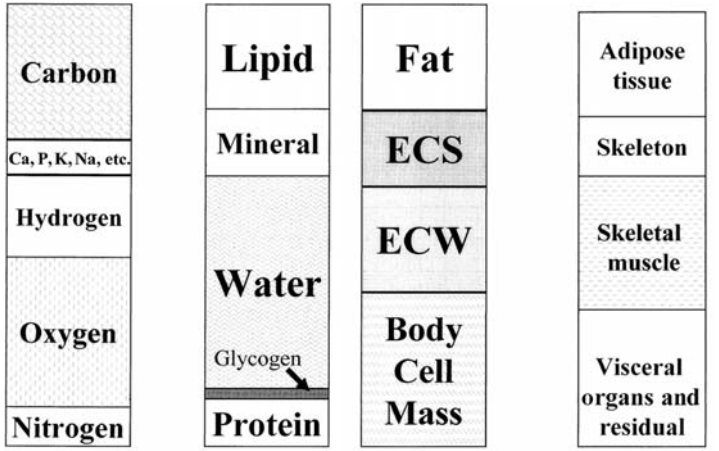
# Биоимпедансный анализ: основы метода и вычислительные технологии

Данилов А.А., Руднев С.Г., Василевский Ю.В. (ИВМ РАН),
Саламатова В.Ю. (НОЦ ИВМ РАН),
Николаев Д.В., Смирнов А.В. (НТЦ Медасс)

Москва, ИВМ РАН, 27-28 октября 2011г.

# Состав тела человека – модели




Уровни организации биологической системы и модели состава тела (Wang, Heymsfield et al., 1992)

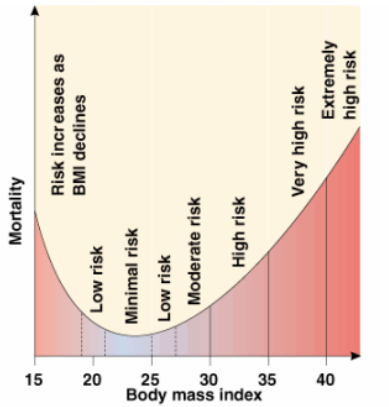
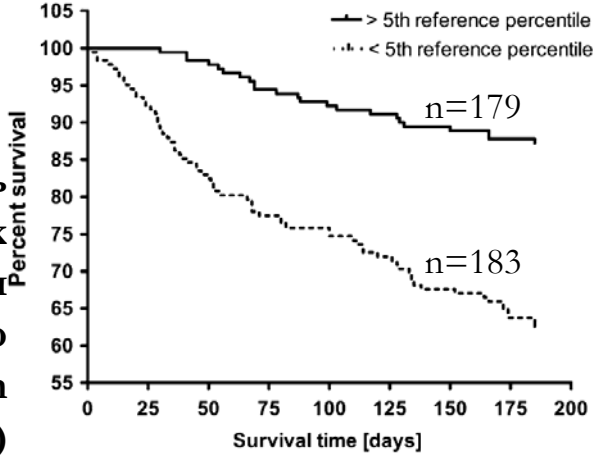
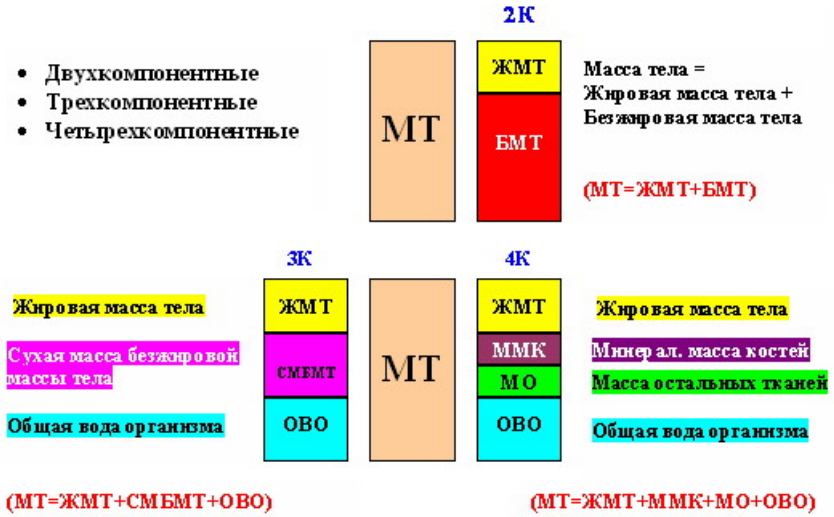



Image courtesy: Wadsworth Publishing Company, 1999

**Зависимость относительной смертности от индекса массы тела**




**Выживаемость онкологических больных в зависимости от величины фазового угла импеданса (Norman et al., 2010)**




**Наиболее распространённые модели состава тела молекулярного уровня (Brozek, Henschel, 1961; Lohman, 1992)**

# Состав тела человека – методы in vivo

- Антропометрические
- Биоэлектрические
  - **биоимпедансный анализ**
  - метод общей электрической проводимости
- Воздушная плетизмография
- Волюметрия
- Гидроденситометрия
- Инфракрасного отражения
- Радиологические (разведения изотопов)
- Рентгенологические
  - рентгеновская денситометрия
  - РКТ
- Ультразвуковая денситометрия
- Ядерно-физические
  - нейтронный активационный анализ
  - МРТ

Мартиросов Э.Г. и соавт. Технологии и методы определения состава тела человека. М.: Наука, 2006. 248с.

# Биоимпедансный анализ

**Биоимпедансный анализатор АВС-01 Медасс (НТЦ “Медасс”, Москва)**

**Стандартное расположение электродов в биоимпедансном анализе – тетраполярная схема измерений**

Контактный метод измерения пассивных электрических свойств организма

**Измеряемые величины**

• величина импеданса (для одной или нескольких частот тока, разных схем измерений)

