNA		
jetPEI + DNA		
PLGA + jetPEI + DNA		

Андреев В.Г.
(каф. акустики МГУ),
Есеналиев Р.О. (Center Biomed.
Eng., Univ.of Texas, Galveston)

Накопление наночастиц в опухоли при воздействии УЗ

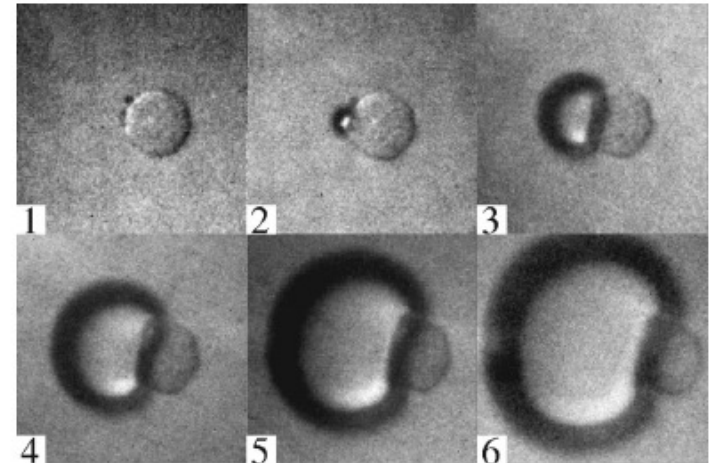
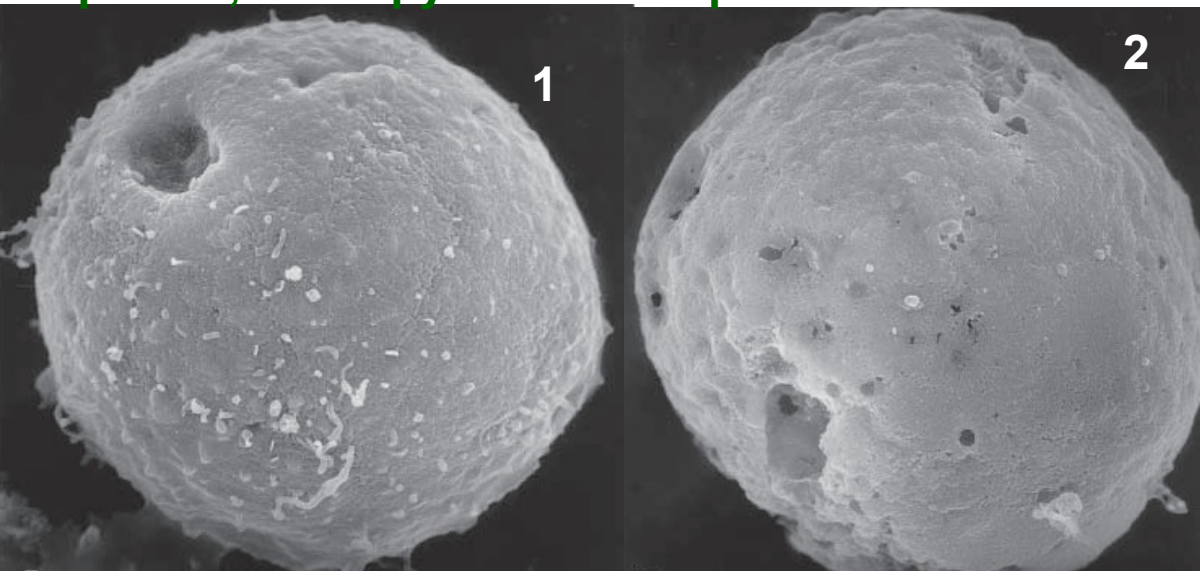


НАНОМАСШТАБНЫЕ ЭФФЕКТЫ ДЕЙСТВИЯ ТЕРАПЕВТИЧЕСКОГО УЗ на КЛЕТКУ ($I \cong 1 \text{ Вт/см}^2$, $f = 225 \text{ кГц}$, $\Delta t \cong 1 \text{ мин.}$) Ю.Н.МАКОВ

