

2 марта 2020, Нижний Новгород

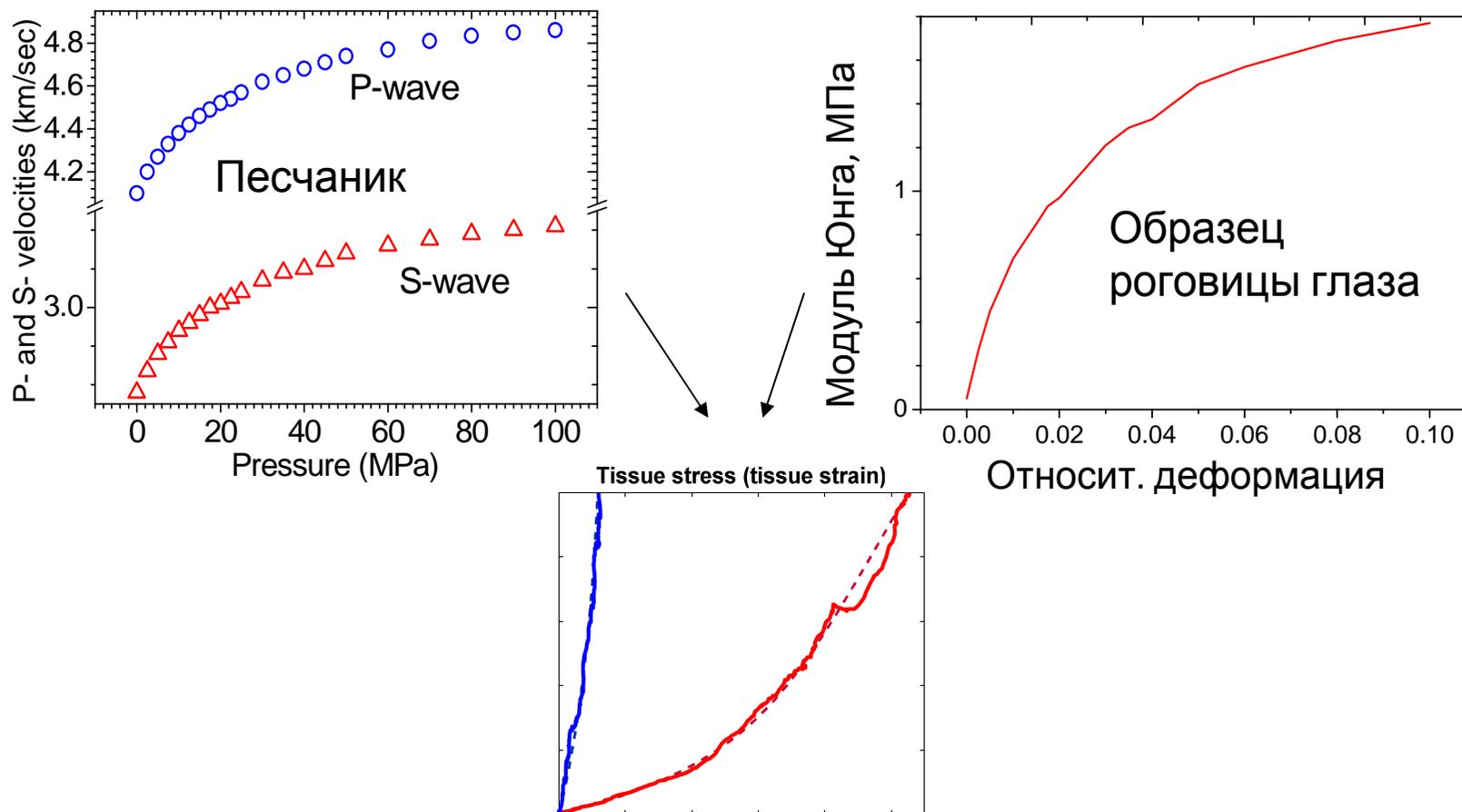
**Оценивание свойств "мягких дефектов"
по нелинейности связи напряжение-
деформация: от применений в сейсмике
до эласто-биопсии в медицине**



В.Ю. Зайцев

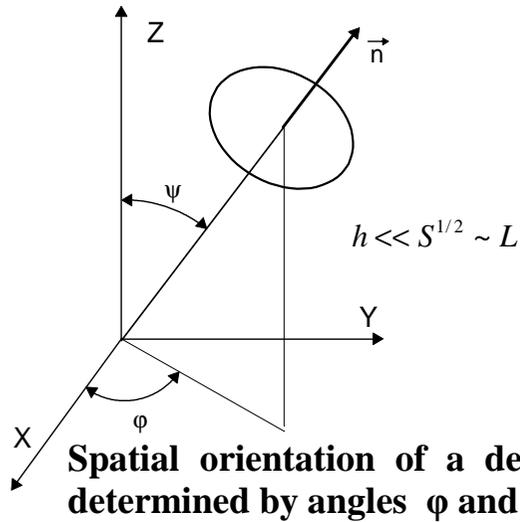
Институт прикладной физики РАН

Чем похожи горные породы и биоткани? Нелинейный характер деформирования



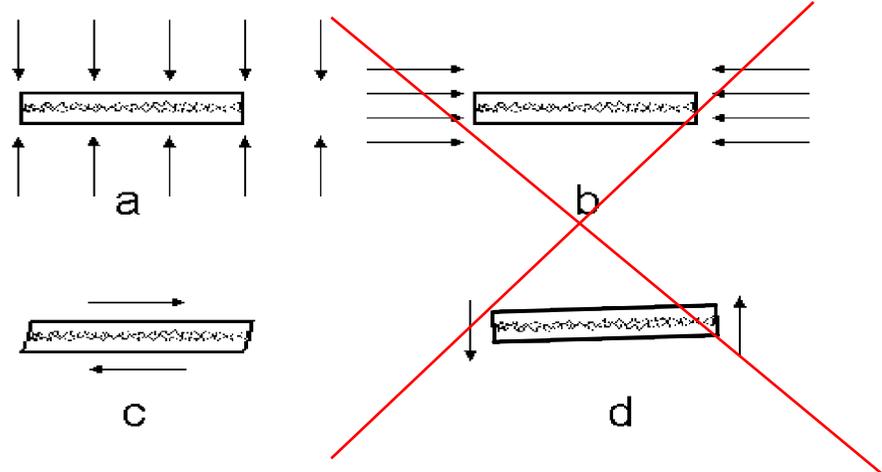
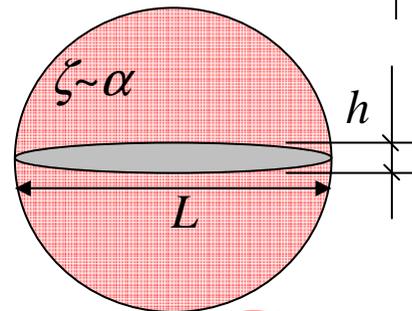
**Общее свойство – нелинейность характера деформирования
связана с наличием трещиноподобных «мягких дефектов»**

Описание трещиносодержащих сред: модели с 1960-х годов



- We are not interested in near-spherical (cylindrical) cavities as they are not highly compliant inclusions in normal (not rubber-like) solids
- The defects are considered as some planar objects

Schematically shown planar defect under the action of applied stress



$\varepsilon_{clos} \sim h/L = \alpha$ -деформация закрытия трещины

$E_{cr} \sim (h/L)E = \zeta E$ -эффективный модуль трещины, $\zeta \ll 1$

$W = \frac{E_{cr} \varepsilon_{cr}^2}{2} V_{cr} \sim \left(\frac{h}{L}\right)E \cdot \left(\frac{L}{h}\right)^2 \varepsilon^2 \cdot L^2 h = E \varepsilon^2 \cdot L^3$

-энергия копится во всем объеме описанной вокруг трещины сферы

- Planar (e.g., crack-type) defects are **highly compliant only in cases (a) and (c)**



Calculating the elastic energy stored and dissipated at the defects, we can neglect the shares related to cases (b) and (d), and take into account only the shares related to cases (a) and (c) when finding the moduli of the cracked medium

Общепринятые модели упругости трещиноватых сред с изотропной ориентацией дисковых (penny-shape) трещин

$\Gamma = N \langle a^3 \rangle / V = n \langle a^3 \rangle$ - эффективная концентрация трещин; ν - коэффициент Пуассона

При малой концентрации
(Walsh 1965, Mori-Tanaka 1973)

$$\frac{K}{K_0} = \left[1 + \frac{16}{9} \frac{(1-\nu_0^2)}{(1-2\nu_0)} \Gamma \right]^{-1}$$

$$\frac{G}{G_0} = \left[1 + \frac{32}{45} \frac{(1-\nu_0)(5-\nu_0)}{(2-\nu_0)} \Gamma \right]^{-1}$$

$$+ \quad \nu = (3K - 2G)/(6K + 2G)$$

“Self-consistent” model
(Budiansky&O’Connell 1974)

$$\frac{K}{K_0} = 1 - \frac{16}{9} \frac{(1-\nu^2)}{(1-2\nu)} \Gamma$$

$$\frac{G}{G_0} = 1 - \frac{32}{45} \frac{(1-\nu)(5-\nu)}{(2-\nu)} \Gamma$$

$$\Gamma = \frac{16}{45} \frac{(\nu_0 - \nu)(2 - \nu)}{(1 - \nu^2)(10\nu - 3\nu\nu_0 - \nu)}$$

$$\nu \approx \nu_0 \left(1 - \frac{16}{9} \Gamma \right)$$

переоценивает роль
трещин

Дифференциальный подход
(Салганик-Вавакин 1974,
Zimmerman 1985, 1991)

$$\frac{K}{K_0} = \frac{(1-2\nu_0) \exp(-16\Gamma/9)}{1-2\nu_0 \exp(-8\Gamma/5)}$$

$$\nu = \nu_0 \exp(-8\Gamma/5)$$

$$+ \quad \nu = (3K - 2G)/(6K + 2G)$$

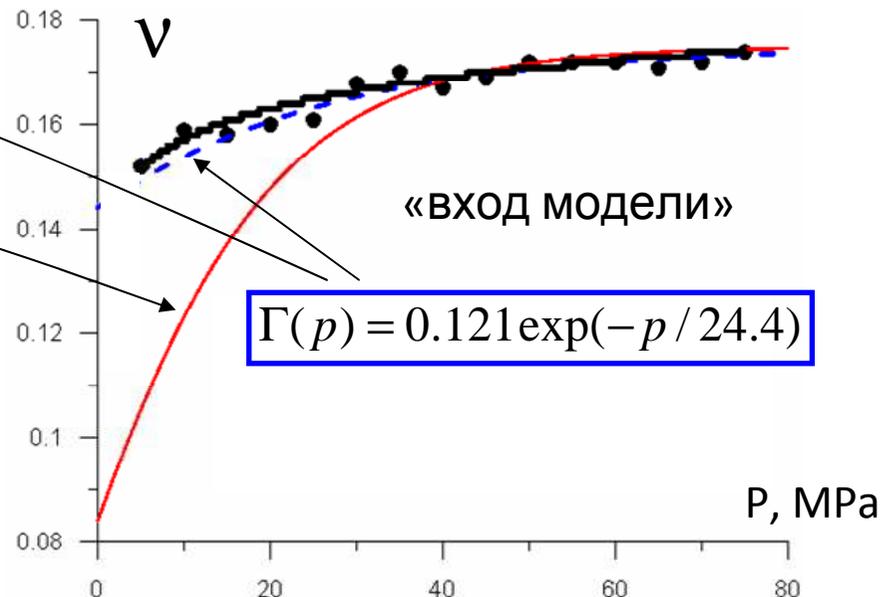
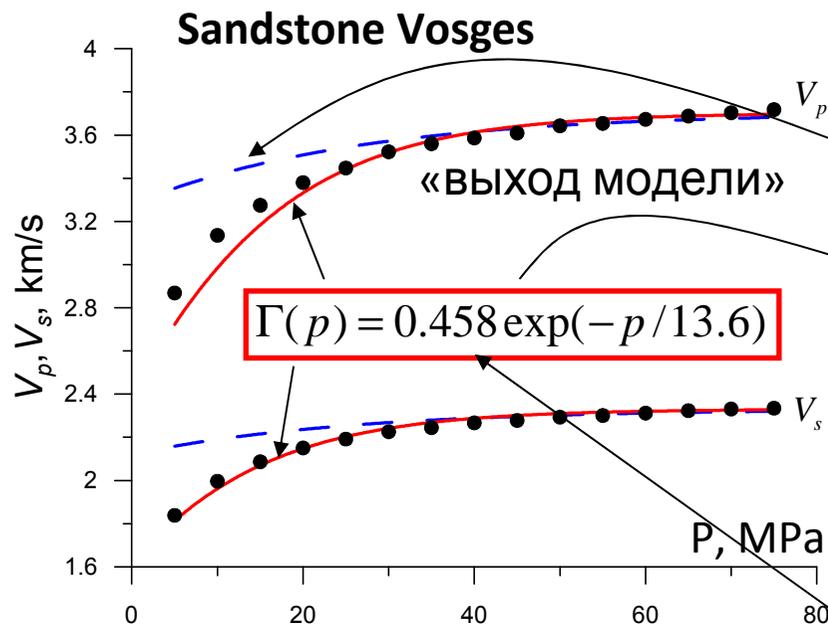
- считается наиболее
адекватным

Дополнительно для интерпретации данных по зависимостям скоростей сдвиговых и продольных волн от давления используется аппроксимация

$$\Gamma(p) = \Gamma^i \exp(-p / \hat{p})$$

(аргументируется приблизительно экспоненциальной зависимостью изменений податливостей $(1/K - 1/K_0)$ и $(1/G - 1/G_0)$ от давления в экспериментах)

Пример интерпретации эксперимента на основе дифференциальной модели, считающийся в литературе успешным, но лишь на первый взгляд... (пример взят из *David E., Zimmerman R. // J. Geophys. Res. 2012. 117, B07210*)



Дифференциальный подход
(Zimmerman, 1991)

$$\frac{K}{K_0} = \frac{(1 - 2\nu_0) \exp(-16\Gamma/9)}{1 - 2\nu_0 \exp(-8\Gamma/5)}$$

$$\nu = \nu_0 \exp(-8\Gamma/5)$$

$$\nu = (3K - 2G)/(6K + 2G)$$

$$V_p^2 = (K + 4G/3)/\rho^i \quad V_s^2 = G/\rho$$

$$\Gamma(p) = \Gamma^i \exp(-p/\hat{p})$$

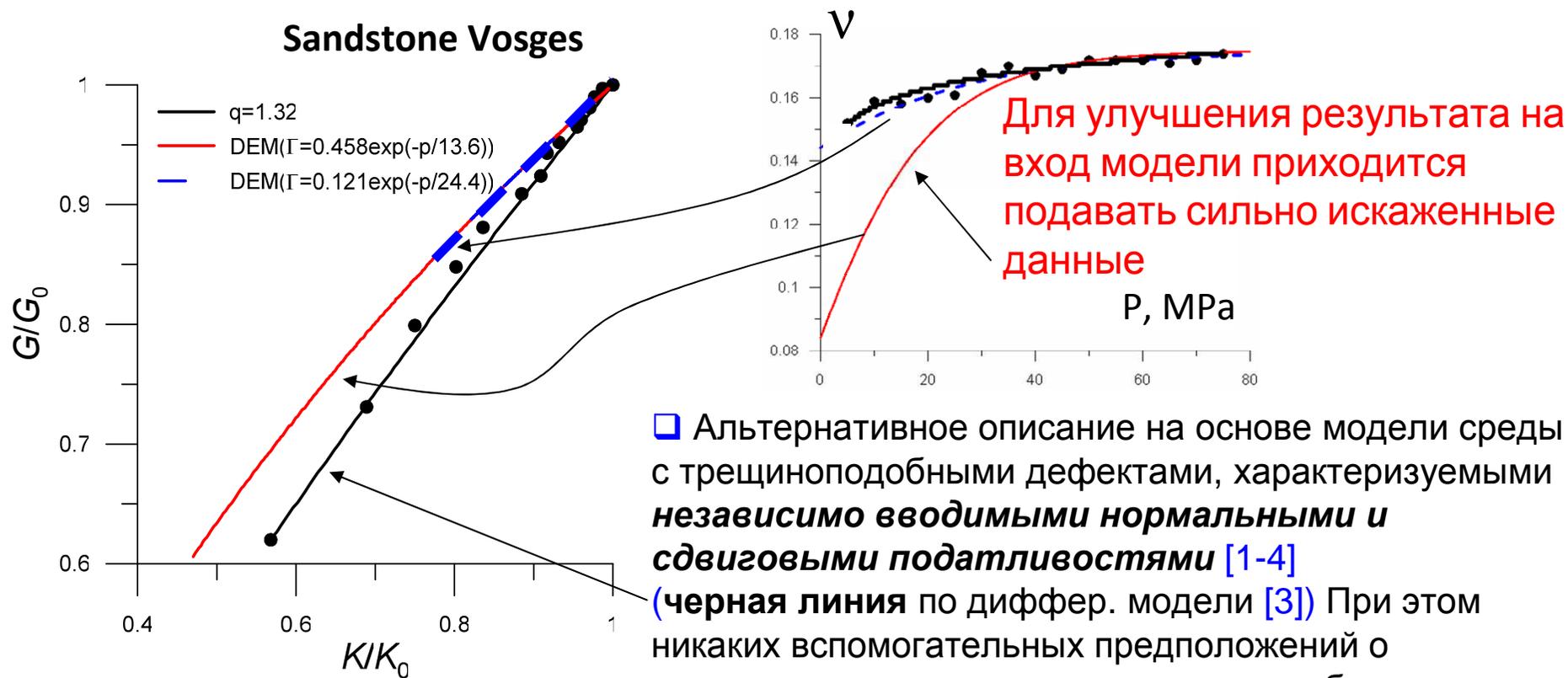
Этот пример в статье приведен как успешный, хотя реально

имеет место грубое нарушение самосогласованности данных на входе и выходе модели !!!