**Схемы измерений**

• локальные, сегментные, полисегментные, всё тело

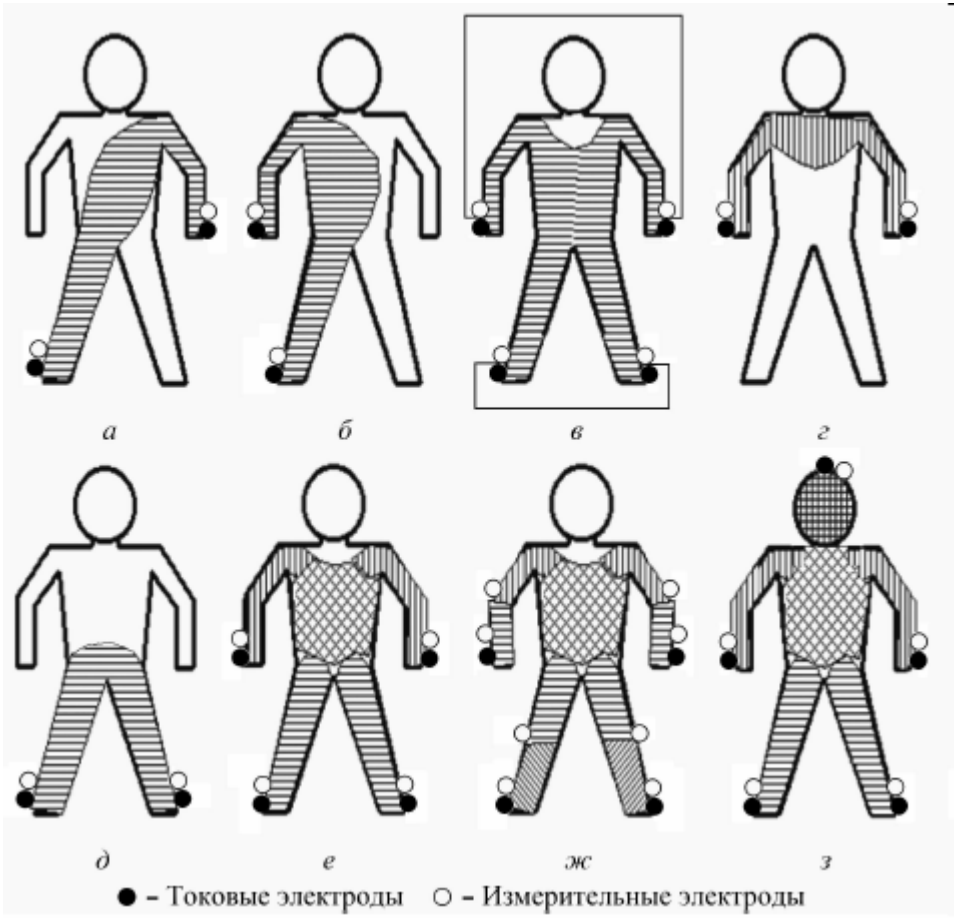
**Оцениваемые параметры**

• гидратация тела (клеточная/внеклеточная)

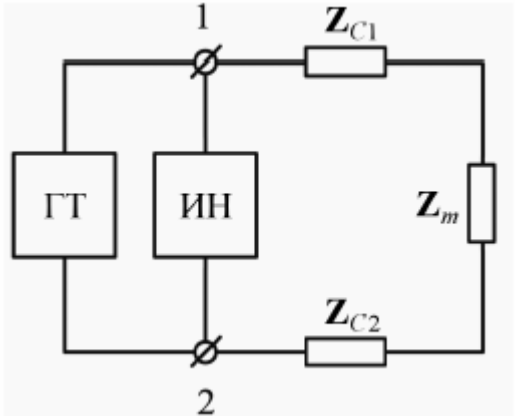
• безжировая, активная клеточная, скелетно-мышечная масса (абс./относит.)

• основной обмен

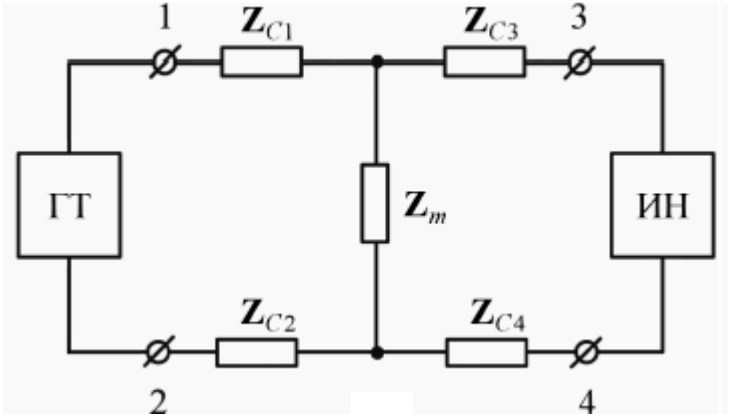
Николаев Д.В. и соавт. Биоимпедансный анализ состава тела человека. М.: Наука, 2009. 392с.




**Некоторые схемы измерений, используемые в методиках биоимпедансного анализа: А. Томассета (а), стандартная (б), по М.И. Тищенко (в), в приборах фирм Omron (г) и Tanita (д), 8-электродная (е), 12-электродная (ж), 10-электродная (з)**

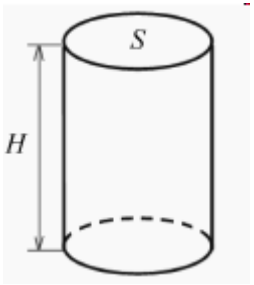



**Биполярная схема измерений**




**Тетраполярная схема измерений**

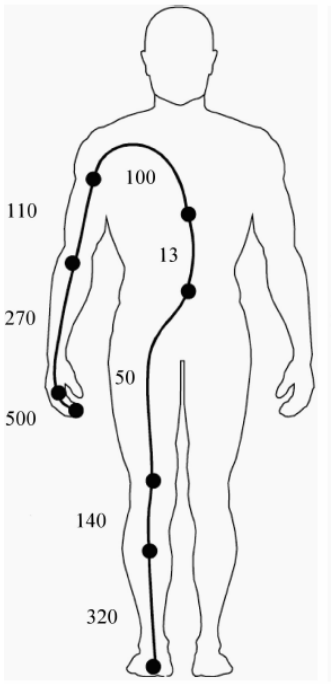
# Как получаются оценки состава тела биоимпедансным методом?