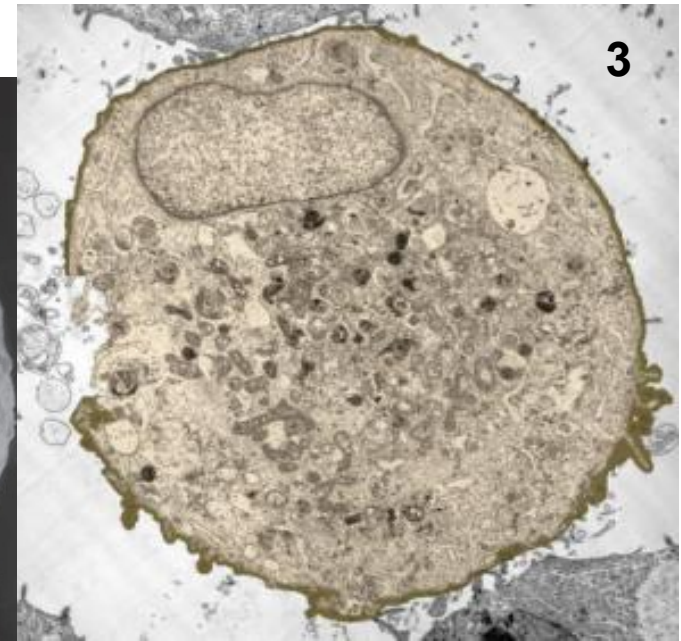


Вид «контрольных» клеток (без УЗ). Диаметр 10 мкм. На поверхности мембраны видны многочисленные глобулы и «пальцеобразные» отростки

Изменения структуры мембраны под действием УЗ. Поверхность «выглажена», образовались углубления и сквозные поры – 1, 2. Разрушения на срезе – 3



Разрушение клетки кавит пузырьком (показан рост)



**Ш.-Э. Ле Корбюзье,
С.М.Эйзенштейн,
А.К.Буров. 1927г.**

**Некоторые из домов,
построенных по
проектам А.К.Бурова
в Москве**



**Первый
панельный
дом в СССР
(«ажурный»
дом у метро
«Динамо»,
1941 г)**



Лаборатория Анизотропных Структур (ЛАС АН СССР) – один из центров, где зародилась нелинейная и биомедицинская акустика в СССР (1950-1957)

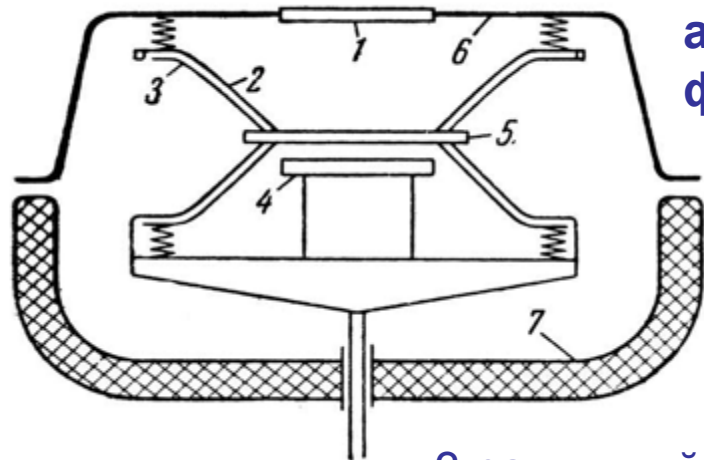
ЛАС организована чл-корр Академии архитекторы СССР А.К. Буровым.

ЛАС была секретной лаб. После обсуждений на Политбюро решение о создании ЛАС подписал лично И.Сталин.