В литературе этот факт не замечается или молчаливо игнорируется...

Представление тех же данных и аппроксимаций на плоскости (K,G) – здесь нет маскирующего влияния предполагаемой формы $\Gamma(p)$

Кривые (красная и синяя штриховая), соответствующие выражениям для модели дискообразных трещин, значительно отклоняются от экспериментальных точек:

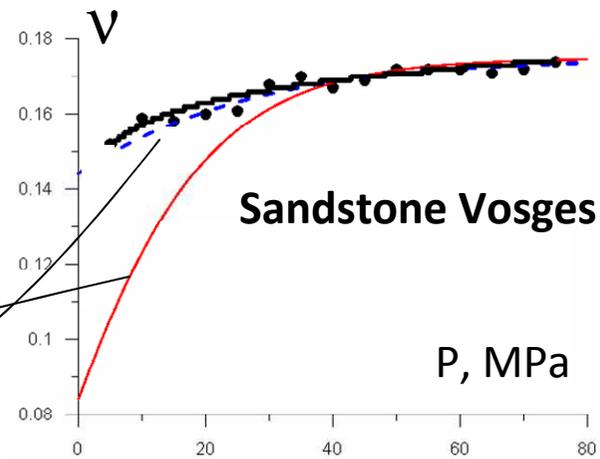
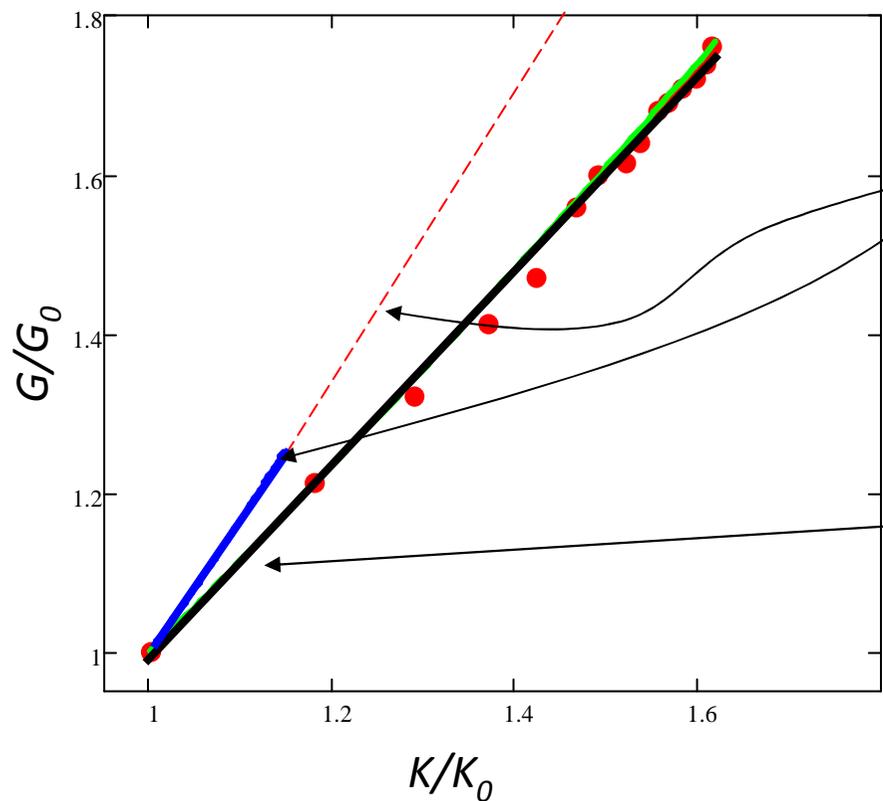


Альтернативное описание на основе модели среды с трещиноподобными дефектами, характеризуемыми **независимо вводимыми нормальными и сдвиговыми податливостями [1-4]** (черная линия по диффер. модели [3]) При этом никаких вспомогательных предположений о зависимости от давления делать не требуется.

1. Zaitsev V., Sas P. // Acustica-Acta Acustica, v.86, 216-228 (2000),
2. Zaitsev V., Sas P. // Phys. Mesomech. **7**, 37. (2004)
3. Zaitsev V., Radostin A., Pasternak E., Dyskin A. // Int. J. Rock Mech. Min. Sci. **97**, 122 (2017).
4. Zaitsev V., Radostin A., Pasternak E., Dyskin A. // Non. Pr. Geophys. **24**, 543. (2017)

Почему же подход [1-4] обеспечивает согласование входа и выхода модели?

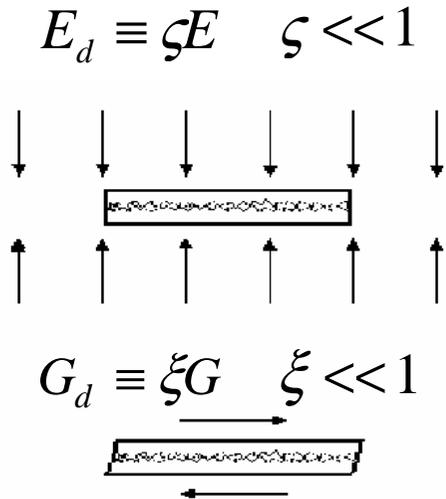
Те же данные для песчаника Vosges, но модельные кривые
стартуют с минимального давления



□ Альтернативное описание на основе модели среды с трещиноподобными дефектами, характеризуемыми **независимо вводимыми нормальными и сдвиговыми податливостями** [1-4] с предыдущего слайда

Описание среды на основе модели трещины как мягкого планарного объекта с параметрами податливости по отношению к сжатию по нормали и сдвигу

(Zaitsev, Sas, *Acustica-Acta Acustica* 2000; затем MacBeth, *Geophysics* 2004)



$$\tilde{K} = \frac{K_{eff.}}{K_0} = \frac{1}{1 + \frac{1}{3} N_n / (1 - 2\nu_0)}$$

$$\tilde{G} = \frac{G_{eff.}}{G_0} = \frac{1}{1 + \frac{2}{15} N_n / (1 + \nu_0) + \frac{2}{5} N_s}$$

$$\tilde{E} = \frac{E_{eff.}}{E_0} = \frac{1}{1 + \frac{1}{5} N_n + \frac{4}{15} (1 + \nu_0) N_s}$$

K_0, G_0, E_0, ν_0 –
начальные
значения в
однородном
материале

Коэффициент Пуассона:

$$\nu(K, G) = \frac{(3K - 2G)}{(6K + 2G)}$$

$$\left. \begin{aligned} N_n &= \int f(\zeta) \zeta^{-1} d\zeta \\ N_s &= \int f(\xi) \xi^{-1} d\xi \end{aligned} \right\} \begin{array}{l} \text{Эти параметры пропорциональны} \\ \text{значениям податливости к сжатию} \\ \text{и сдвигу, а по величине близки к} \\ \text{удельному эффективному объему} \\ \text{трещин} \end{array}$$

Разная зависимость различных модулей от N_n и N_s открывает возможность определить **ключевое свойство трещин** - отношение податливостей по нормали и по сдвигу: **$q = N_n / N_s$**

Для penny-shape трещин (где $B = Z_n / Z_T$ по Качанову):

$$q = (1 + \nu_0)(2 - \nu_0) = 2(1 + \nu_0)B$$

$$2 \leq q \leq 2.25 \quad \text{для } 0 \leq \nu_0 \leq 0.5$$

Переход к дифференциальному описанию

при изменении количества дефектов на небольшую величину свойства материала уже изменены из-за влияния уже существующих дефектов и продолжают изменяться с дальнейшим изменением их концентрации

$$\frac{K + \Delta K}{K} = \frac{1}{1 + \frac{1}{3} \Delta N_n / (1 - 2\nu_0)} \approx 1 - \frac{1}{3(1 - 2\nu_0)} \Delta N_n \quad \Rightarrow \quad \left\{ \begin{array}{l} \frac{dK}{dN_n} = -\frac{K}{3[1 - 2\nu(K, G)]} \\ \frac{dG}{dN_n} = -G \left\{ \frac{2}{15[1 + \nu(K, G)]} + \frac{2}{5q} \right\} \end{array} \right.$$

$$\frac{G + \Delta G}{G} = \frac{1}{1 + \frac{2}{15(1 + \nu_0)} \Delta N_n + \frac{2}{5} \Delta N_s} \approx 1 - \frac{2}{15(1 + \nu_0)} \Delta N_n - \frac{2}{5} \Delta N_s$$

где $q = N_n / N_s$

□ При очень малой концентрации дефектов и, соответственно, очень малых изменениях модулей эти подходы эквиваленты

□ Дифференциальное описание позволяет начинать расчет с любого начального состояния, т.е. прогнозировать результат как увеличения, так и уменьшения концентрации дефектов, что может быть практически особенно важно

Аналитическое решение дифференциальной модели через параметр $t = G / K$

$$\frac{K}{K_0} = \frac{t_0}{t} \left| \frac{R-t-\beta}{R-t_0-\beta} \right|^{\frac{4\beta+15+4R}{8R}} \left| \frac{R+t+\beta}{R+t_0+\beta} \right|^{\frac{4\beta+15-4R}{8R}}$$

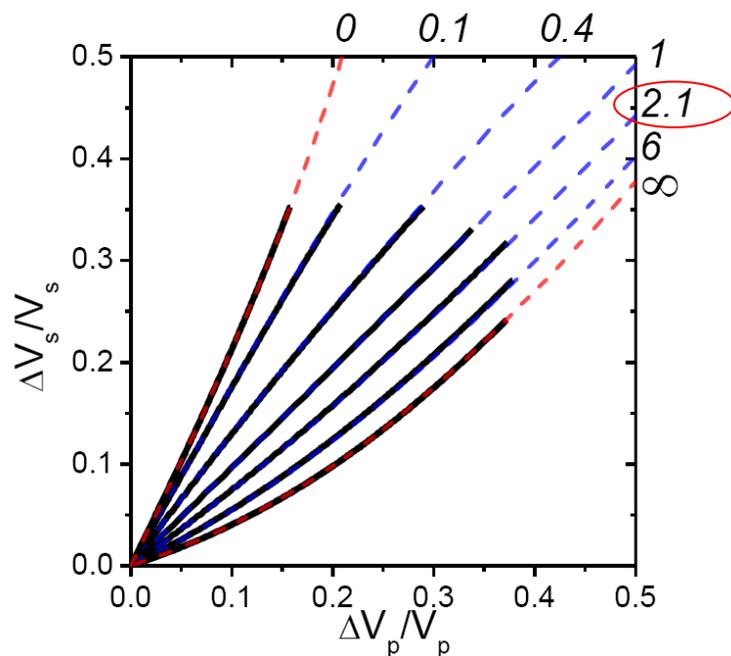
$$G = Kt$$

$$t = \frac{1}{\left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2 - \frac{4}{3}}$$

$$N_n - N_{n0} = \frac{135}{8R} \ln \left\{ \left| \frac{R-t-\beta}{R-t_0-\beta} \right|^{-1} \left| \frac{R+t+\beta}{R+t_0+\beta} \right| \right\}$$

$$N_s - N_{s0} = (N_n - N_{n0}) / q$$

где $\beta = 27/4q - 3/8$ $R = \sqrt{45/4 + \beta^2}$



Модель penny-shape cracks дает фактически одну единственную траекторию $q \sim 2.1$ (!!!)

Изменения скоростей S- and P-волн в зависимости от значений параметра q , $0 \leq q < \infty$ при одинаковых концентрациях дефектов.

Толстые линии – модель no-interaction

Пунктирные линии – дифференциальная модель

Граничные линии являются аналогом ограничений Хашина – Штрикмана.

(Hashin, Shtrikman,

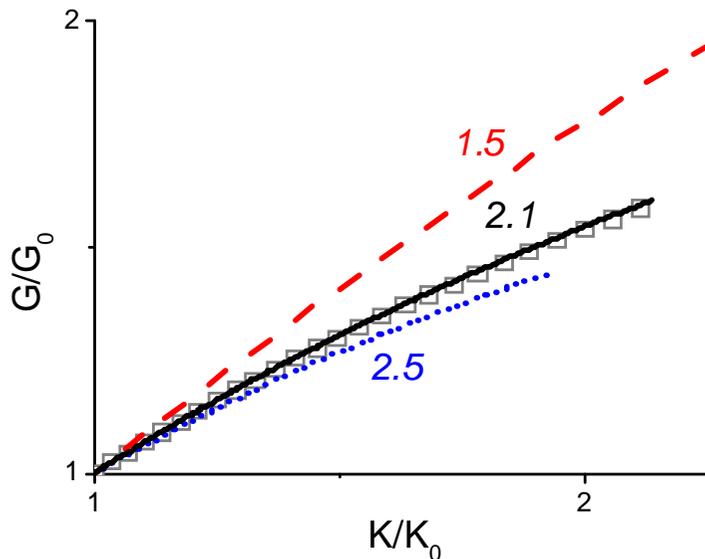
J Mech Phys Solids 1963)

Сравнение с моделью penny-shaped cracks

Решение [Zimmerman, 1985], переформулированное через параметр t

$$\frac{K}{K_0} = \frac{t_0}{t} \left| \frac{t-3/2}{t_0-3/2} \right|^{10/9} \left| \frac{t+15/8}{t_0+15/8} \right|^{-1/9} \quad t = G/K$$

$$\Gamma - \Gamma_0 = \ln \left\{ \left| \frac{t+3/4}{t_0+3/4} \right|^{15/64} \left| \frac{t-3/2}{t_0-3/2} \right|^{-5/8} \left| \frac{t+15/8}{t_0+15/8} \right|^{5/128} \right\}$$



Квадраты - решение [Zimmerman, 1985] для penny-shaped трещин

Черная линия – решение при $q=2.1$;

Штриховая линия – решение при $q=1.5$

Точки – решение при $q=2.5$.

Все графики построены для одинакового входного интервала $t \in [0.75, 1]$, но на выходе модели интервалы t оказываются разными.

Наше решение при $q=2.1$ с хорошей точностью совпадает с решением для penny-shaped cracks !

Как же должна работать правильная модель, чтобы вход и выход совпали?

Эксперимент дает $G(p)$ и $K(p) \Rightarrow$ экспериментальная траектория на (K,G) -плоскости и экспериментальные значения $t=G/K$ (**давление пока исключаем из рассмотрения**)

$K^{experim}, G^{experim}$,
даем на вход \Rightarrow модели в качестве $t_{initial}^{experim} \rightarrow t_{final}^{experim}$
 $t_{initial}^{input} \rightarrow t_{final}^{input}$

Зависимость от давления – отдельный вопрос:

надо использовать "разумную" форму аппроксимации $t(p) \Rightarrow$ получим $G(p)$ и $K(p)$

q -ratio надо поправить

Для данного q -ratio, модель предсказывает $G(p)$ и $K(p)$

Получаем предсказанные траекторию $(G,K)_{predict}$ и интервал $t_{initial}^{predict} \rightarrow t_{final}^{predict}$

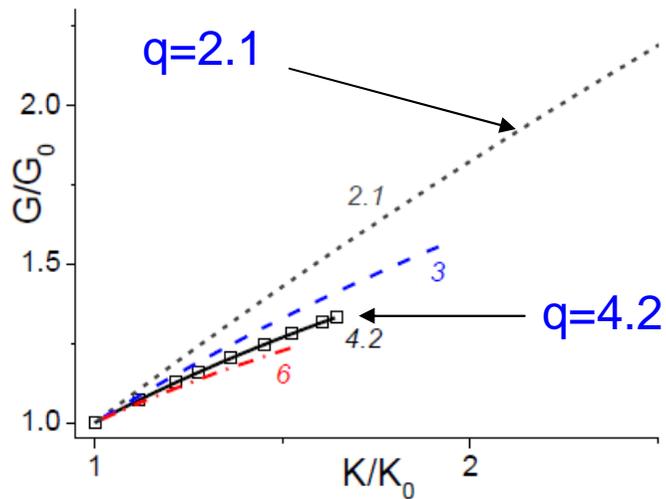
Проверяем согласование направлений $(G,K)_{predict}$ и $(G,K)_{experim}$,
и интервалов $(t_{initial}^{input} \rightarrow t_{final}^{input}) = (t_{initial}^{experim} \rightarrow t_{final}^{experim}) = (t_{initial}^{predict} \rightarrow t_{final}^{predict})$

(последний критерий часто упускается из виду!)

НЕТ

ДА \Rightarrow модель корректна и ее вход и выход согласованы

Пример самосогласованной интерпретации эксперимента: важность использования правильного q в модели !