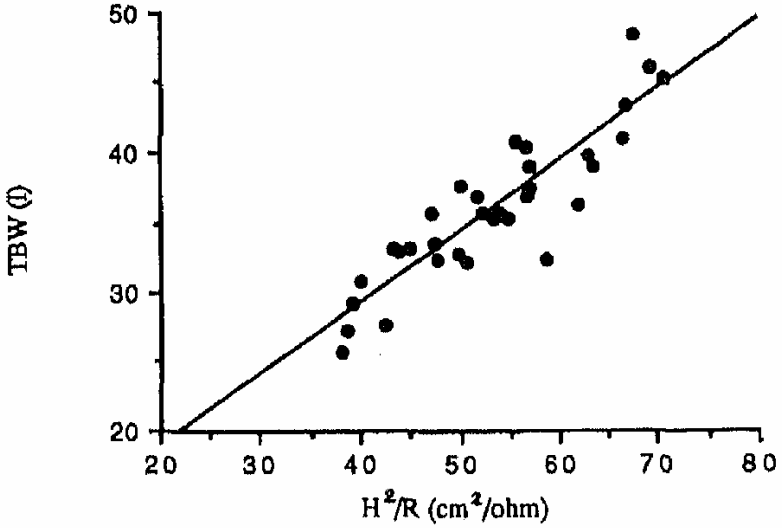

$$R = \frac{\rho H}{S} = \frac{\rho H^2}{SH} = \frac{\rho H^2}{V}.$$

$$V = \frac{\rho H^2}{R}.$$

Индекс импеданса




**Примерные величины сопротивлений сегментов тела (Grimnes, Martinsen, 2008)**

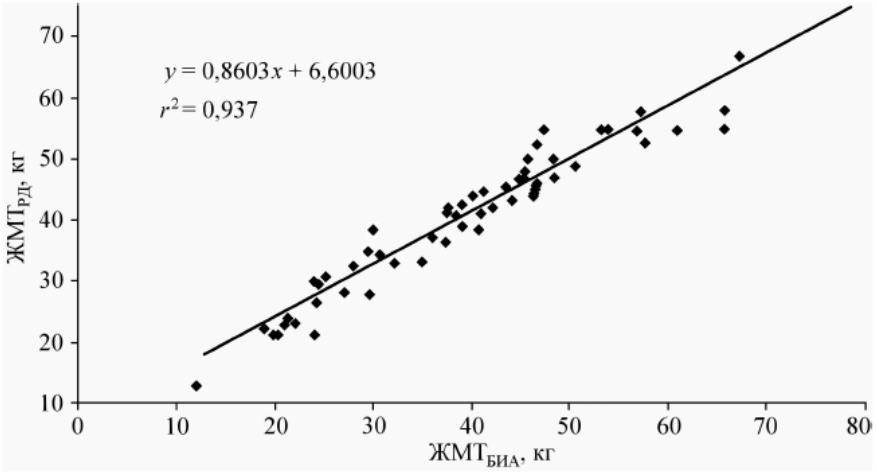



**Корреляция индекса импеданса ($H^2/R$) с общим содержанием воды в организме у больных онкологическими заболеваниями ($r=0,89$, $p<0,001$) (Fredrix et al., 1990)**

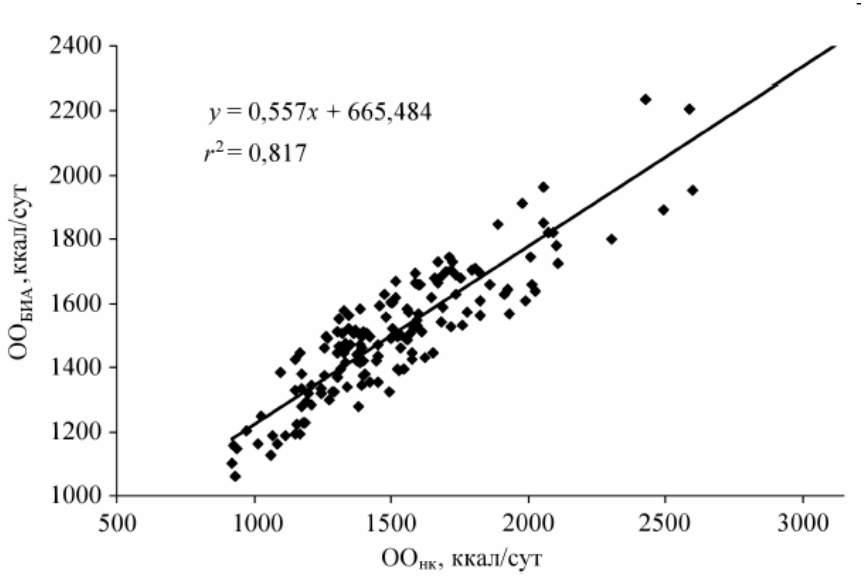
$$\text{ОВО} = \frac{\rho' \text{ДТ}^2}{R} + k_{\text{мт}}\text{МТ} + k_{\text{в}}\text{Возр} + \text{const} + \ldots$$