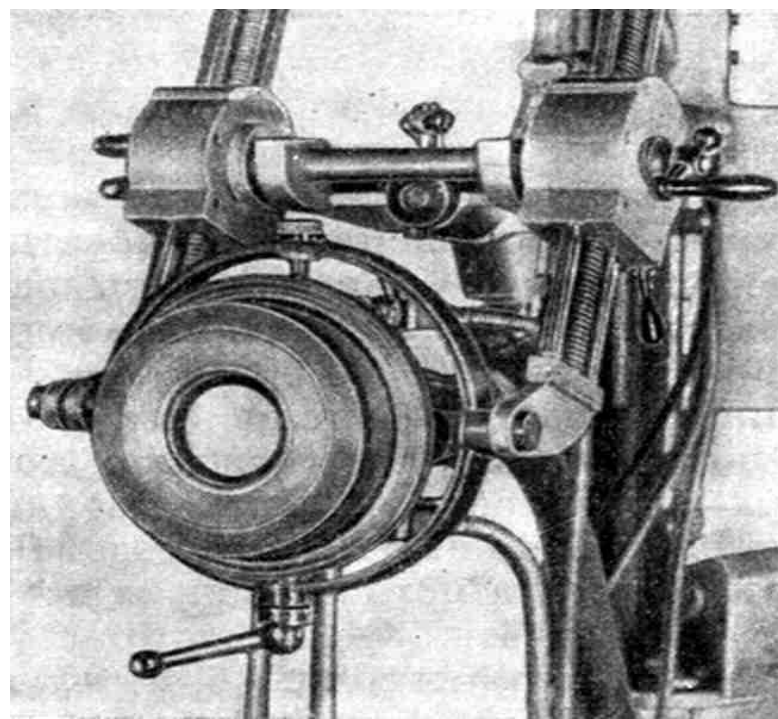
В ЛАС работали известные ученые и инженеры:

Ю.И.Китайгородский сделал радиогенераторы с вых мощностью 100 kW, в диапазоне 350 kHz-2MHz. Преобразователями были пластины природного кварца диаметром до 12 см. Достигнуты интенсивности 500 W/cm^2 в параллельных несфокусированных пучках