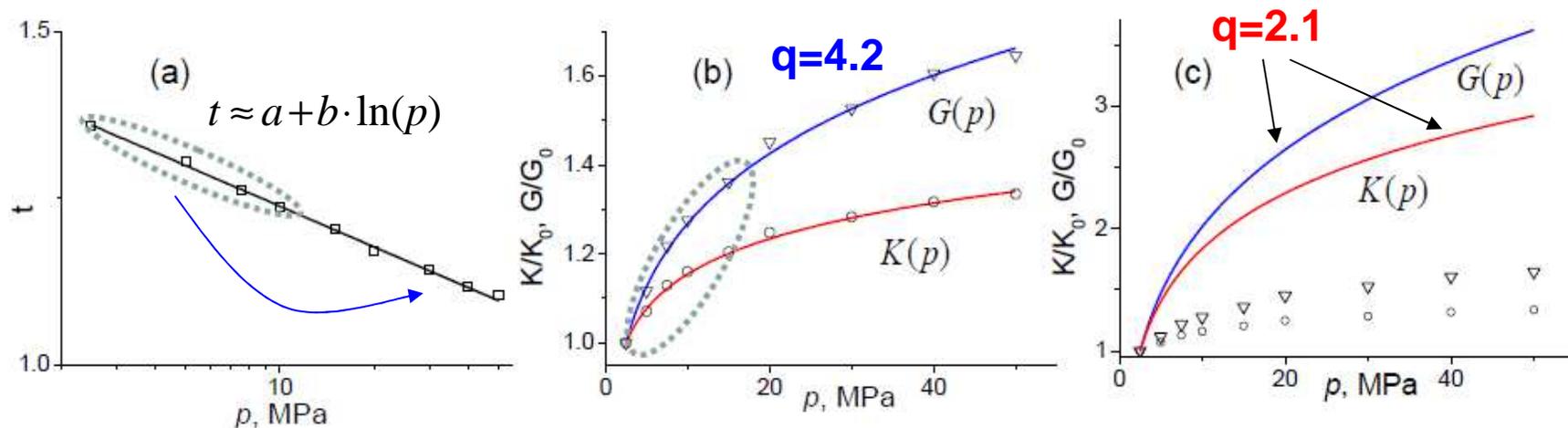


Песчаник Navajo (Coyner KB. Ph.D. thesis. MIT, 1984)

Сначала добиваемся согласования с экспериментом на (K,G) плоскости для экспериментальных $t_{нач.} \Rightarrow t_{кон.}$

Находим согласование при $q=4.2$
(вместо $q=2.1$ в традиционных моделях)

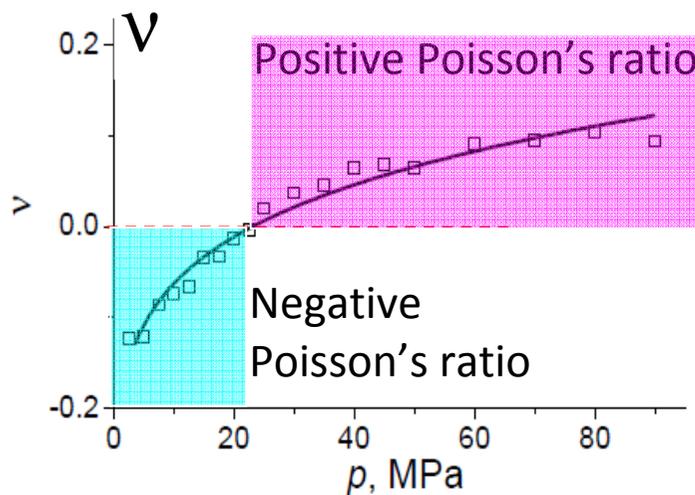
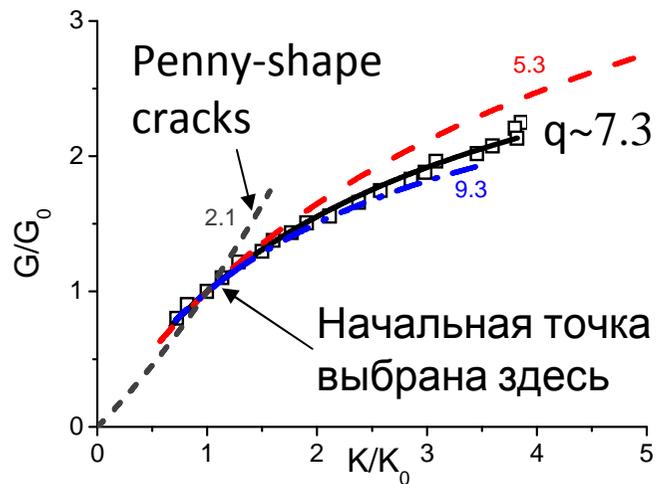
Только потом находим зависимость от давления для управляющего параметра $t(p)$, для этого часто достаточно довольно узкого интервала давлений!
Теперь можно прогнозировать $K(p)$ и $G(p)$ даже в еще неизвестной области:



См.: Zaitsev V., Radostin A., Pasternak E., Dyskin A. // Int. J. Rock Mech. Min. Sci. **97**, 122 (2017).

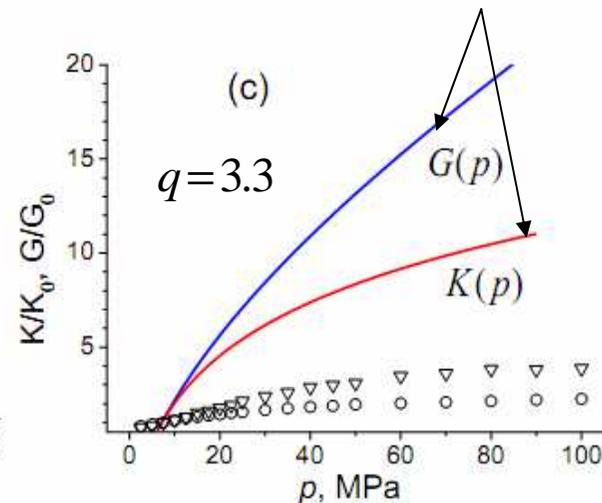
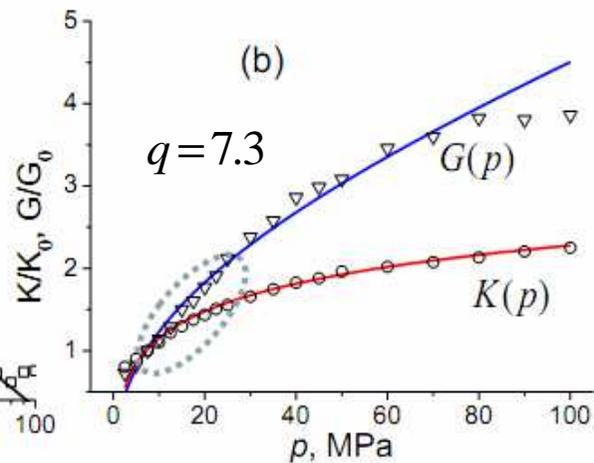
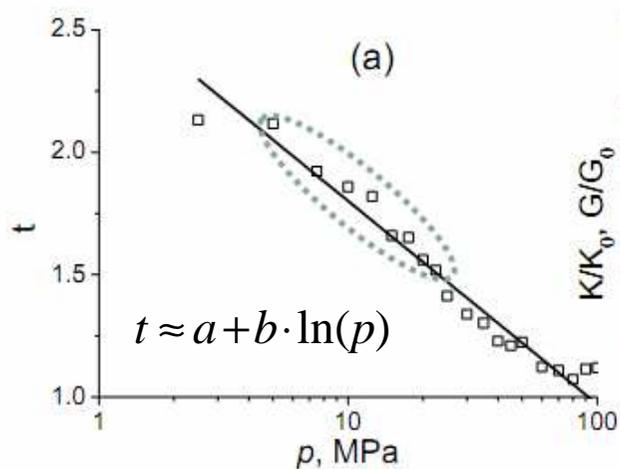
Пример изотропного образца породы с отрицательным коэффициентом Пуассона

Песчаник Weber (Coyner KB. Ph.D. thesis. MIT, 1984)



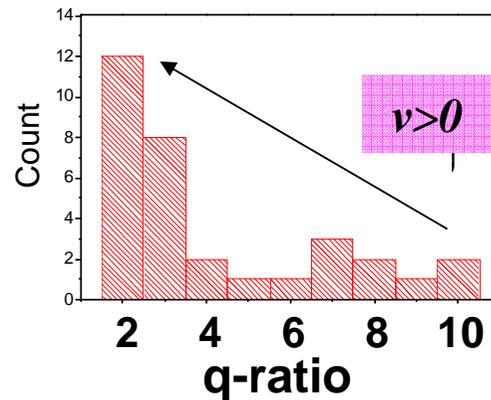
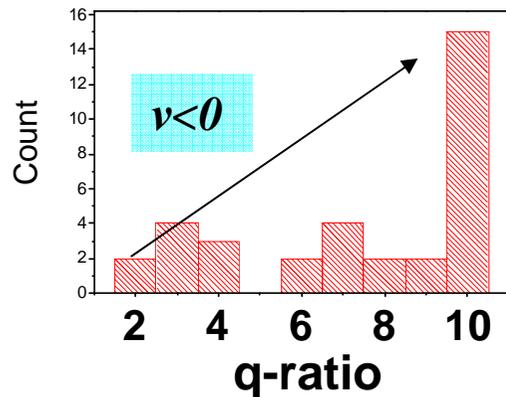
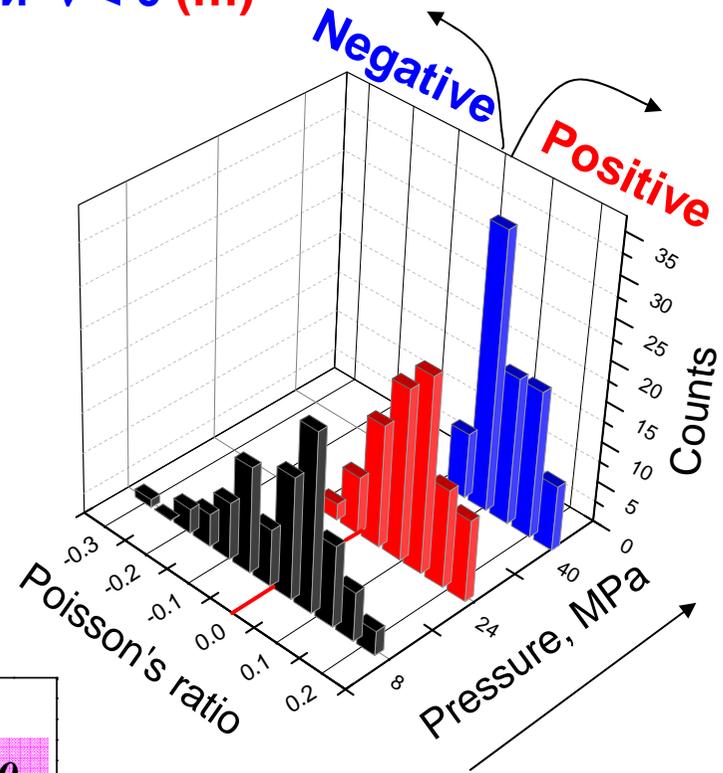
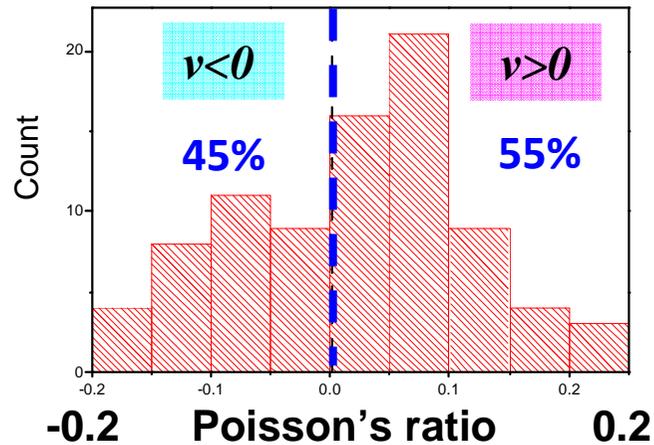
Ниже 20 МПа
 $\nu < 0$

разительное отличие при неверном q



См.: Zaitsev V., Radostin A., Pasternak E., Dyskin A. // Int. J. Rock Mech. Min. Sci. **97**, 122 (2017).

Распространенность горных пород с отрицательным коэффициентом Пуассона: анализ > 90 образцов с доступными данными, из которых ~45% показали $\nu < 0$ (!!!)



В традиционной модели “penny-shape” трещин $q \sim 2$

Zaitsev V., Radostin A., Pasternak E., Dyskin A., Nonlin. Process. Geophys. **24**, 543. (2017)

Zaitsev V., Sas P., Phys. Mesomech. **7**, 37. (2004)

Подробнее обсуждения рассмотренного подхода, следствий из него и интерпретации экспериментальных примеров на его основе можно найти в следующих публикациях:

1. Zaitsev V, Sas P., Elastic Moduli and Dissipative Properties of Microinhomogeneous Solids with Isotropically Oriented Defects. *Acta Acustica United with Acustica*; 86: 216–28 (2000).
2. Zaitsev V, Sas P. Effect of high-compliant porosity on variations of P- and S-wave velocities in dry and saturated rocks: comparison between theory and experiment. *Physical Mesomechanics* 2004; 7: 37–46 (2004)
3. V. Y. Zaitsev, A. V. Radostin, E. Pasternak, and A. Dyskin, “Extracting shear and normal compliances of crack-like defects from pressure dependences of elastic-wave velocities,” *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, vol. 97, pp. 122–133 (2017).
4. V. Y. Zaitsev, A. V. Radostin, E. Pasternak, and A. Dyskin, “Extracting real-crack properties from nonlinear elastic behavior of rocks: abundance of cracks with dominating normal compliance and rocks with negative Poisson’s ratio,” *Nonlinear Processes in Geophysics*, vol. 24, pp. 543–551, (2017).

**Вторая часть доклада – совершенно другое
диагностическое использование данных о
деформационно-механических свойствах среды:**

**высокоразрешающая количественная
визуализация механических свойств
биотканей на основе Оптической
Когерентной Томографии**

**как альтернатива классическому
гистологическому исследованию
(биопсии)**

НЕДОСТАТКИ СТАНДАРТНОЙ БИОПСИИ

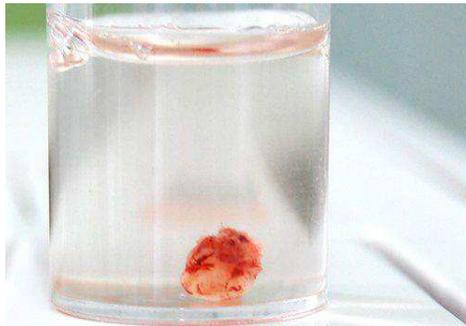
Извлечение



Детальное рассмотрение



Фиксация формалином
Дегидратация спиртами



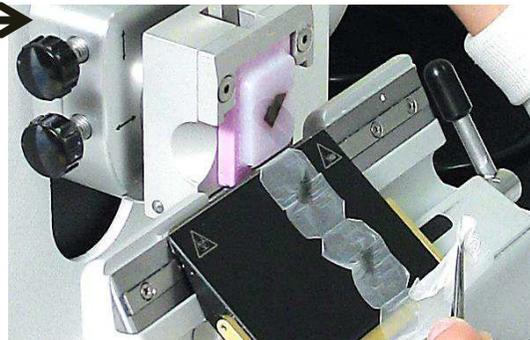
Создание парафиновых
блоков



Окрашивание



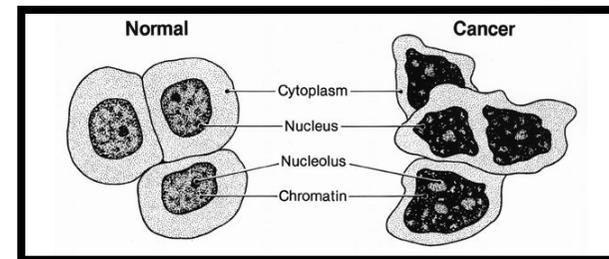
Резка на микротоме



1. Метод инвазивный
2. Трудозатратный
3. Времязатратный! (3-6 дней)
4. Неавтоматизирован!
5. Требуется профессиональных знаний и опыта гистопатолога