БМТ = ОВО / 0,732

# Верификация метода



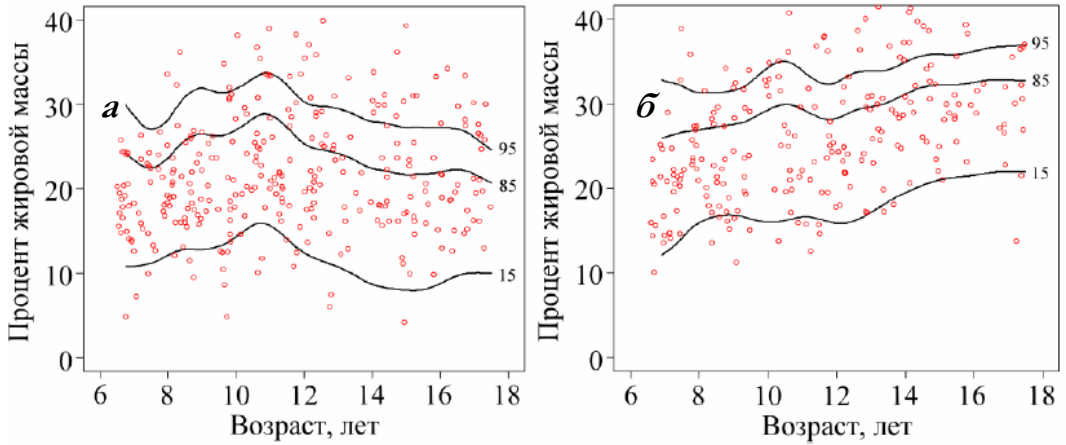

**Верификация биоимпедансных оценок жировой массы методом рентгеновской денситометрии (Васильев и др., 2005)**



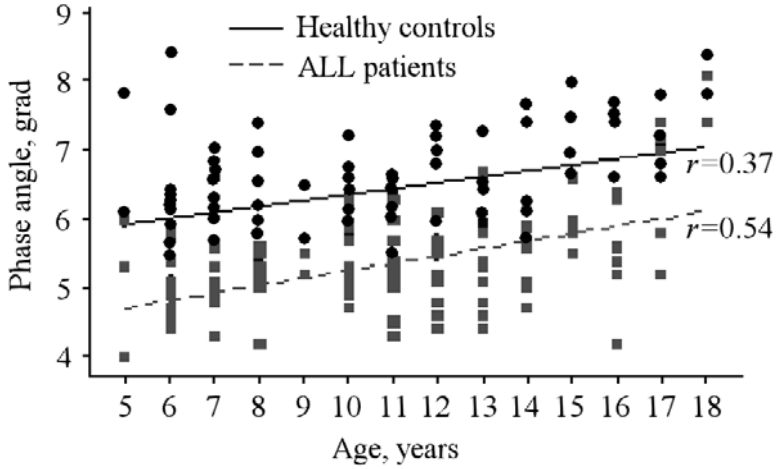

**Верификация биоимпедансных оценок основного обмена методом непрямой калориметрии (Хрущева и др., 2009)**

# Применение: примеры

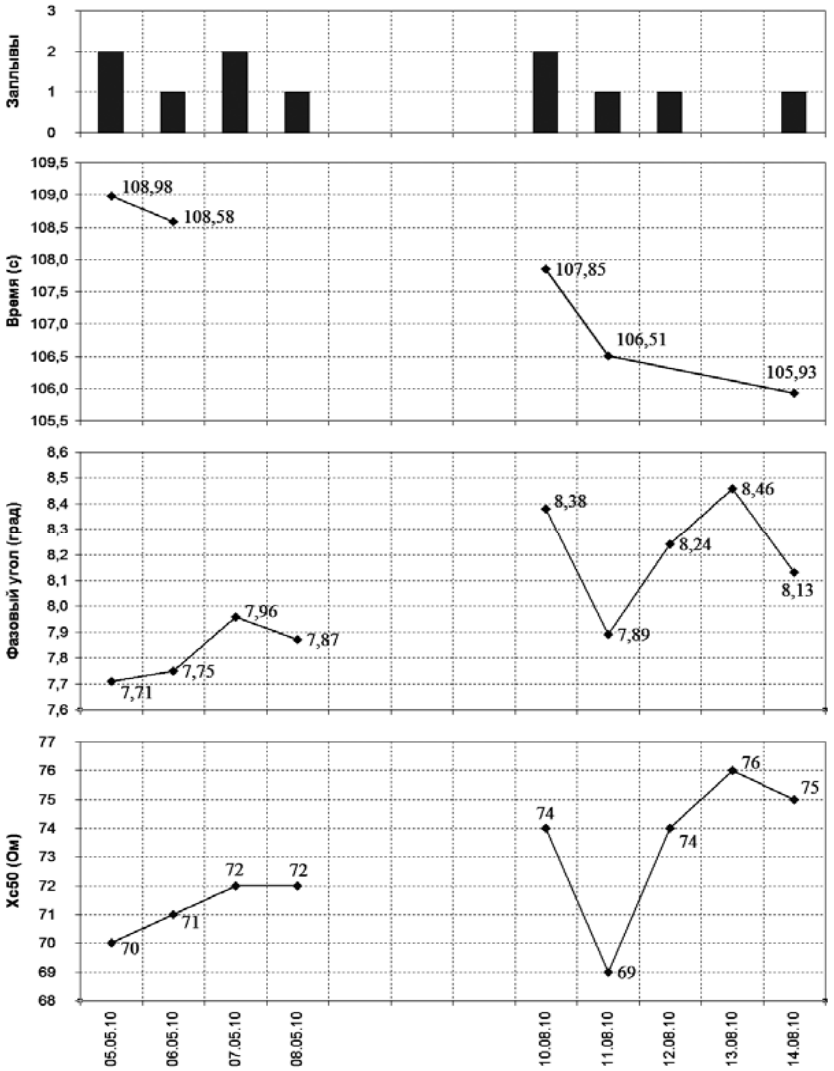
- Компонентный состав тела
  - Скрининг, оценка состояния здоровья населения
  - Диетология, фитнес
  - Спортивная медицина
  - Онкология
- Гидратация и характеристики импеданса
  - Реанимация
  - Интенсивная терапия
  - Трансплантация органов
  - Стоматология
  - Физиология, в т.ч. экстремальных видов деятельности




**Диаграммы рассеяния значений %ЖМТ у детей, излеченных от онкологических заболеваний, на фоне кривых нормальной возрастной изменчивости признака: а – мальчики, б – девочки (Коновалова и соавт., 2011)**



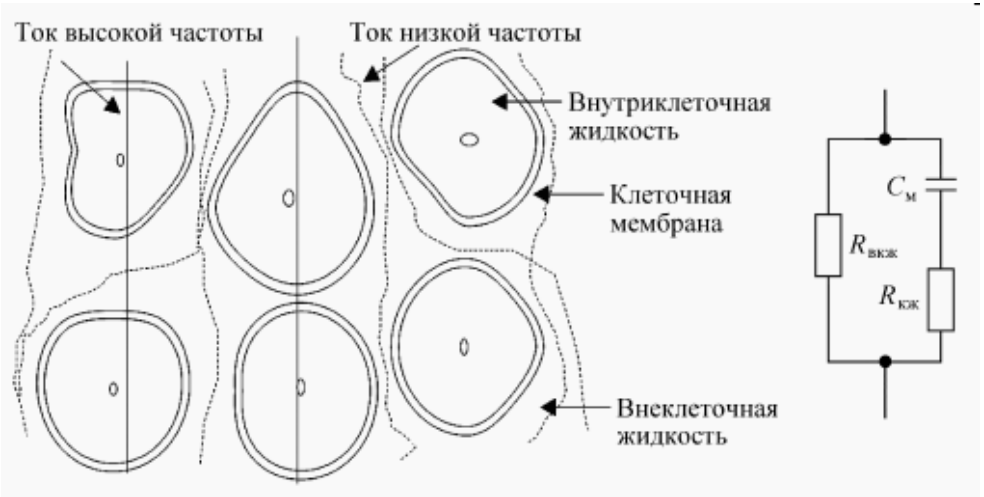

**Зависимость от возраста величины фазового угла у здоровых детей и больных острым лимфобластным лейкозом (Tseytlin et al., 2010)**




**Результаты выступлений на соревнованиях и параметры импеданса тела у спортсмена-пловца на чемпионате России, 05.2010 (слева), и ЧЕ, 08.2010 (справа). Сверху вниз: количество заплывов, результаты на дистанции 200 м вольным стилем, значения фазового угла и реактивного сопротивления (Сорокин и соавт., 2011)**

# Схемы измерения импеданса

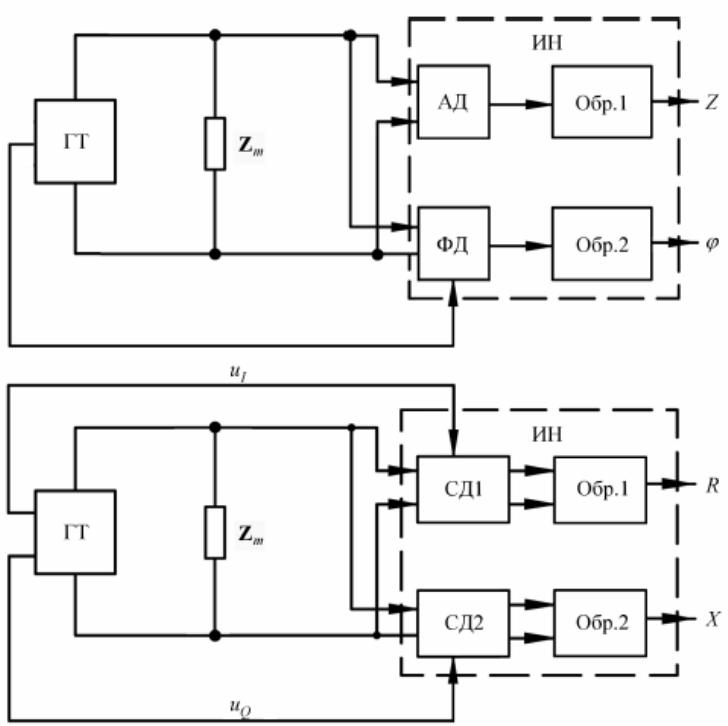
**Схема частотной зависимости импеданса тканей**




**Линии тока в биологическом объекте и эквивалентная электрическая схема**

(а)

(б)




**Схемы измерения комплексного импеданса: с использованием амплитудного и фазового детекторов (а), с использованием синхронных детекторов (б)**