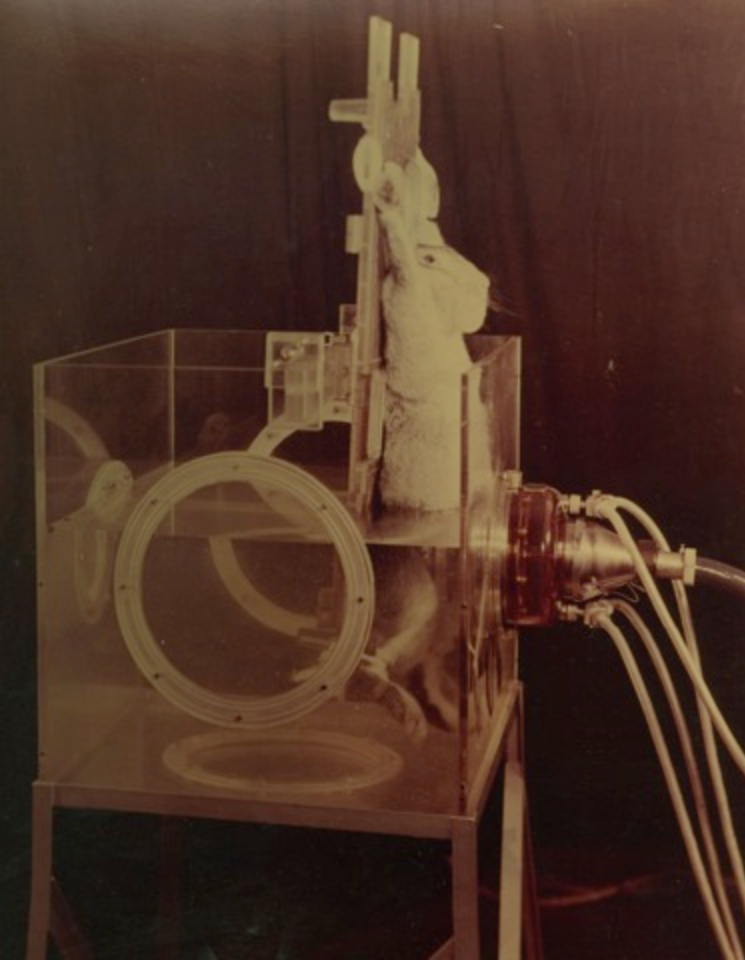
УЗ источник:
а-схема, б -
фото



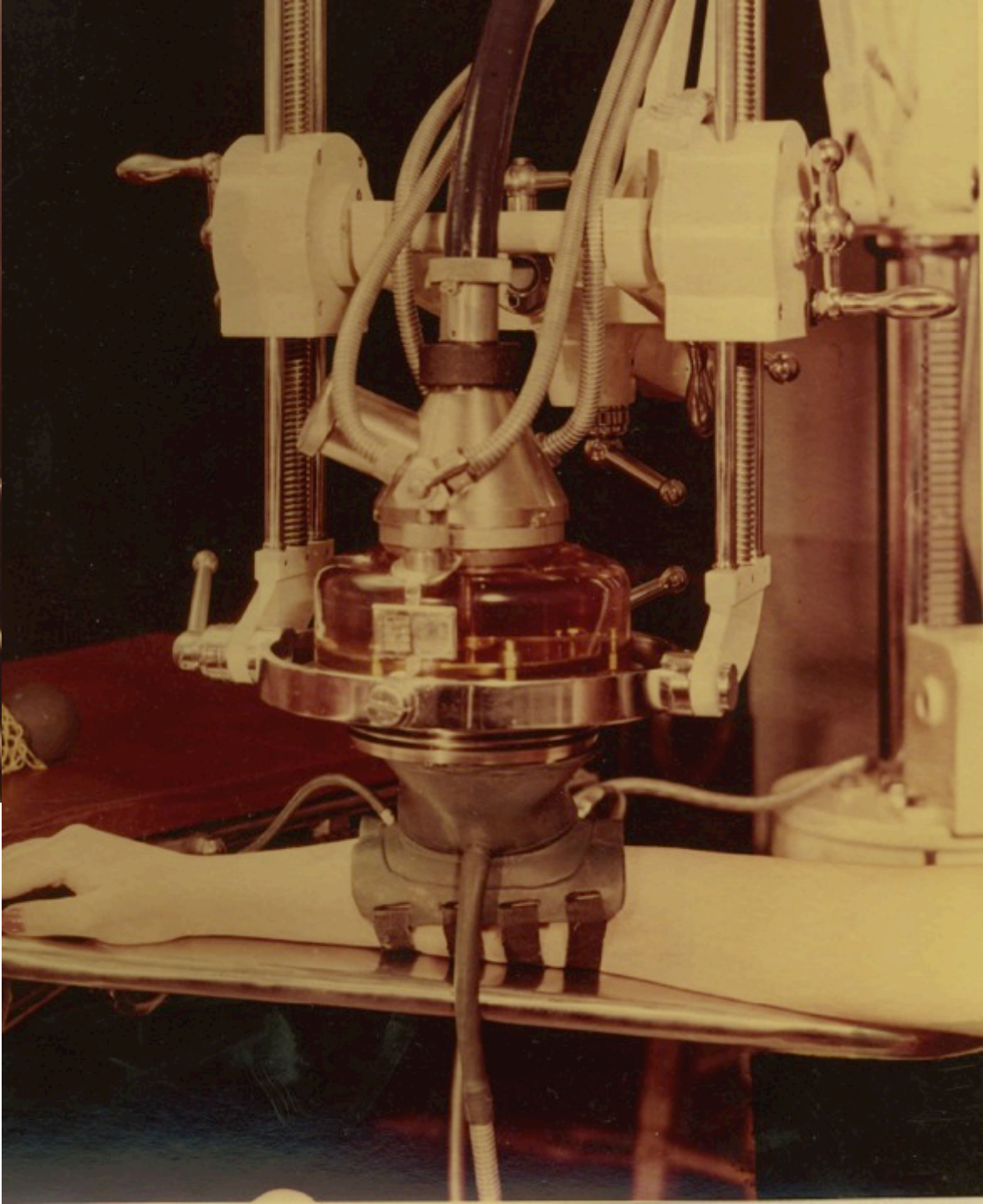
3-защитный электрод
4-четвертьволн рефлект