→ Возрастает интерес к методам
Оптической биопсии

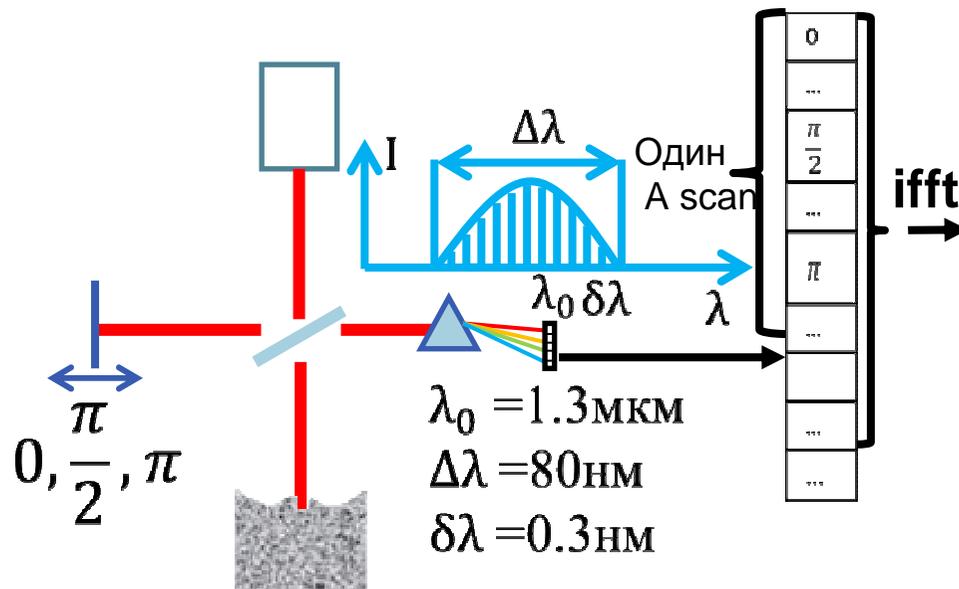
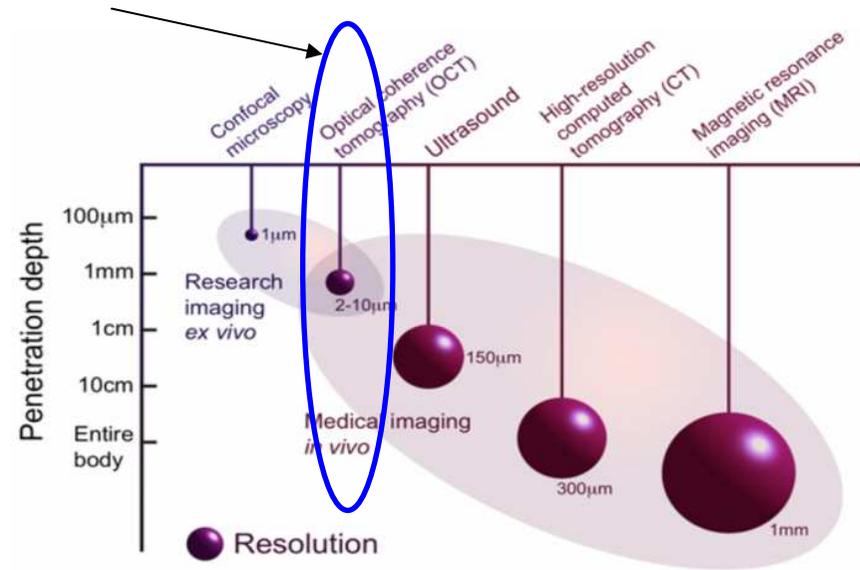
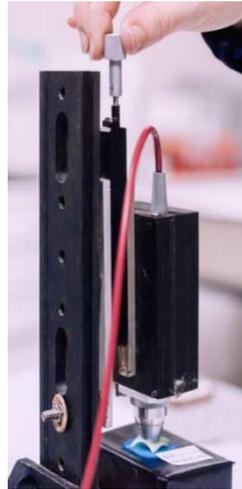
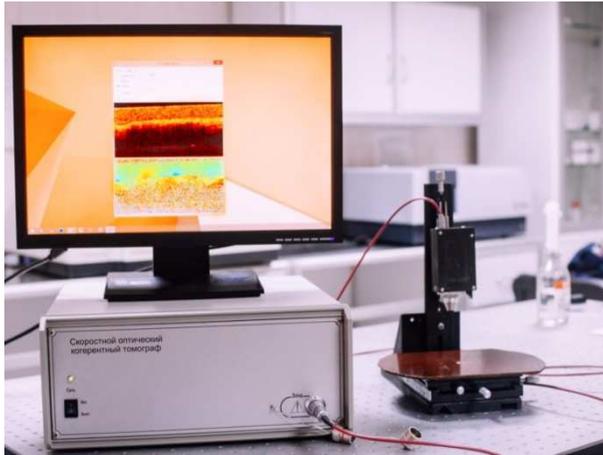
→ Оптическая биопсия не позволяет
разглядеть изменения конкретной



→ Плюсы Оптической биопсии

1. Выполнимость in vivo
2. Нетрудозатратный!
3. Быстрый (выполним интраоперационно)
4. Автоматизирован

ОПТИЧЕСКАЯ КОГЕРЕНТНАЯ ТОМОГРАФИЯ

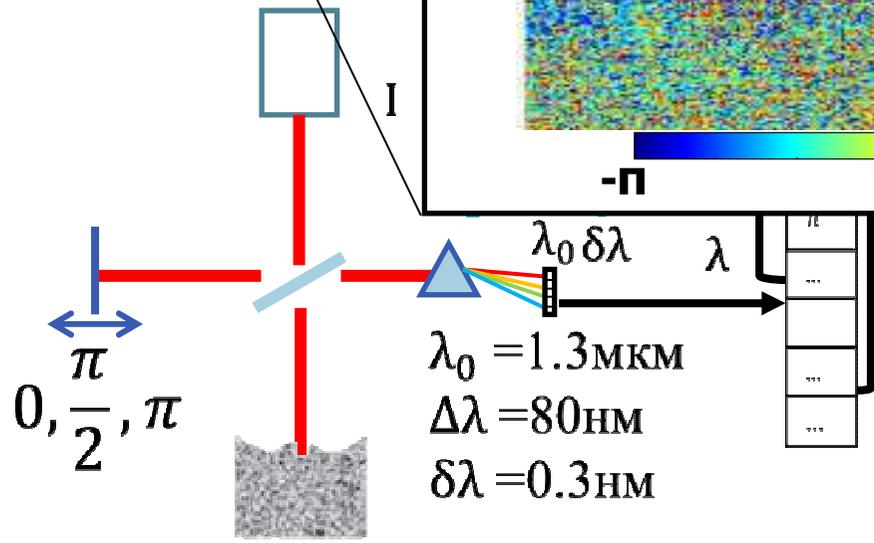
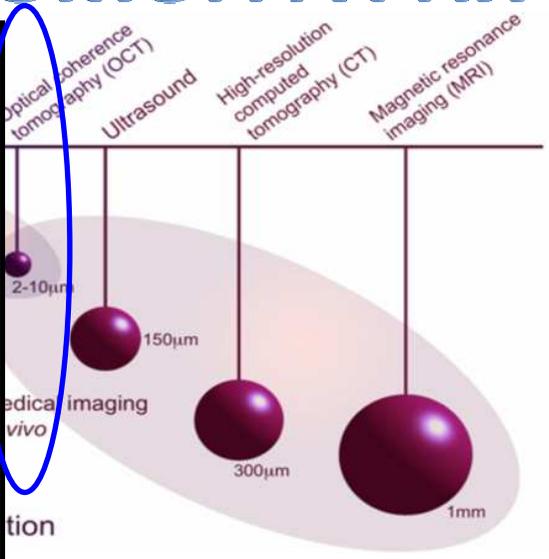
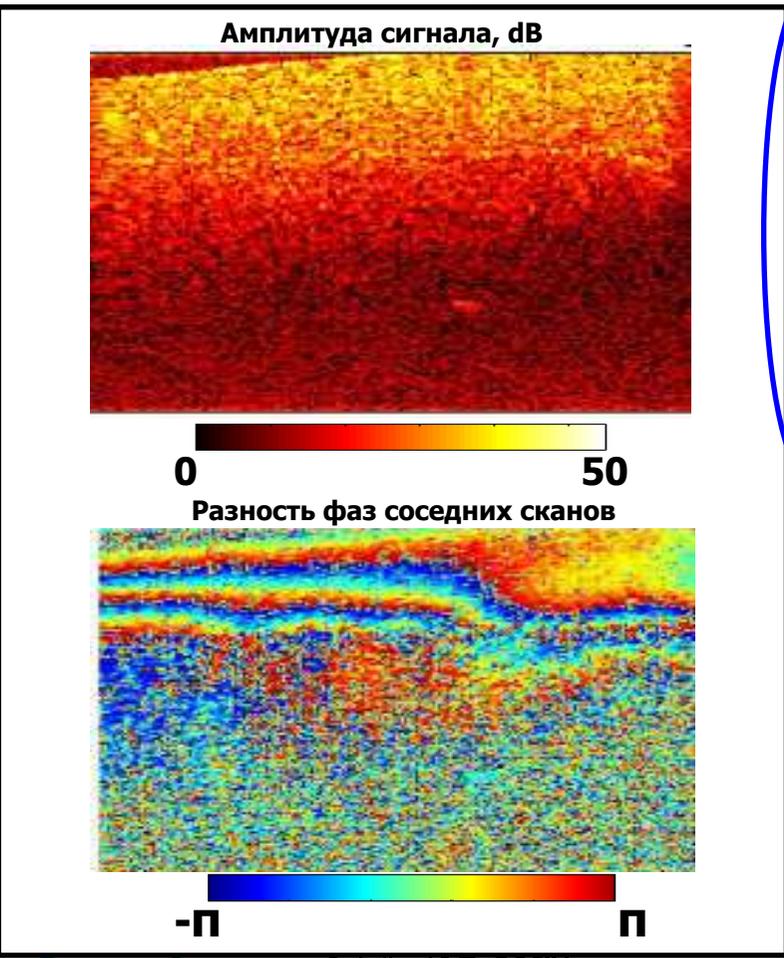
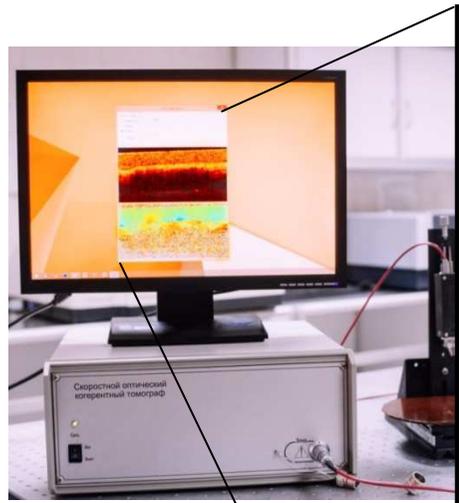


$$I = A_{ref}^2 + A_s^2 + 2A_{ref}A_s \cos(\varphi)$$

$$\delta z \sim \frac{\lambda_0^2}{n\Delta\lambda}$$

$$z_{max} \sim \frac{\lambda_0^2}{\delta\lambda}$$

ОПТИЧЕСКАЯ КОГЕРЕНТНАЯ ТОМОГРАФИЯ

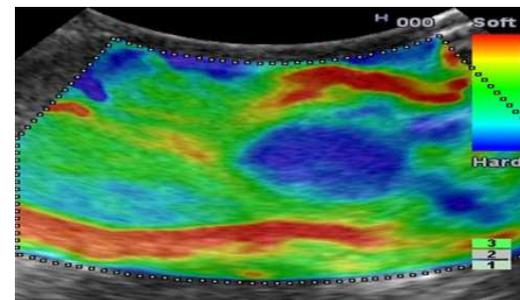


$$I = A_s^2 + 2A_{ref}A_s \cos(\varphi)$$

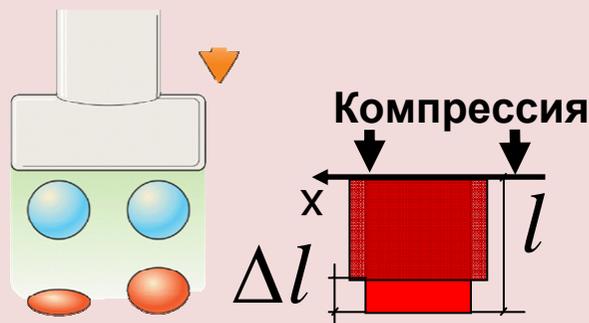
$$\sim \frac{\lambda_0^2}{n\Delta\lambda}$$

$$z_{max} \sim \frac{\lambda_0^2}{\delta\lambda}$$

ЗАЧЕМ НУЖНА ЭЛАСТОГРАФИЯ?



Компрессионная эластография



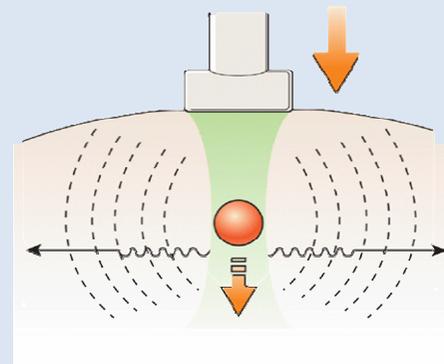
Биоткани
несжимаемы!

$$\nu_{\text{биот}} = \frac{\epsilon_{\text{попер}}}{\epsilon_{\text{продол}}} = 0.5$$

Модуль Юнга: $E = \frac{\sigma}{\epsilon} = 2(1+\nu)G = 3G$

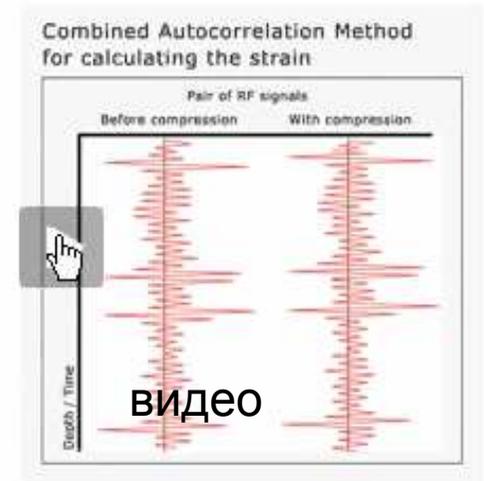
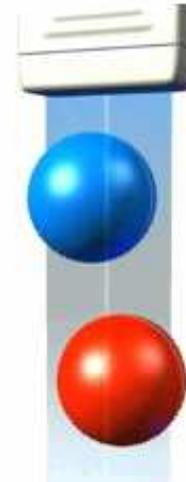
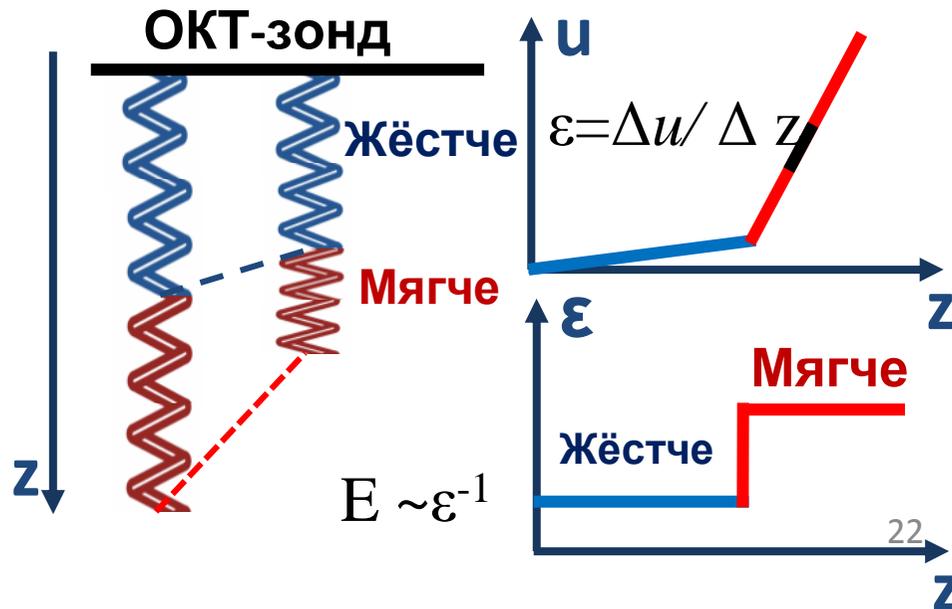
σ – упругое напряжение,
 ϵ – деформация ($\epsilon = \Delta l / l$)

Эластография сдвиговой волны.