# Биоимпедансная спектроскопия

**Модель Коула (Cole, 1940)**

$$\mathbf{Z} = R_\infty + \frac{R_0 - R_\infty}{1 + (j\omega\tau_Z)^\alpha}$$

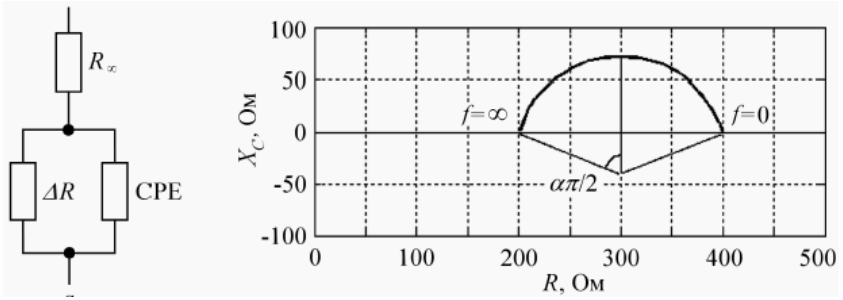



**Схема и годограф модели Коула**

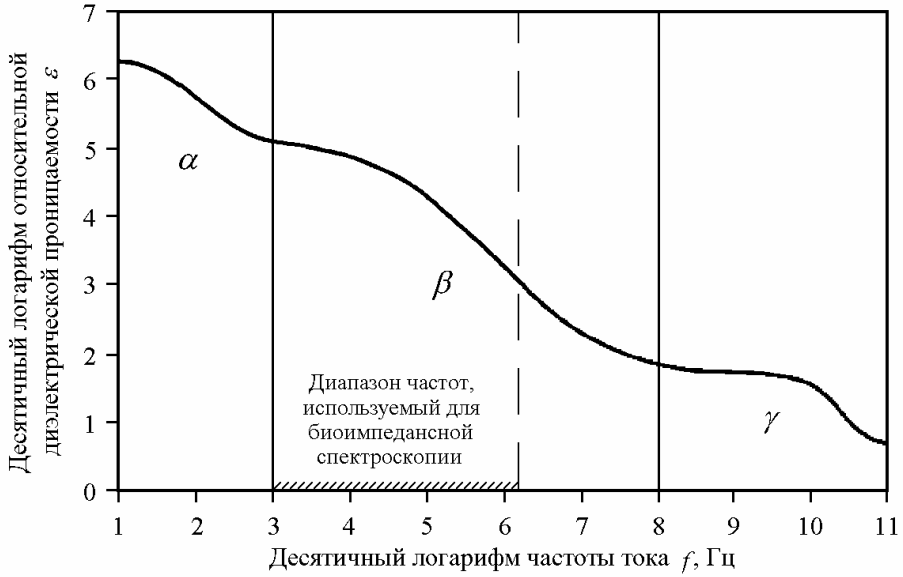
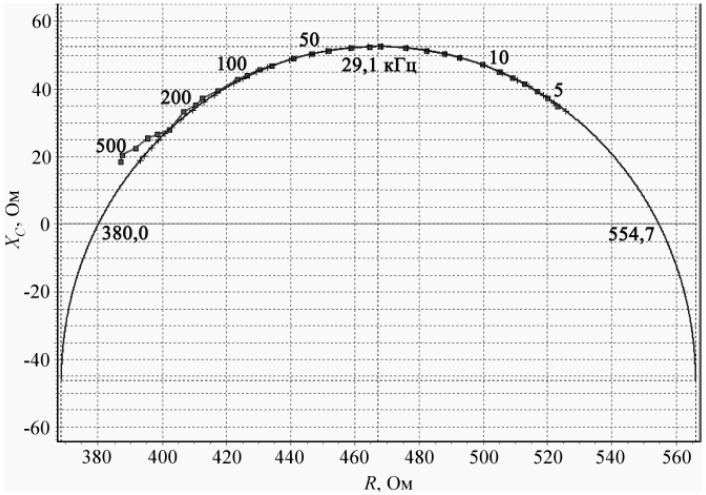



**Схема зависимости относительной диэлектрической проницаемости биологических тканей от частоты тока (H. Schwan, 1957)**

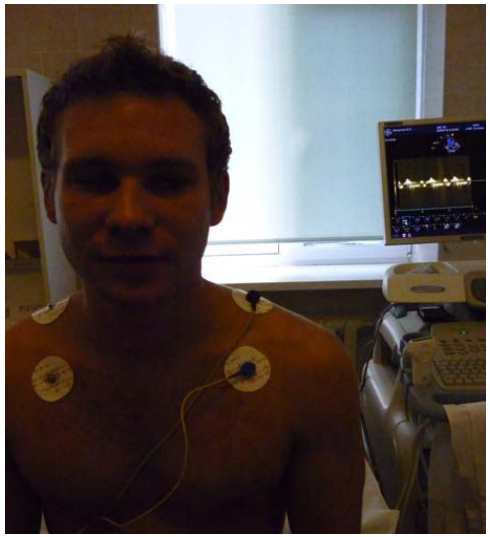


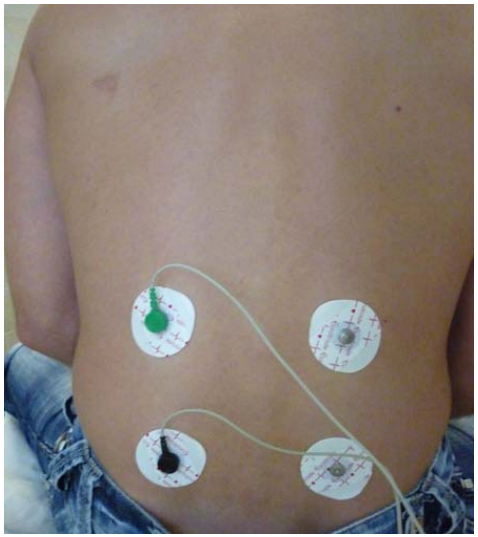

**Пример аппроксимации импедансного спектра по модели Коула**

Применение: гематология, исследования гидратации тела

# Экспериментальное исследование гидратации лёгких

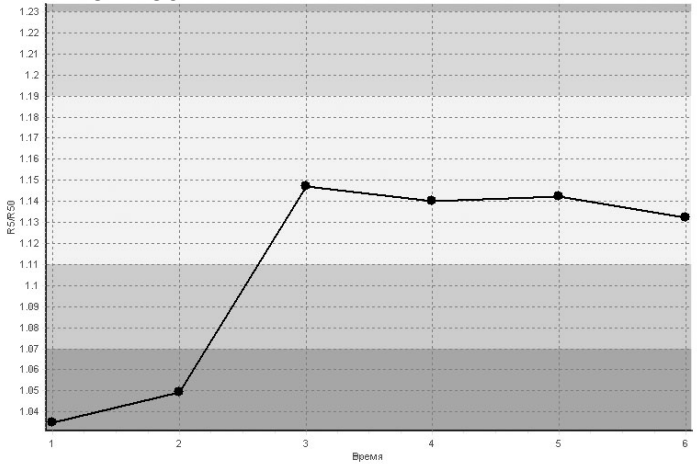
(n=165; ГКБ № 53, 67)