5-кварц, 6-мет корпус, 7-пластмассовый корпус



**УЗ воздействие на
злокачественные
опухоли человека и
кролика (А.К.Буров,
Лаборатория
Анизотропных структур
АН СССР)**

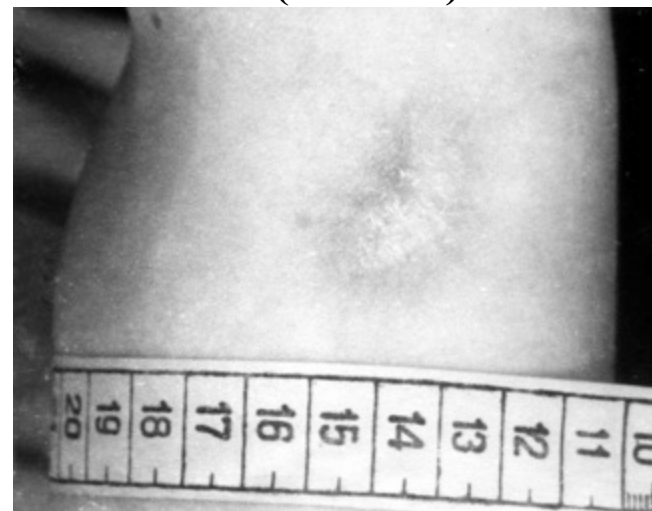


Клинические испытания производились Акад Н.Н.Блохиным в Институте эксп патологии и терапии рака (преобразованном в Онкологический центр).

Добровольцами были 12 больных меланомой на **терминальной стадии**. Полное исчезновение метастазов наблюдалось у 7 пациентов, но 5 человек умерли. Результат многократно превышает вероятность спонтанного самоизлечения (~0.0001).



а-Первичная меланобластома на руке больного до и после воздействия интенсивным ультразвуком