Модуль сдвига: $G = \nu_{\text{попер}}^2 \rho$

ИДЕЯ КОМПРЕССИОННОЙ ЭЛАСТОГРАФИИ



J. Ophir et al., "Elastography: a quantitative method for imaging the elasticity of biological tissues," *Ultrason. Imaging*, (1991)

+

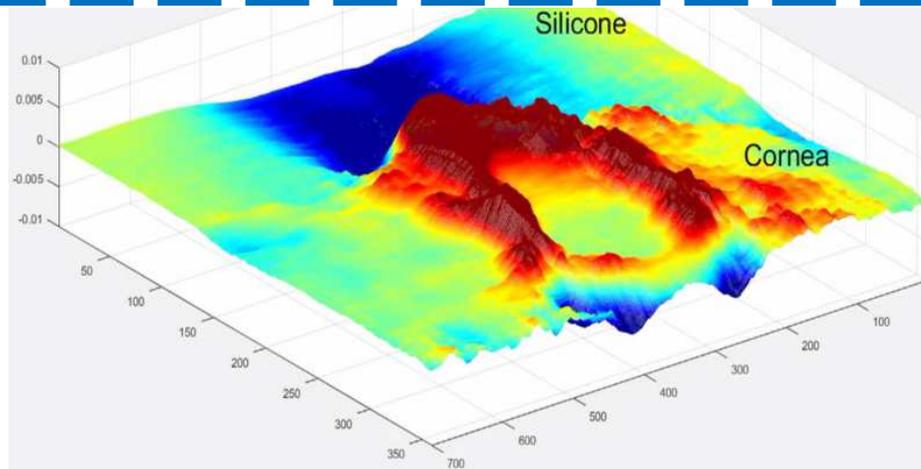
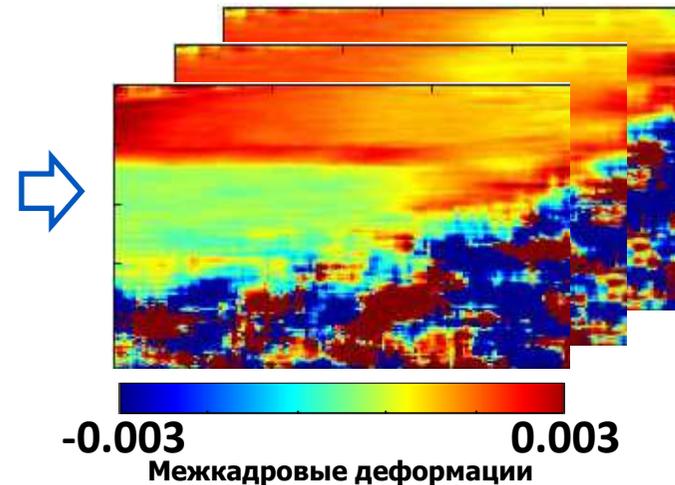
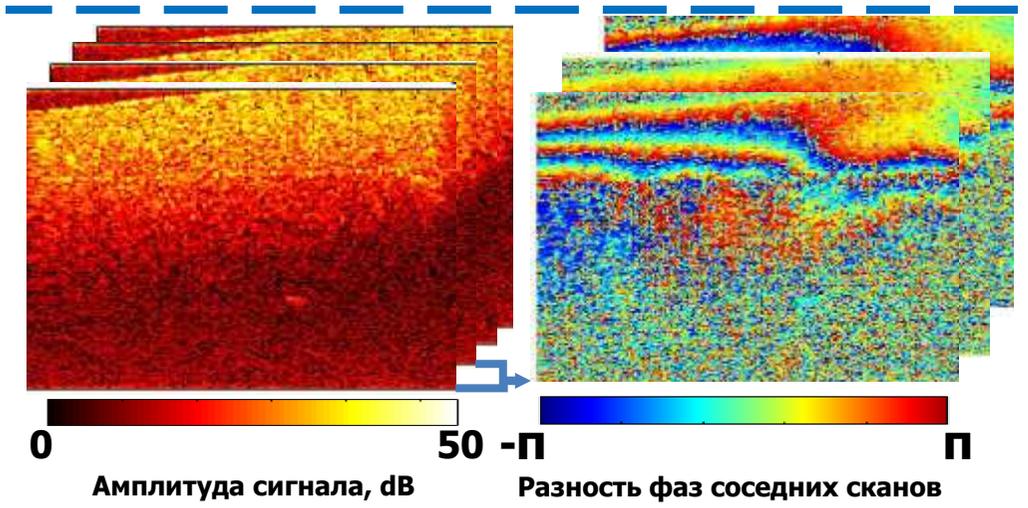
J. Schmitt, "OCT elastography: imaging microscopic deformation and strain of tissue," *Opt. Express*, (1998)

+

B. F. Kennedy, S. H. Koh, R. A. McLaughlin, K. M. Kennedy, P. R. T. Munro, and D. D. Sampson, "Strain estimation in phase-sensitive optical coherence elastography," *Biomed. Opt. Express*, (2012)

Картирование аксиальных деформаций при одноосном напряжении дает модуль Юнга $E=3G$

ФАЗОВЫЙ МЕТОД КАРТИРОВАНИЯ АКСИАЛЬНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ



$$u = \frac{\lambda_0 \cdot \Delta\varphi}{4\pi n}$$

=>

$$\frac{du}{dz} = \frac{\lambda_0}{4\pi n} \frac{d}{dz} \Delta\varphi$$



$$E_{tis} = \frac{\varepsilon_{sil}}{\varepsilon_{tis}} E_{sil}$$

$$\sigma = E_{tis} \varepsilon_{tis} = E_{sil} \varepsilon_{sil}$$

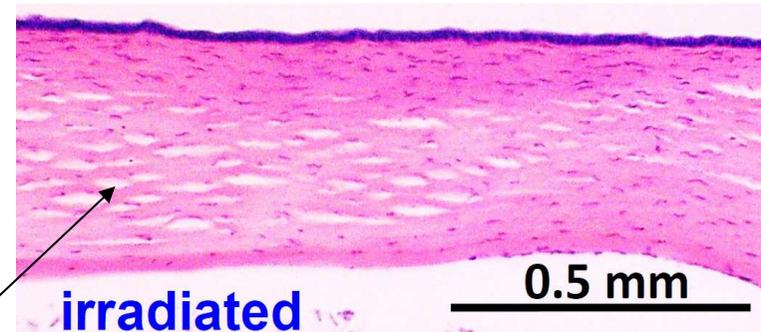
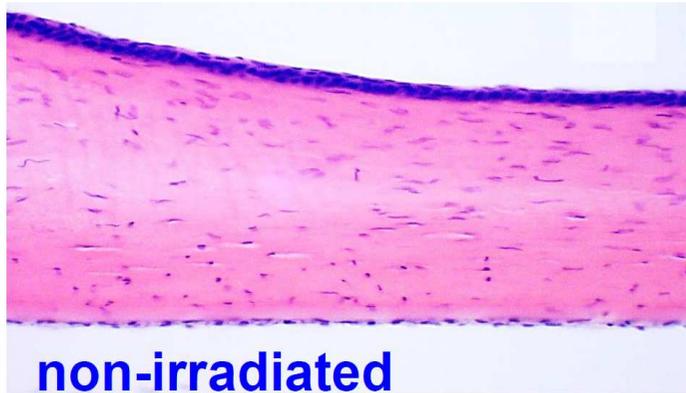
A. L. Matveyev, L. A. Matveev, A. A. Sovetsky, G. V. Gelikonov, A. A. Moiseev, and V. Y. Zaitsev, "Vector method for strain estimation in phase-sensitive optical coherence elastography," *Laser Phys. Lett.*, vol. 15, pp. 065603(1–6), 2018.

A. A. Sovetsky, A. L. Matveyev, L. A. Matveev, D. V. Shabanov, and V. Y. Zaitsev, "Manually-operated compressional optical coherence elastography with effective aperiodic averaging: demonstrations for corneal and cartilaginous tissues," *Laser Phys. Lett.*, vol. 15, pp. 085602(1–8), 2018.

Application of quantitative strain and stiffness mapping for **non-invasive** characterization of the irradiation-induced micro-porosity in collagenous tissues

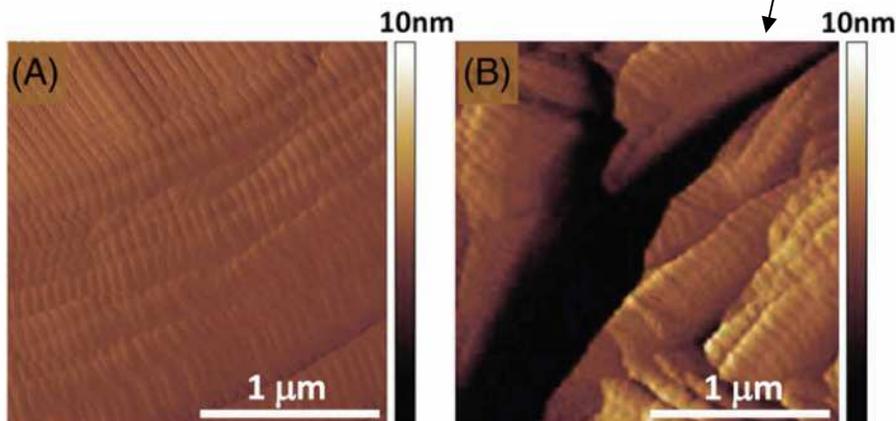
Zaitsev et al. JBio 12(3) (2019)

Histological images of non-irradiated and IR-laser-irradiated rabbit's cornea 3 months post irradiation

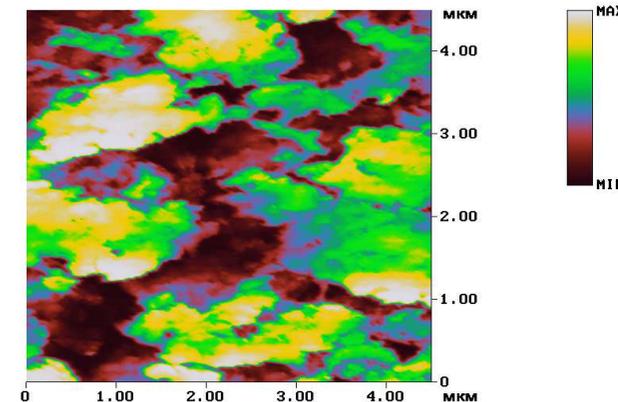


Crack-like narrow pores with aspect ratios width/length ~ 10..30 revealed by optical microscopy and AFM

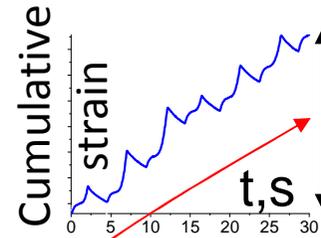
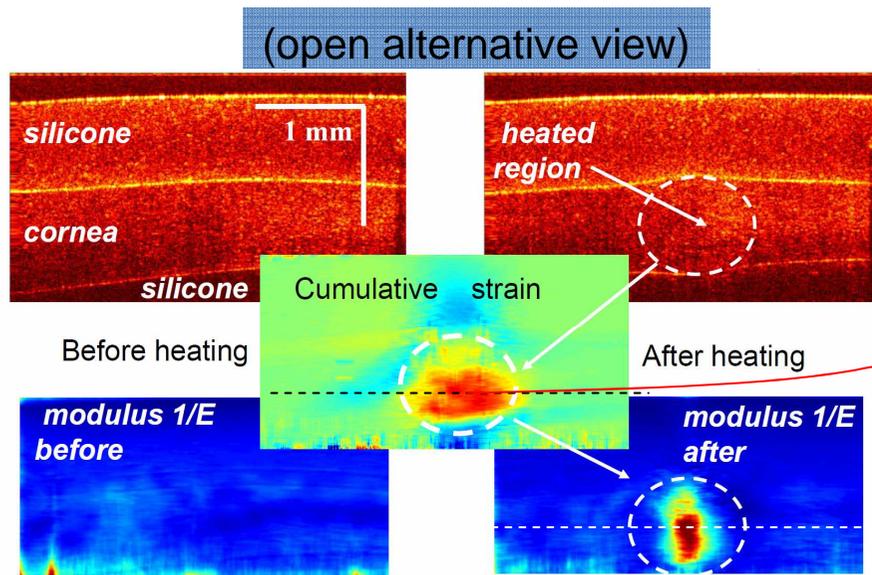
Non-irradiated and irradiated rabbit's sclera



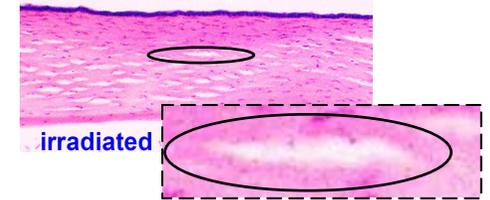
bovine cartilage



Non-invasive aspect-ratio estimation by OCE-based measuring of laser-produced tissue dilatation and Young-modulus reduction



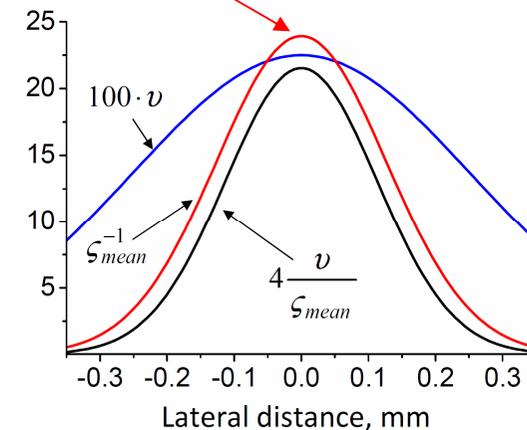
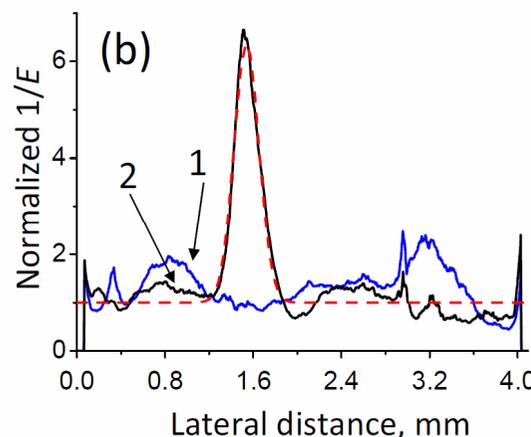
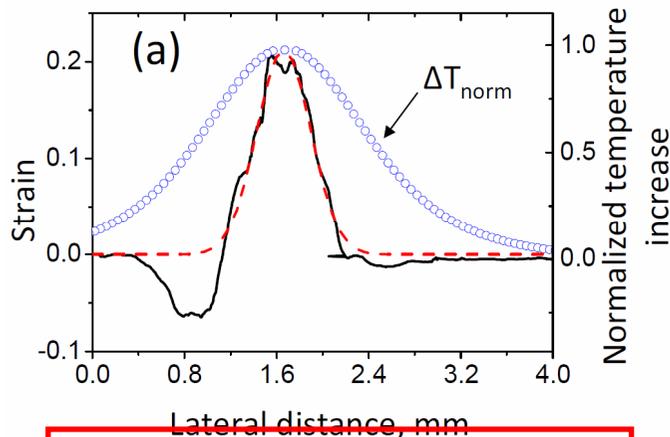
Compliance $\zeta \ll 1$ of crack-like pores is determined by their aspect ratio



$$\zeta \sim \frac{\text{opening}}{\text{length}}$$

Inferred average inverse aspect ratio $1/\zeta$

Well agrees with direct microscopy imaging!



$$\frac{V_0 + V_{pore}}{V_0} = 1 + \frac{V_{pore}}{V_0} = 1 + \nu = 1 + S$$

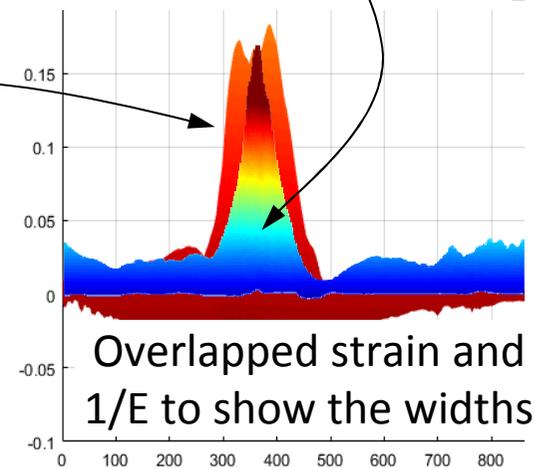
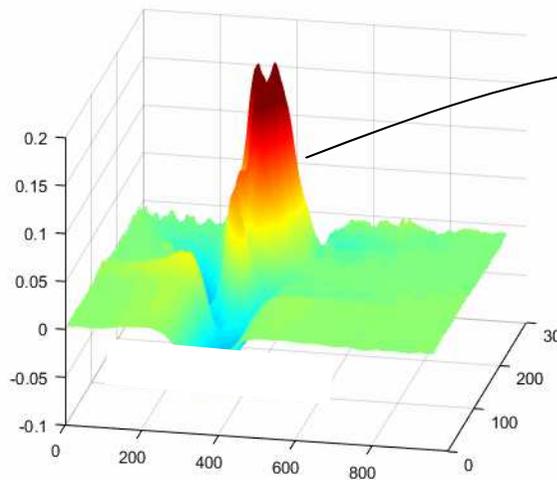
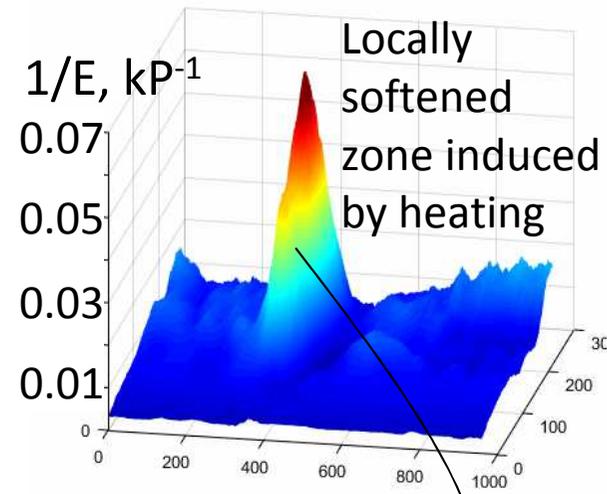
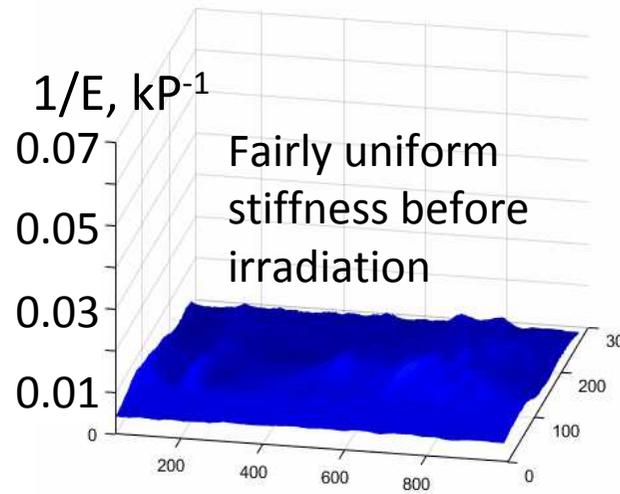
$$E_0/E = 1 + \nu/\zeta_{mean} \Rightarrow$$

$$1/\zeta_{mean} \approx (E_0/E - 1)/\nu$$

V. Y. Zaitsev, A. L. Matveyev, L. A. Matveev, et al., "Revealing structural modifications in thermomechanical reshaping of collagenous tissues using optical coherence elastography," *J. Biophotonics*, vol. 12, no. 3, e201800250, 2019.