**Биоимпедансная спектрометрия лёгких – положение электродов во время измерений (Орквасов и соавт., 2011)**

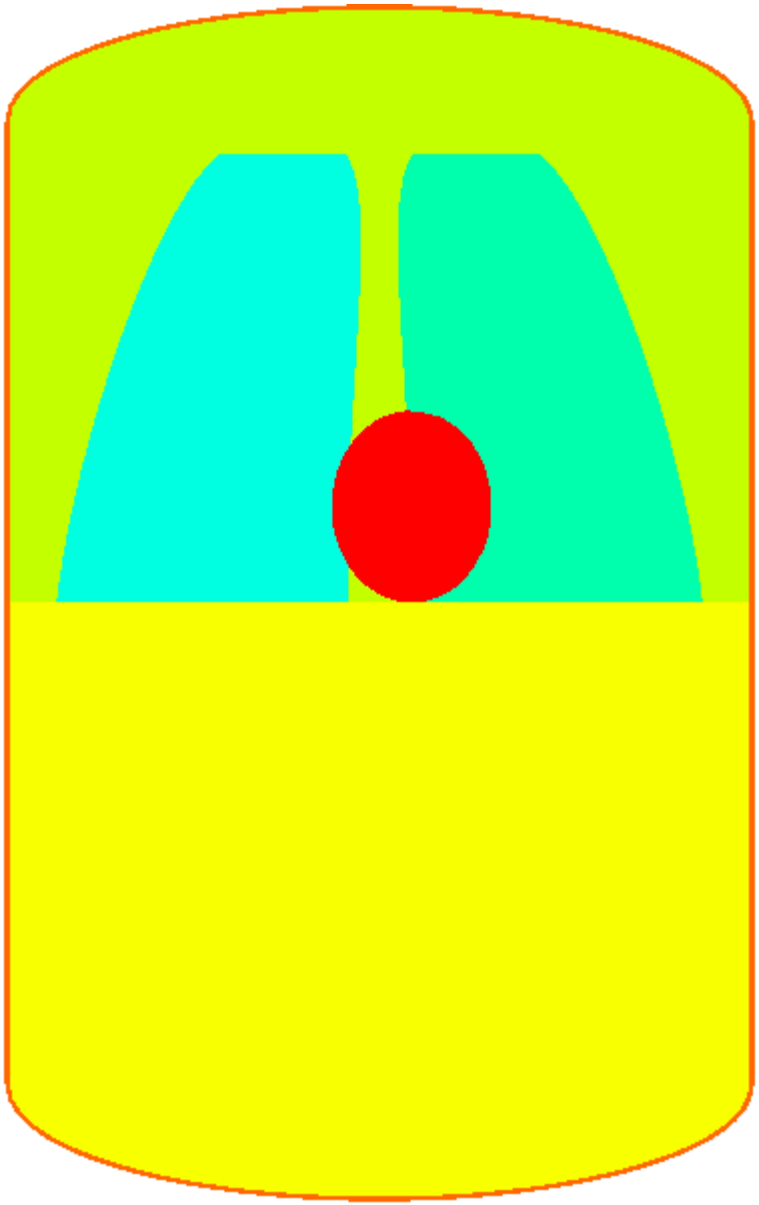
Динамика индекса гидратации лёгких ($R_5/R_{50}$) – клинические примеры




Инфекционный отёк (пневмония)

Наркотическое отравление

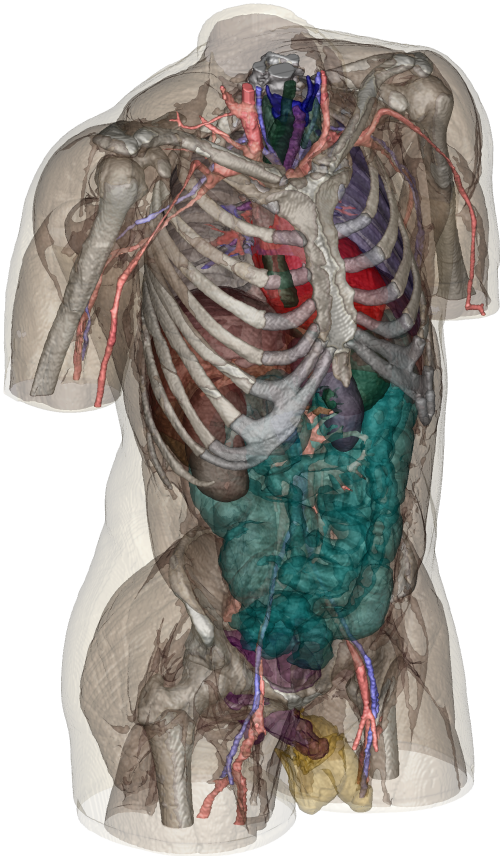
# Биоимпедансные измерения состава тела человека