6а

6б



а- Первичная Меланобластома на стопе до и после облучения ультразвуком

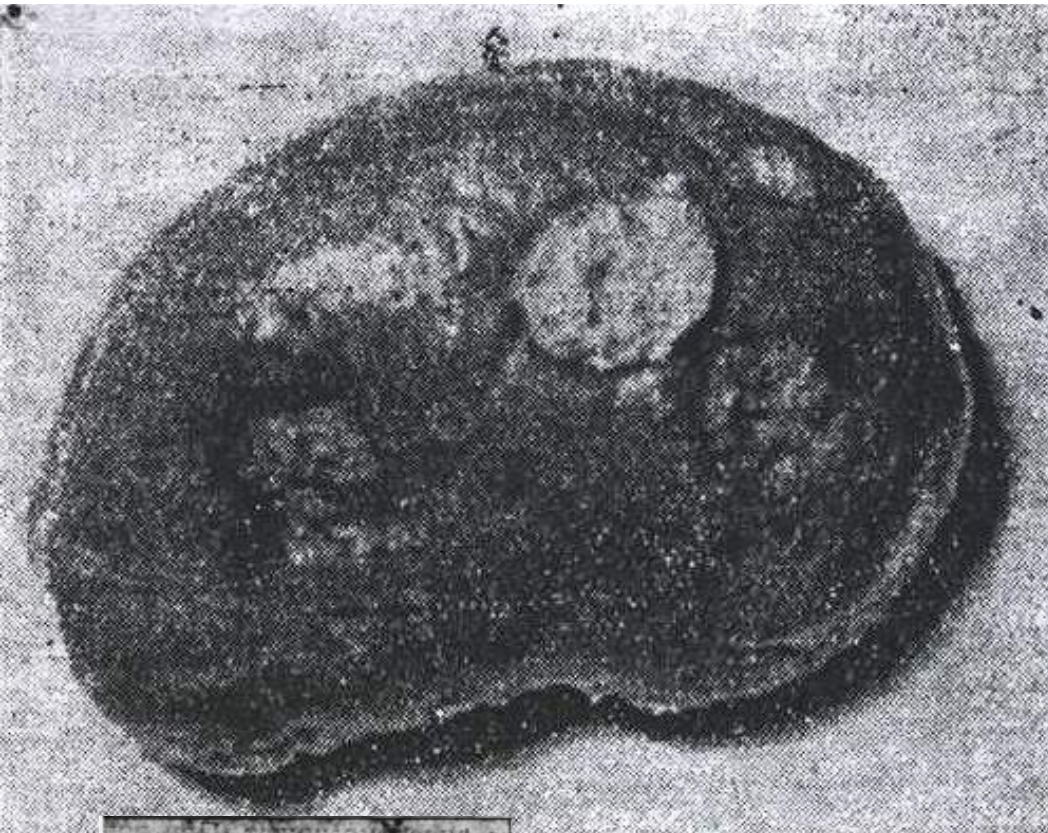


7а

7б

Некоторые эффекты УЗ облучения

*Кальцинированный
шрам на почке кролика
– след исчезнувшего
метастаза*



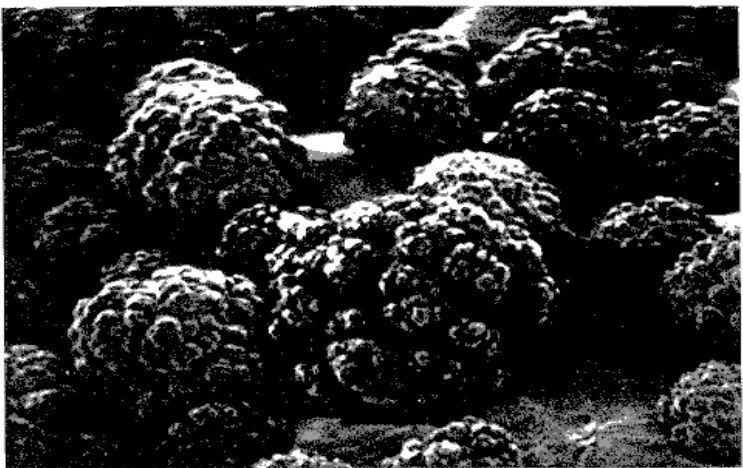
*Митохондрии клеток
опухоли **Brown-Pearce
tumor** перед УЗ
облучением (а) и через 45
мин (б) после него.*



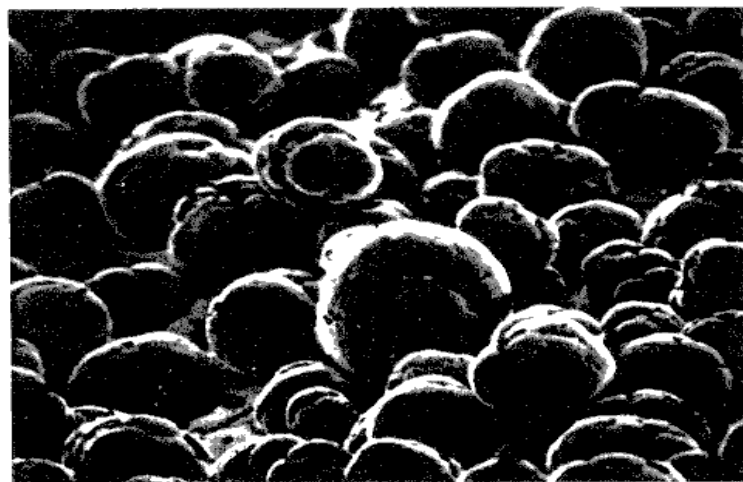
Гипотеза: теломераза выбрасывается из злокачественных клеток после их разрушения нелинейным УЗ. Освобожденный фермент стимулирует иммунный ответ. Т-лимфоциты уничтожают злокачественные клетки.

В пользу этой гипотезы свид эффективность **автовакцины**, испытанной в ЛАС в 1956 г. Гомогенизированная и облученная нелинейным УЗ опухолевая масса центрифугировалась, и **жидкая фракция** вводилась тому же больному животному. Через несколько дней злокачественный процесс подавлялся в 40-80% случаев. Однако, если вводилась **твердая (осадочная) фракция**, рост опухоли, напротив, усиливался.

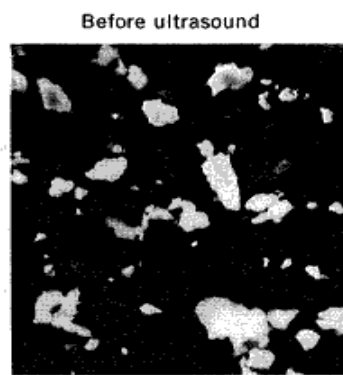
Гистологич иссл облученных клеток показали, что изменения в клетках были сильно выражены, когда источник был расположен на расстояниях порядка 2-3 длин образования разрыва в УЗ волне.



(a)

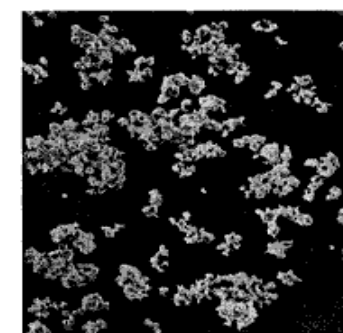
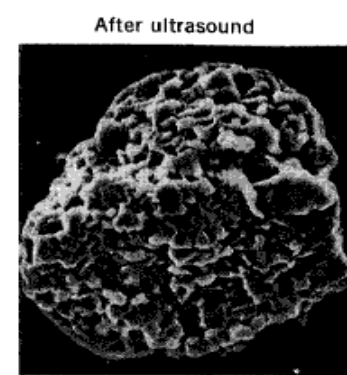