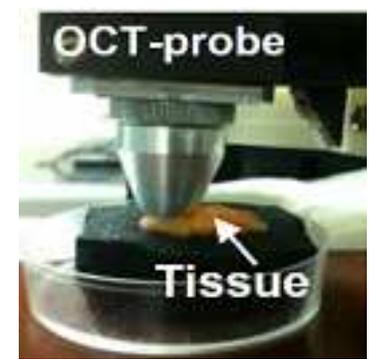
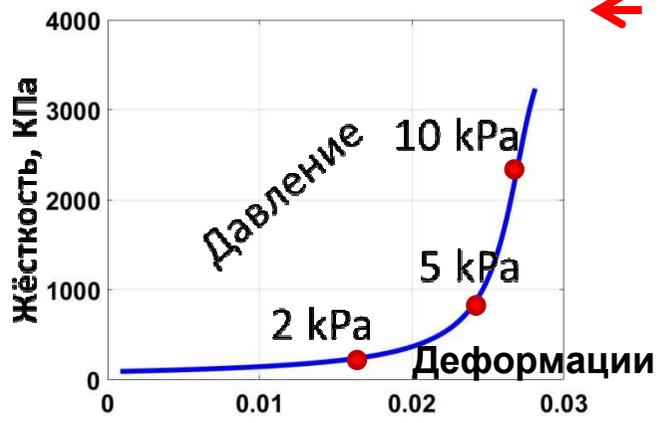
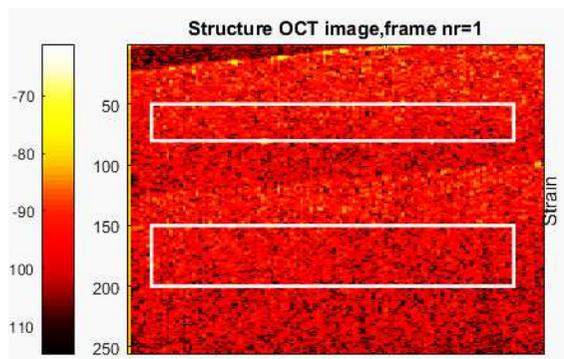
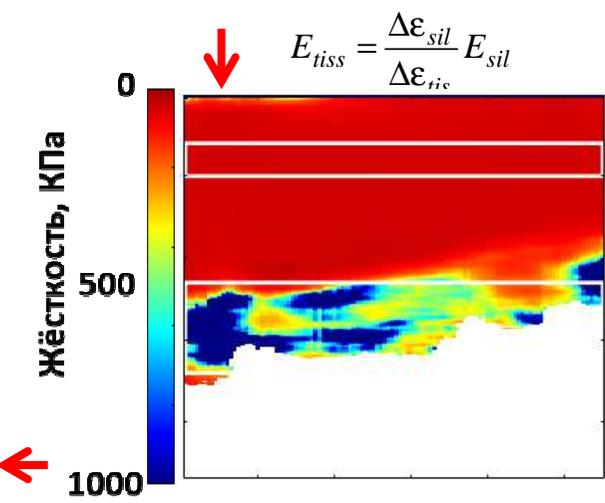
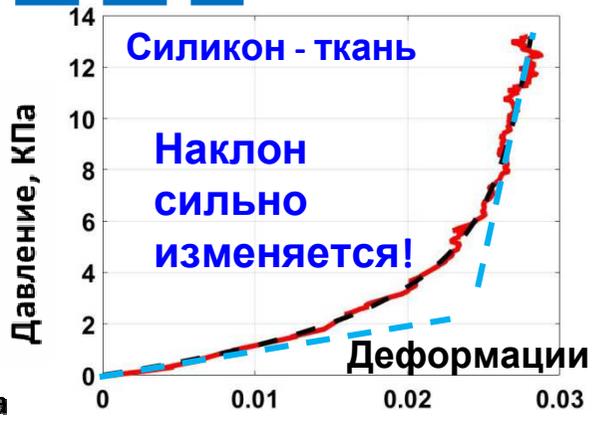
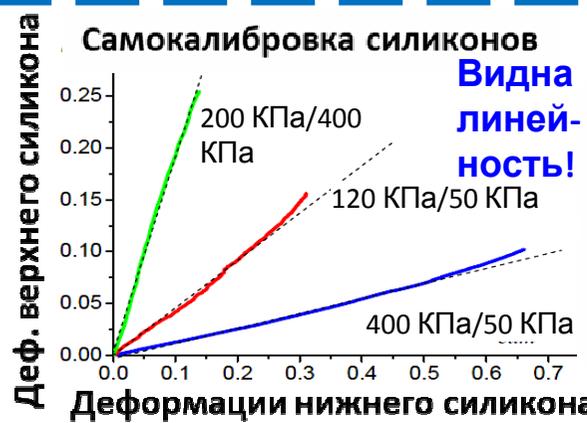
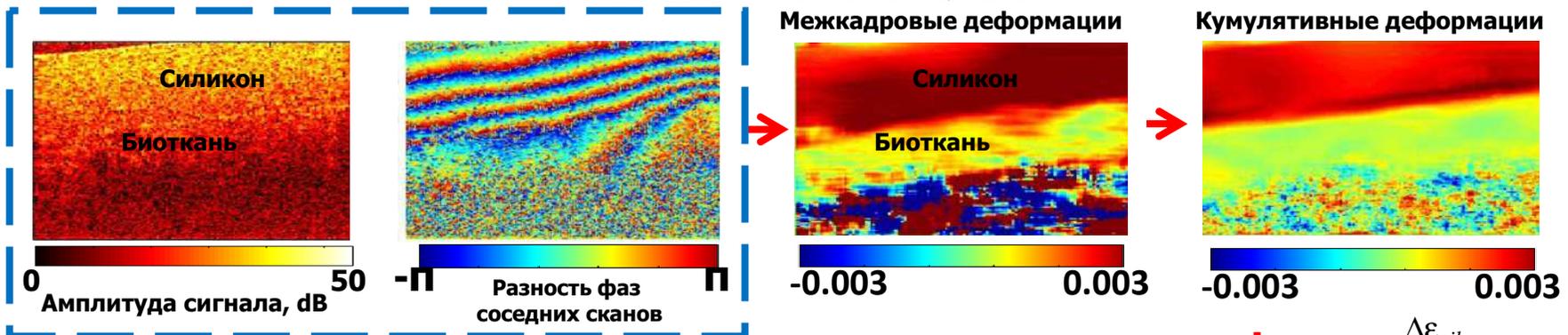
Альтернативный вид тех же данных

Pseudo-3D representation of the strain and $1/E$ distribution over the entire B-scan

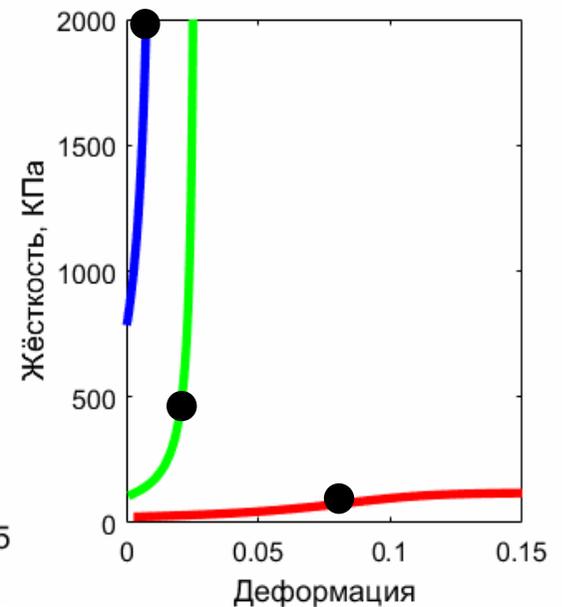
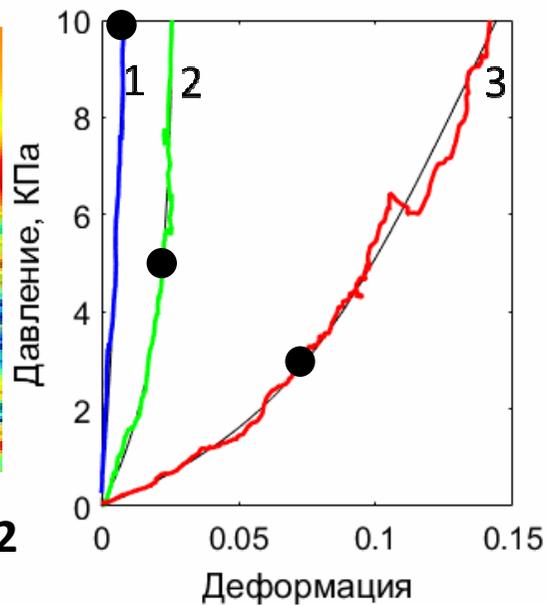
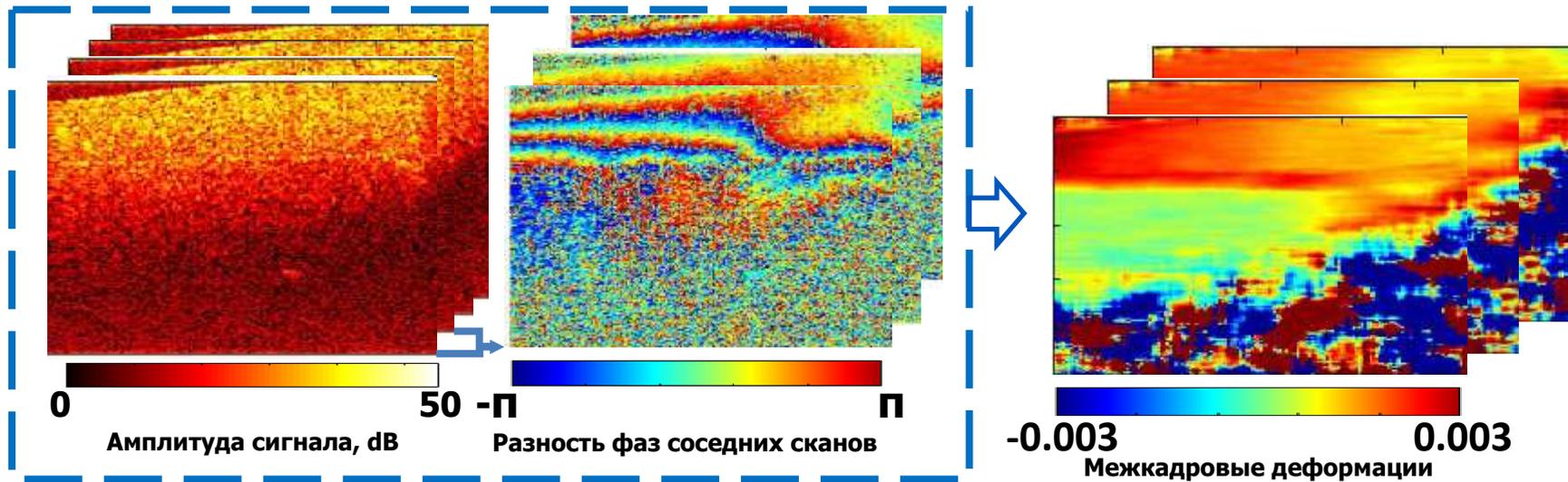


Notice that the width of strain distribution is greater than the width of the softened zone

ПРИНЦИПИАЛЬНАЯ ОСОБЕННОСТЬ БИОТКАНЕЙ – НЕЛИНЕЙНОСТЬ



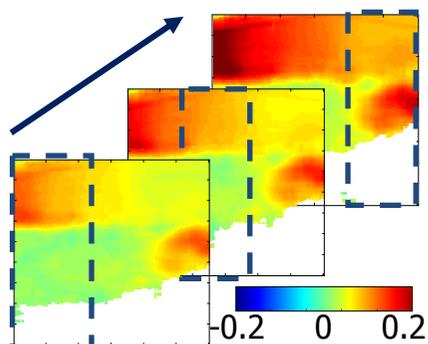
НЕОДНОРОДНОСТЬ ДАВЛЕНИЯ ТАКЖЕ ПРИНЦИПИАЛЬНА



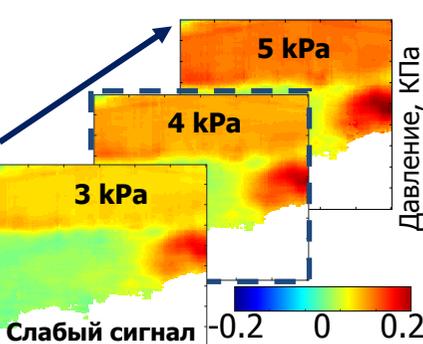
Контроль среднего давления по кадру совершенно недостаточен !

СТАНДАРТИЗАЦИЯ ДАВЛЕНИЯ

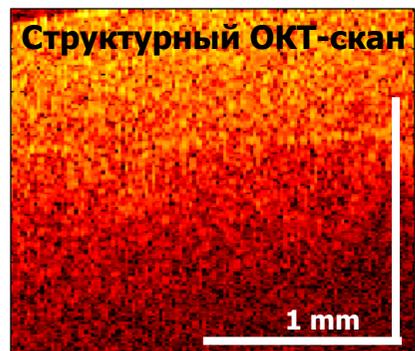
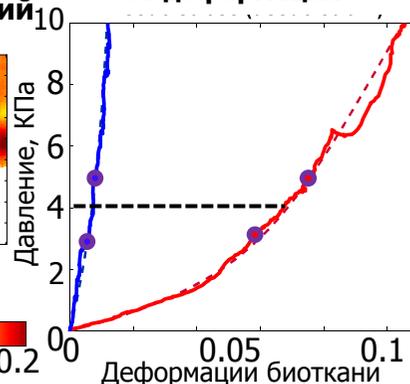
Непосредственно снятая
кумулятивно накопленная
запись деформация



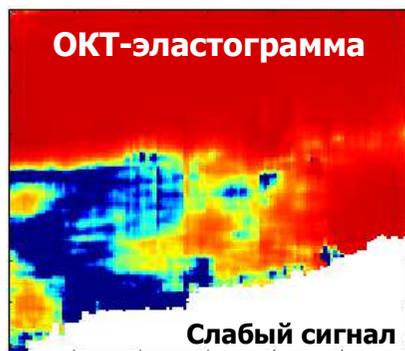
Пересобранная
стандартизованная на
давление запись деформаций



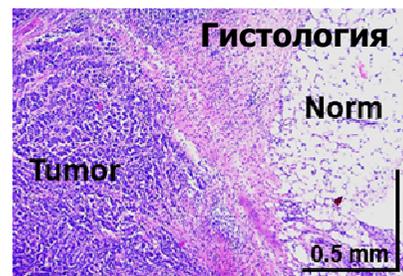
Зависимость давления
от деформации



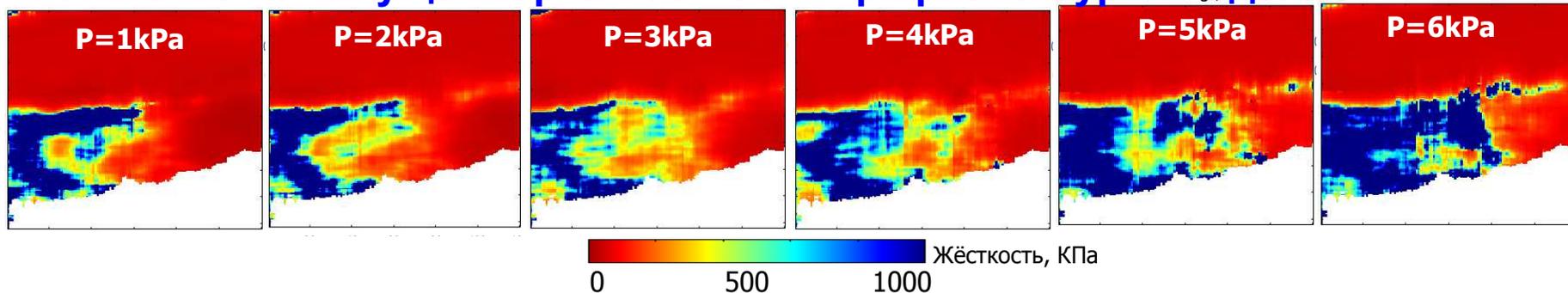
0 Амплитуда сигнала, dB 50



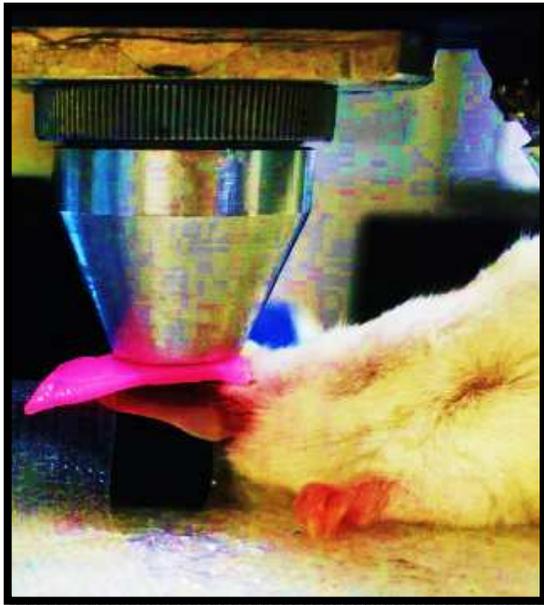
0 Жёсткость, КПа 500 1000



Так меняется текущая карта жесткости при разном уровне давления:

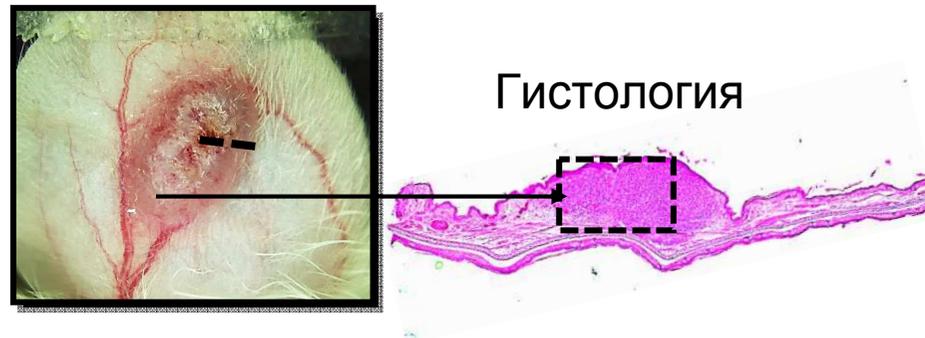


ЛАБОРАТОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МОДЕЛЬНЫХ ОПУХОЛЕЙ НА ЖИВОТНЫХ С ПРИМЕНЕНИЕМ ОКЭ IN VIVO



При контроле на основе традиционной гистологии:

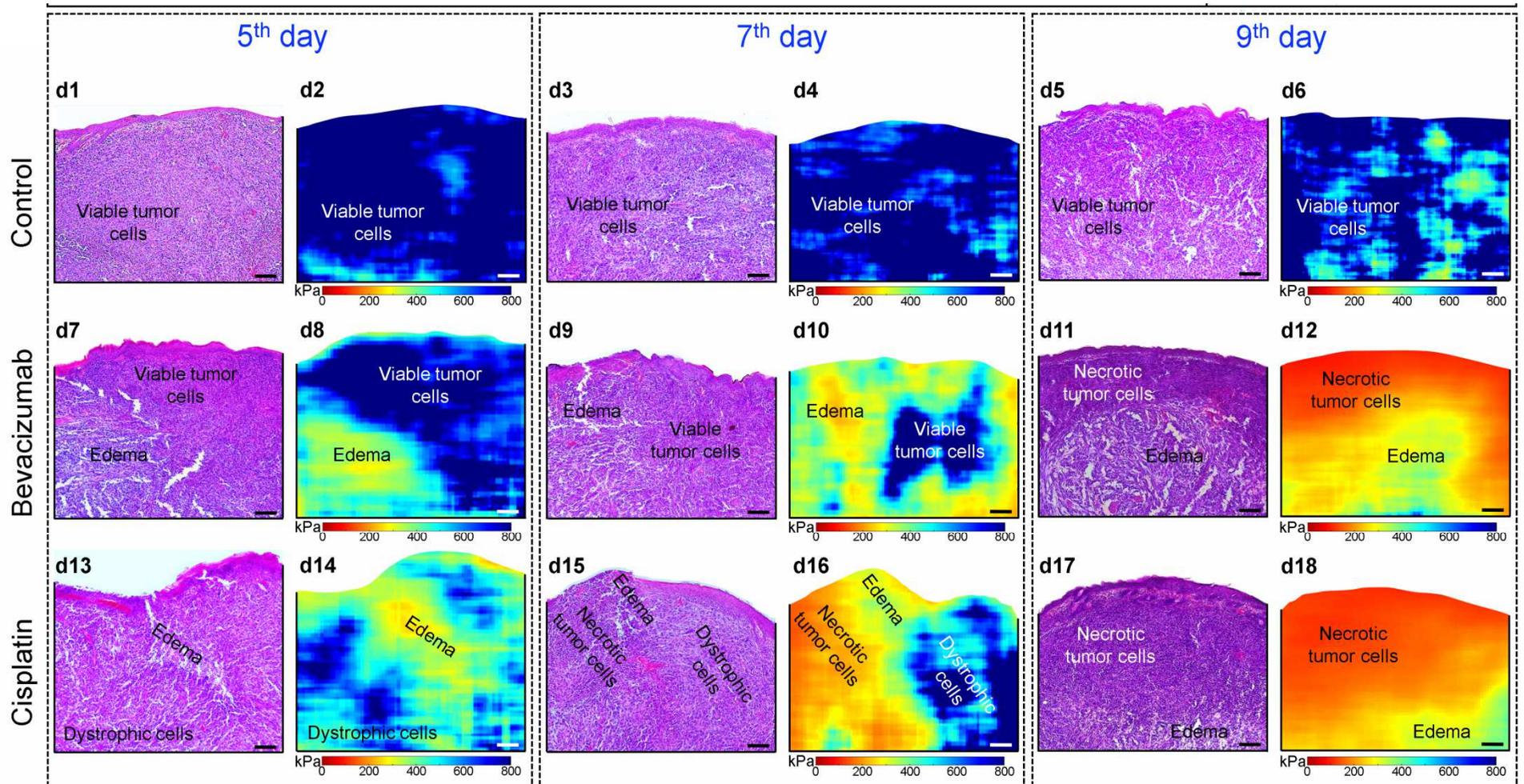
- Требуется большое количество мышей для статистики (~ 30 мышей)
- Индивидуальный отклик из-за различного иммунитета
- Разброс приживаемости опухолей в зависимости от качества прививания



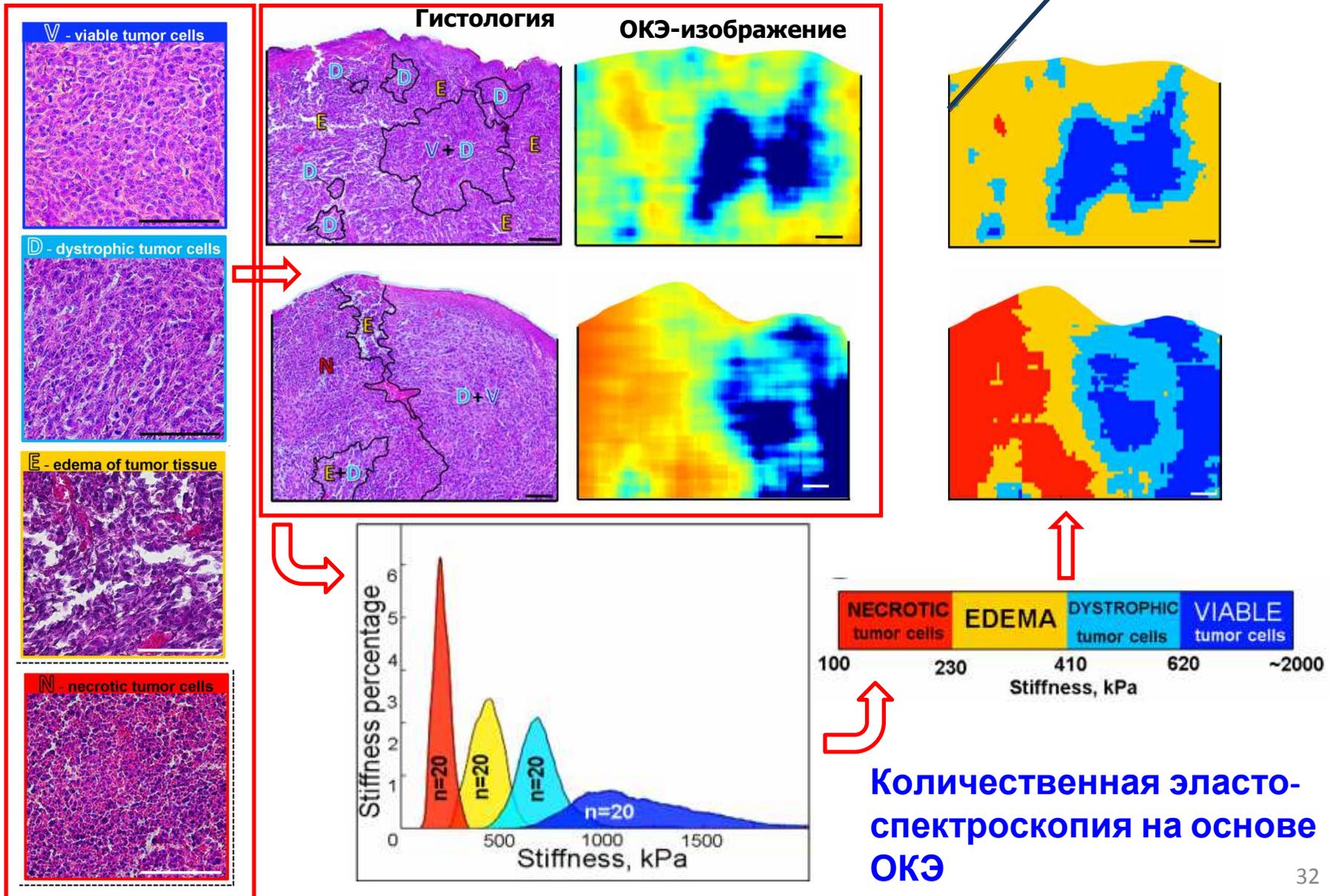
Можно ли получать аналогичную информацию *in vivo* ?

ИЗМЕНЕНИЕ МОРФОЛОГИЧЕСКОГО СОСТАВА ОПУХОЛИ В ХОДЕ ХИМИОТЕРАПИИ НА 5,7,9 ДНИ

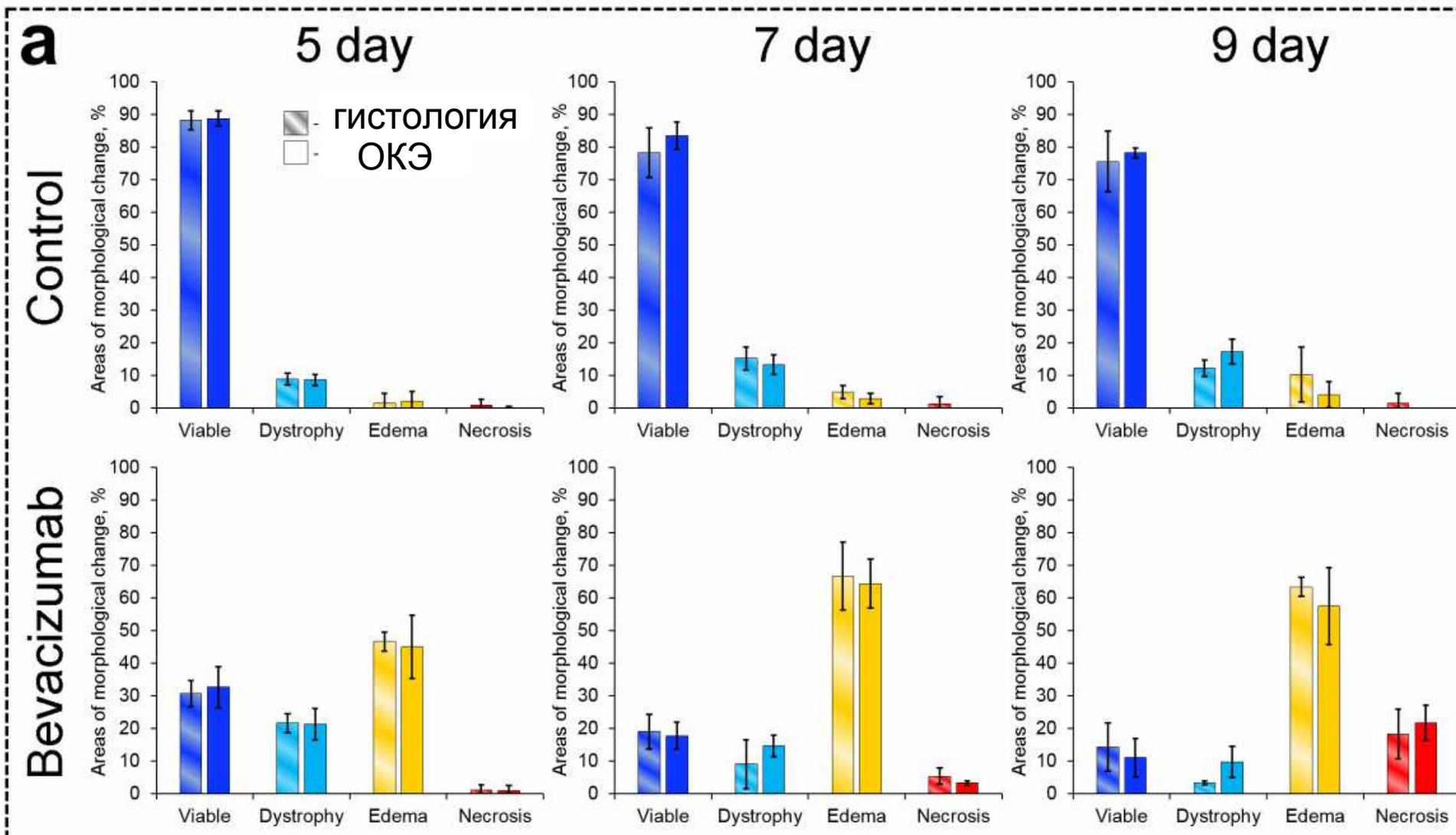
Сопоставление гистологии и ОКЭ:



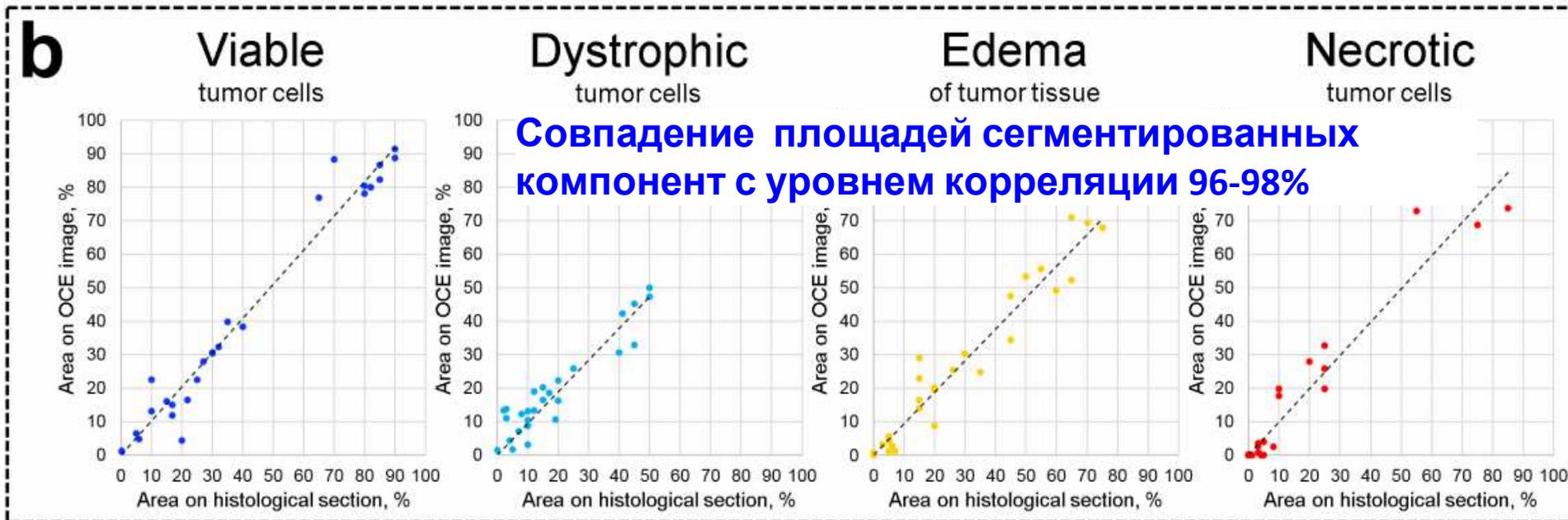
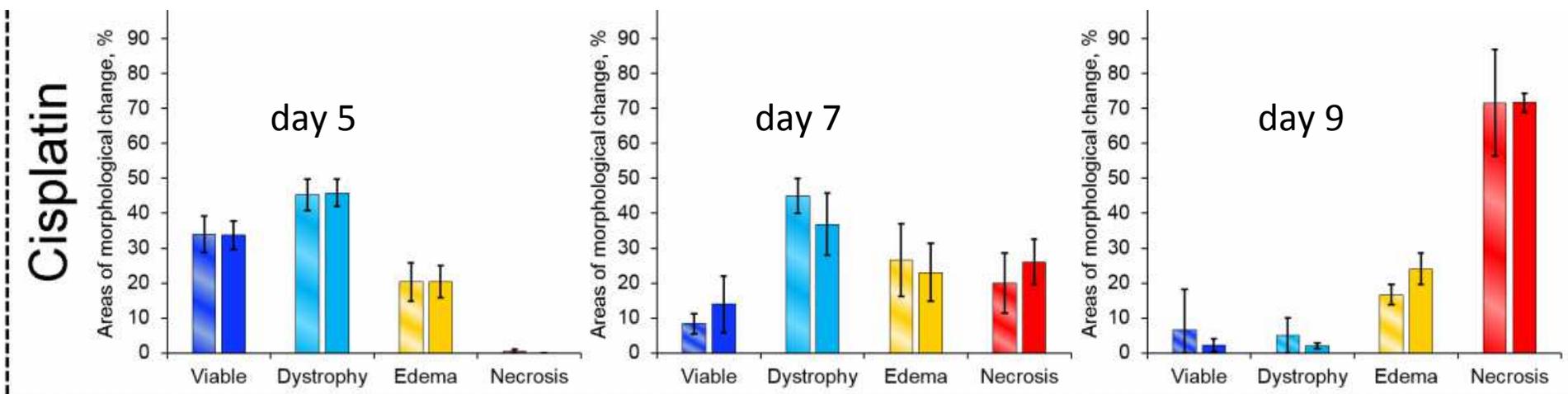
ДЕТАЛЬНОЕ СОПОСТАВЛЕНИЕ ЭЛАСТОГРАФИИ И ГИСТОЛОГИИ С ПОСЛЕДУЮЩЕЙ СЕГМЕНТАЦИЕЙ