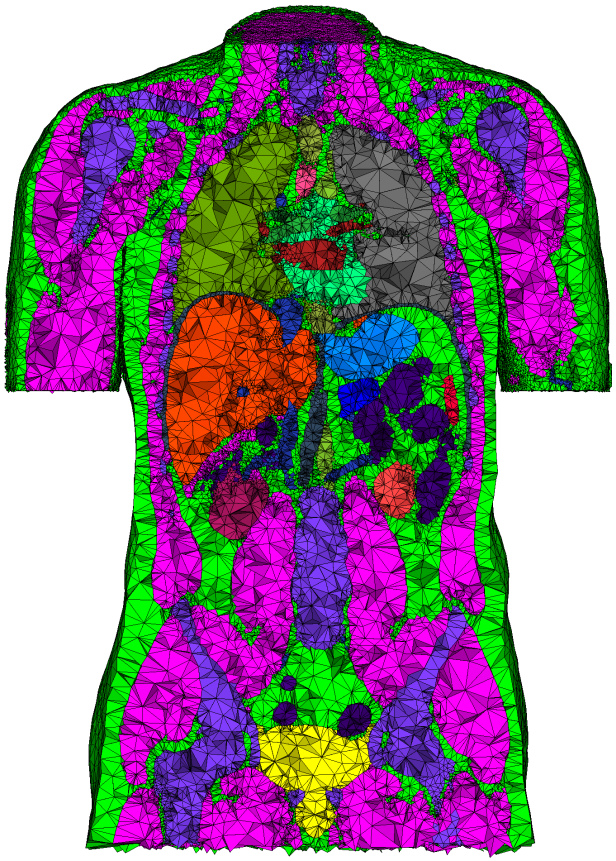


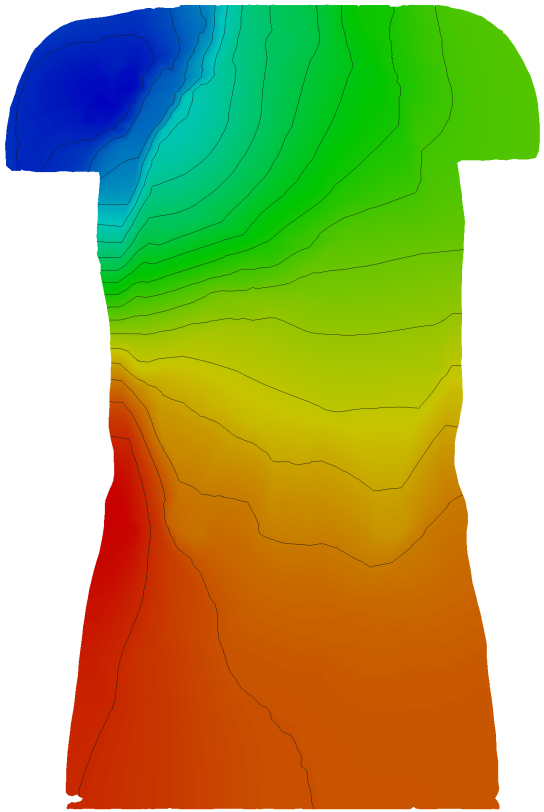
$$\operatorname{div}(\mathbf{C}\nabla U) = 0 \qquad \text{в} \quad \Omega$$
$$\mathbf{J}_n = I_\pm / S \qquad \text{на} \quad \Gamma_\pm$$
$$\mathbf{J}_n = 0 \qquad \text{на} \quad \partial\Omega \setminus \Gamma_\pm$$

$U$ – потенциал электрического поля
$\mathbf{C}$ – тензор удельной проводимости
$\mathbf{E} = \nabla U$ – напряжённость поля
$\mathbf{J} = \mathbf{C}\ \mathbf{E}$ – плотность тока
$I_\pm$ – зондирующий ток
$S$ – площадь контакта электрода

# Технологическая цепочка







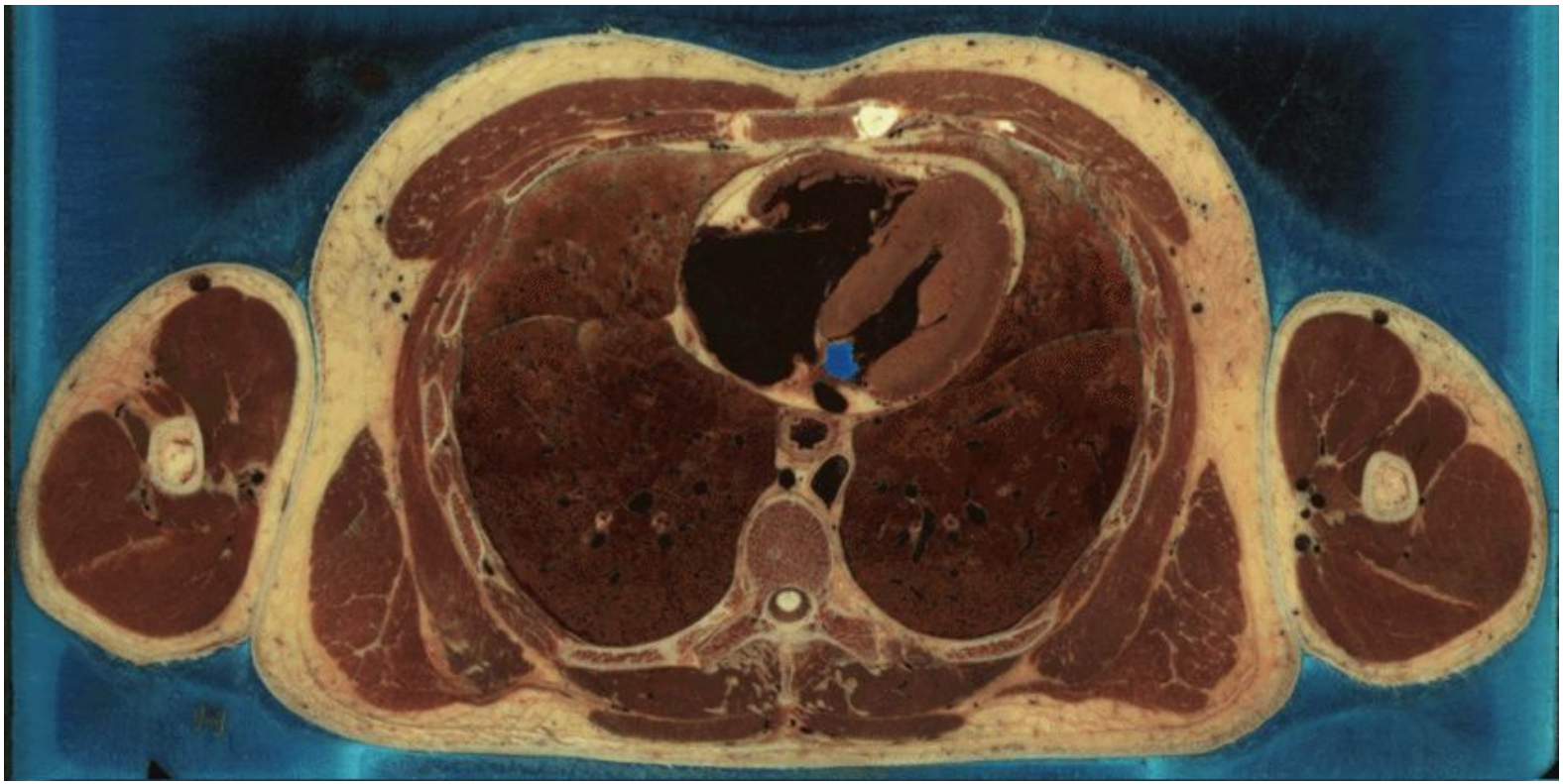
ITK-SNAP, CGAL, Ani3D, ParaView

# Visible Human Project

Visible Human Project
U.S. National Library of Medicine
`www.nlm.nih.gov/research/visible`