(b)



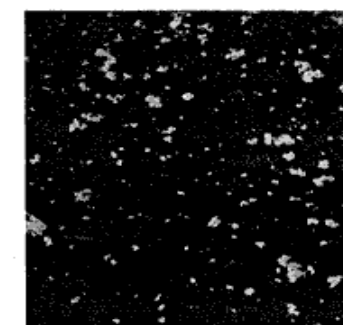
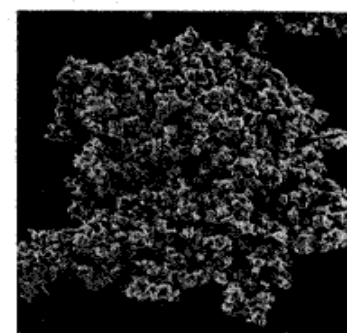
10 μm

(a)



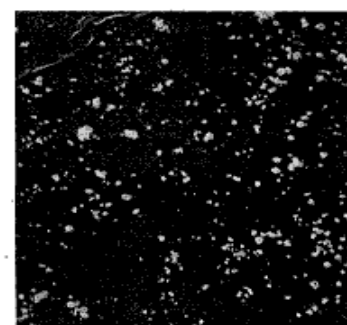
60 μm

(b)



300 μm

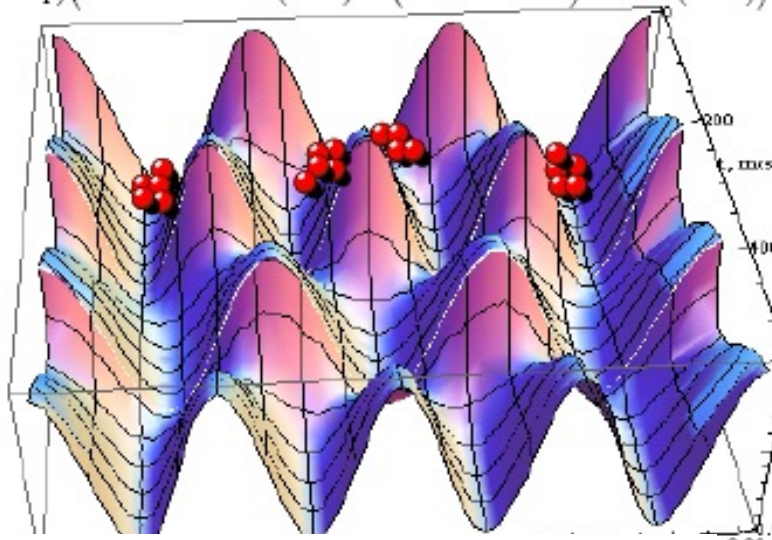
(c)



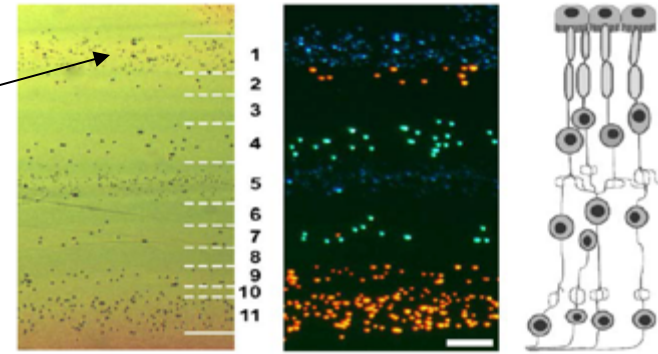
Воздействие УЗ на морфологию поверхности и размер микрочастиц никеля. Диаметр частиц до облучения 150 мкм (а), после облучения 80 мкм. УЗ способствует взаимодействию частиц и удалению окисной пленки

Воздействие УЗ на агломерацию наночастиц: (а) хрома, (б) молибдена, (с) вольфрама