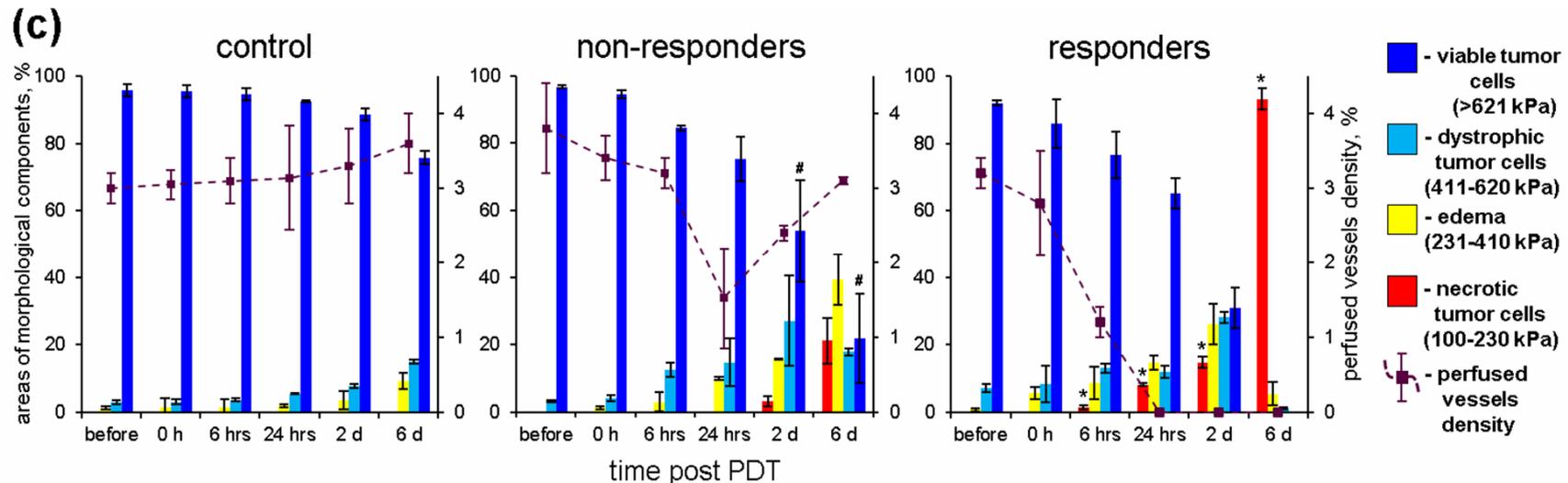
СООТНЕСЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ СЕГМЕНТИРОВАНИЯ С ПОМОЩЬЮ ГИСТОЛОГИИ И МЕТОДОМ ЭЛАСТО-СПЕКТРОМЕТРИИ



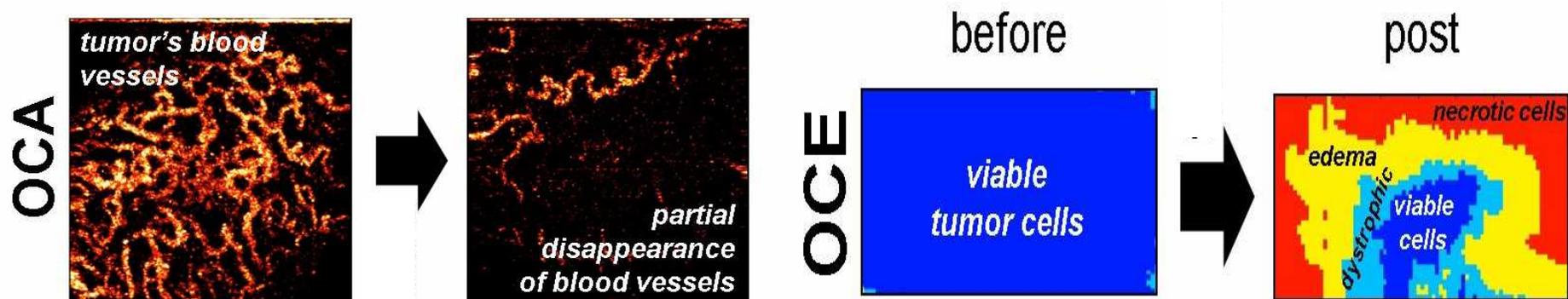
СООТНЕСЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ СЕГМЕНТИРОВАНИЯ С ПОМОЩЬЮ ГИСТОЛОГИИ И МЕТОДОМ ЭЛАСТО-СПЕКТРОМЕТРИИ



ФОТОДИНАМИЧЕСКАЯ ТЕРАПИЯ КОЛОРЕКТАЛЬНОГО РАКА СТ26

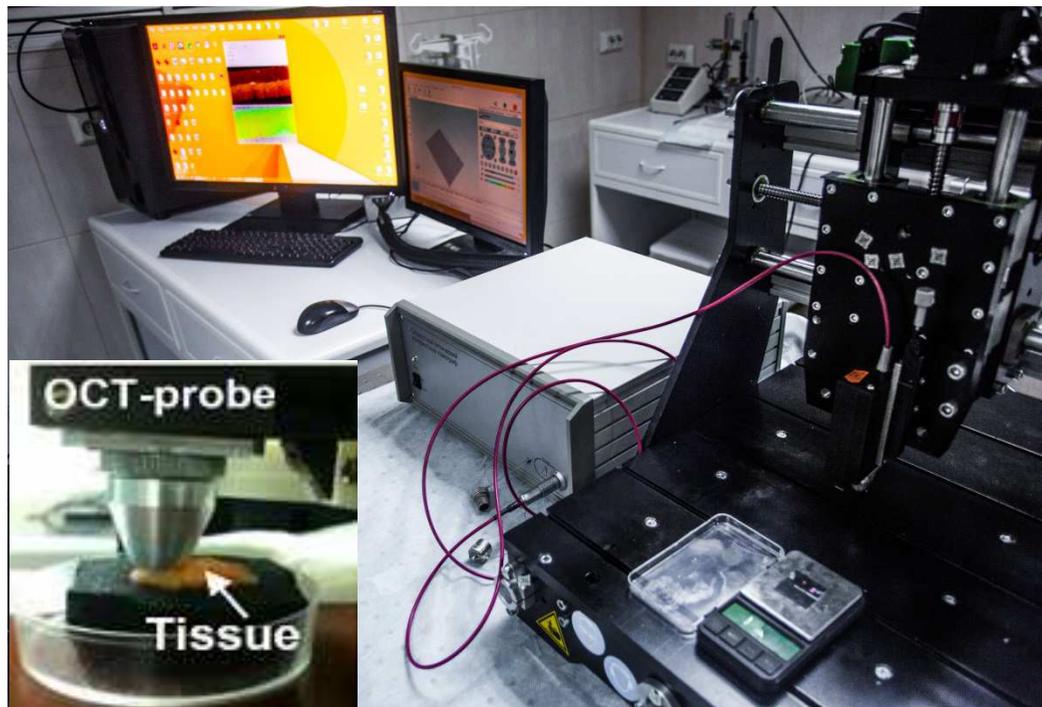


Совместное использование ОКТ-ангиографии и ОКТ-эластографии



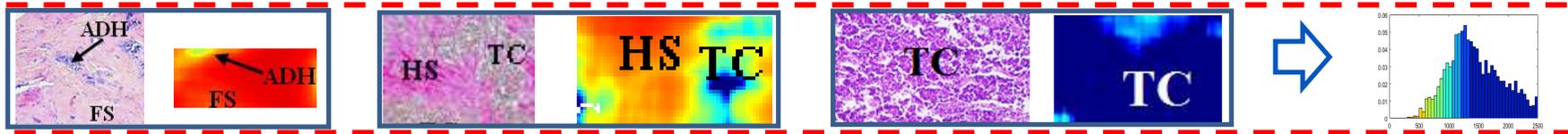
M. A. Sirotkina, E. K. V Gubarkova, et al., "In vivo assessment of functional and morphological alterations in tumors under treatment using OCT-angiography combined with OCT-elastography," *Biomed. Opt. Express*, vol. 11, no. 3, pp. 1365–1382, 2020.

ПРИМЕНЕНИЕ ОКЭ К СВЕЖЕИЗВЛЕЧЁННЫМ ОБРАЗЦАМ РАКА МОЛОЧНОЙ ЖЕЛЕЗЫ НА ВРЕМЕНАХ, ДОПУСКАЮЩИХ ИНТЕРОПЕРАЦИОННОЕ ПРИМЕНЕНИЕ

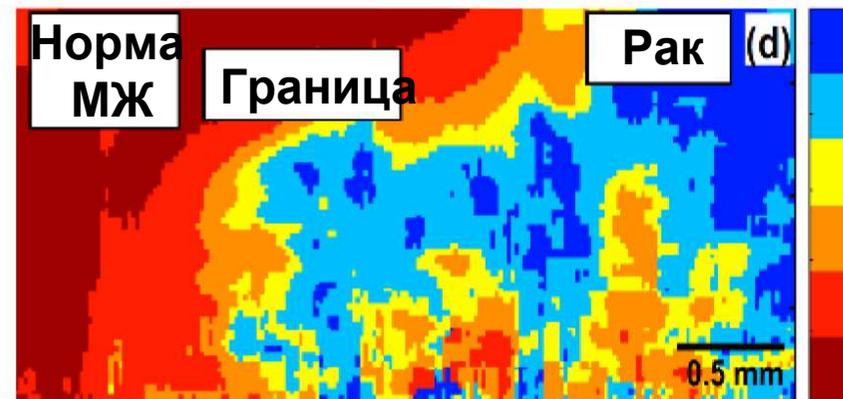
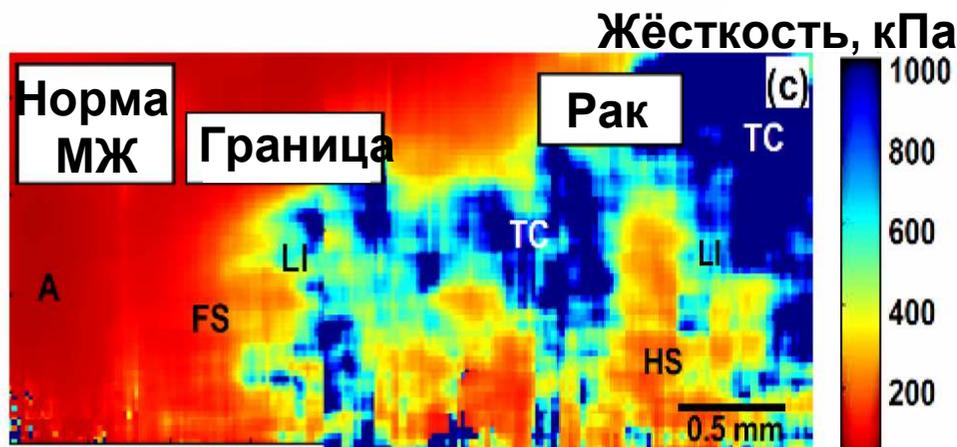
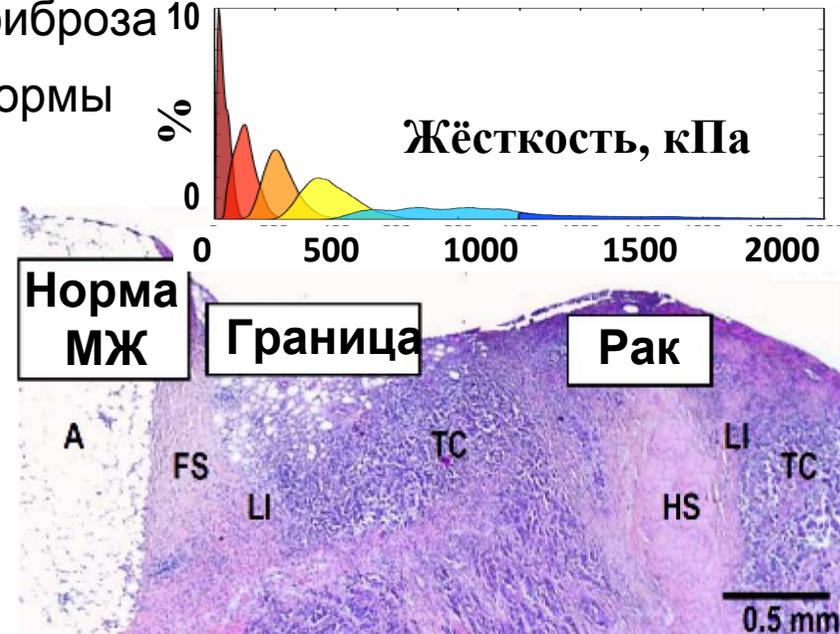
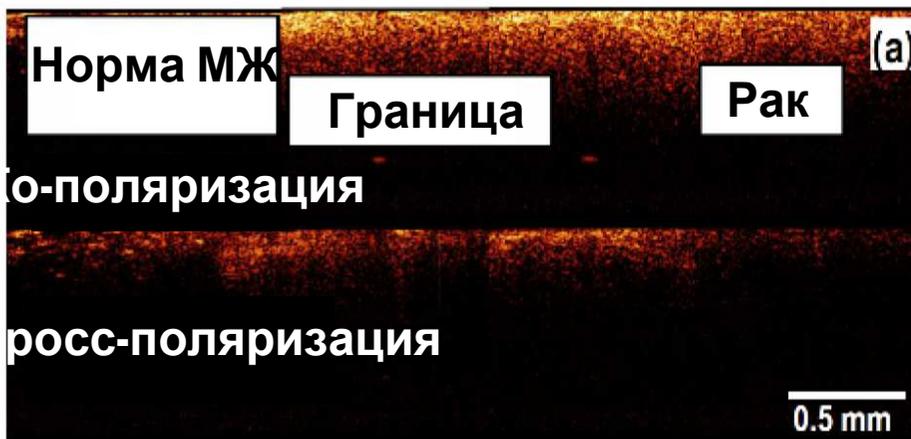


- Рак молочной железы имеет очень сложное строение и множество подтипов
- Рак молочной железы занимает первое место по смертности среди женщин в онкологии

ИССЛЕДОВАНИЕ ГРАНИЦЫ РАКА МОЛОЧНОЙ ЖЕЛЕЗЫ



- область воспаления
- область гиалиноза
- область фиброза
- область нормы
- область рака



Континуальная карта жесткости

и результат ее сегментирования

Заключение

□ Биоткани и горные породы, несмотря на бросающиеся в глаза различия, демонстрируют много общих черт с точки зрения их механических (упругих) характеристик, включая микроструктурно-обусловленный нелинейный характер связей «напряжение-деформация»

□ Переосмысление большого объема хорошо известных и надежных данных по нелинейному поведению горных пород привело к неожиданным выводам о свойствах трещиноподобных дефектов и трещиноватых сред и заключению о недостаточности, казалось бы, общепринятых и широко применяемых модельных представлений

□ Созданный в последние годы новый метод количественного и высокоразрешающего характеризования механических свойств биотканей привел к появлению своего рода «эласто-спектроскопии» на основе ОТК-эластографии как альтернативы обычной гистологической сегментации -

это открыло ранее недоступные диагностические возможности для широкого спектра биомедицинских применений, в том числе в онкологии и не только... (развиваются в тесном сотрудничестве с коллегами из ПИМУ)