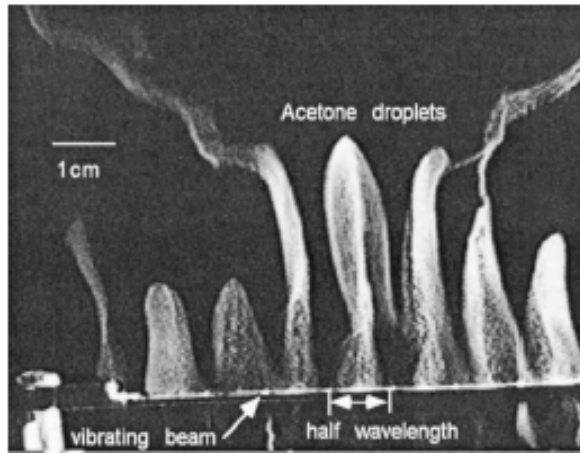
Группировка наночастиц в поле радиационных сил стоячей акустической волны



Структуры клеток в геле в поле стоячей волны



Структуры из капелек ацетона над колеблющейся пластиной



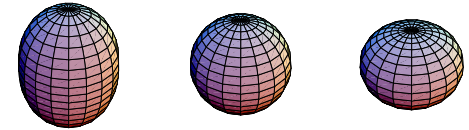
Акустическими воздействиями можно:

1. Создавать кластеры наночастиц заданной формы и размеров, с нужным распределением частиц.
2. Перемешивать и фрагментировать агрегаты частиц.
3. Внедрять наночастицы из жидкой фазы в матрицу другого материала.
4. Сепарировать наночастицы по размерам.

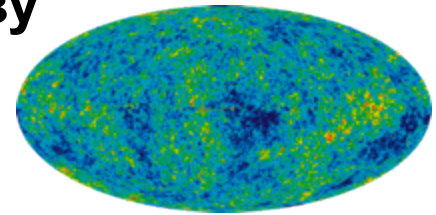
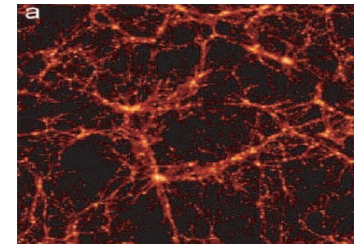
5. Бесконтактно транспортировать наночастицы по заданной траектории вдоль подложки.
6. Создать акустические левитаторы наночастиц (например, для получения сверхчистых сплавов).
7. Управлять диффузией и испарением жидких наночапель.
8. Перемещать нанороботы внутри человеческого организма.
9. Перемещать наночастицы лекарств к больному органу и делать «микроинъекции».

Принято считать, что акустика изучает главным образом речь, слух, музыкальные инструменты, аудиосистемы, концертные залы.

Это – распространенная и давно устаревшая точка зрения.



Акустические явления имеют место всюду. Диапазон масштабов – от 10^{-13} (капельная модель атомного ядра) до галактических (формирование структур галактик). Акустические волны были ответственны за формирование Вселенной сразу после Большого Взрыва.



Акустические проблемы решаются во всех 7 естественно -научных отделениях РАН. Число специалистов, занимающихся акустикой и ее приложениями, сравнимо с числом всех физиков. **Основные приложения** – медицина, геофизика, подводная связь, материаловедение, промышленность, разведка ископаемых и многое другое.

Vitalii L.Ginzburg

Nobel Prize Winner-2003

Нобелевская лекция В.Л.Гинзбурга
Стокгольм, Университет, 8 декабря
2003 г., 9-00 – 9-45





От XIX столетия Лев Термен прихватил лишь «краешек». Зато век XX достался ему почти целиком. Биография в 96 лет заслуживает уважения всегда, однако то, что довелось испытать Льву Сергеевичу – за гранью реальности. Он побывал в роли известного музыканта, американского бизнесмена, советского разведчика, сталинского зэка!... И при этом сделал десятки уникальных изобретений! Термен – в числе самых блистательных ученых прошедшего столетия... И один из наиболее загадочных людей XX века.



Сер
Ник

Александр



Справа: Сергей Николаевич Ржевкин. Основал кафедру акустики в 1943 г. и заведовал ею до 1975 г. **В центре: Владимир Александрович Красильников,** зав.кафедрой с 1975 по 1987 г. **Слева: Лев Константинович Зарембо**

**Ректор МГУ академик Р.В.Хохлов и профессор
В.А.Красильников в Президиуме
Международного Симпозиума по Нелинейной
Акустике (Москва, 1975)**