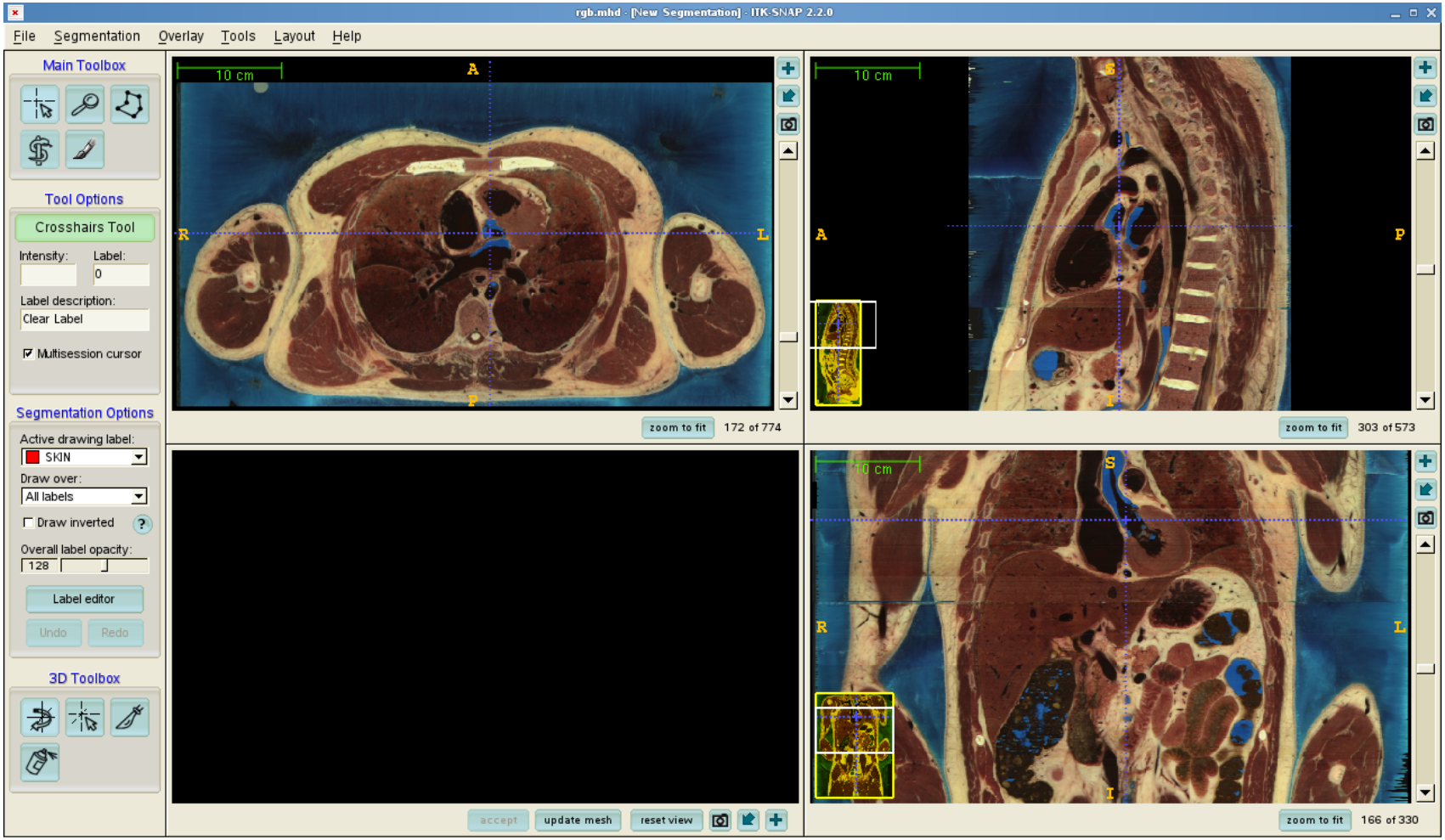
# Visible Human Project

Visible Human Project
U.S. National Library of Medicine
`www.nlm.nih.gov/research/visible`



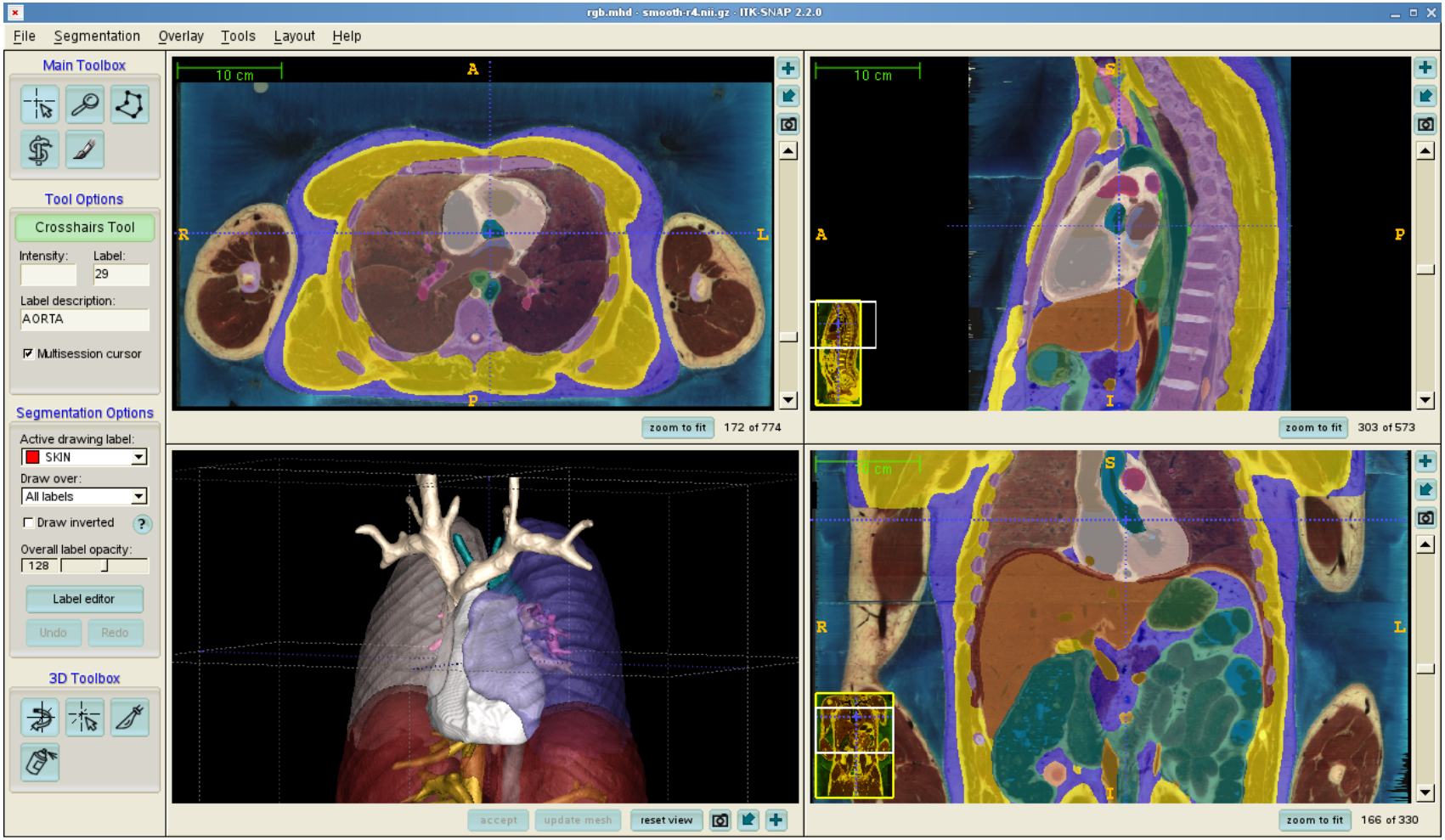
# ITK-SNAP

ITK-SNAP (`www.itksnap.org`)
Свободное ПО для визуализации и сегментирования

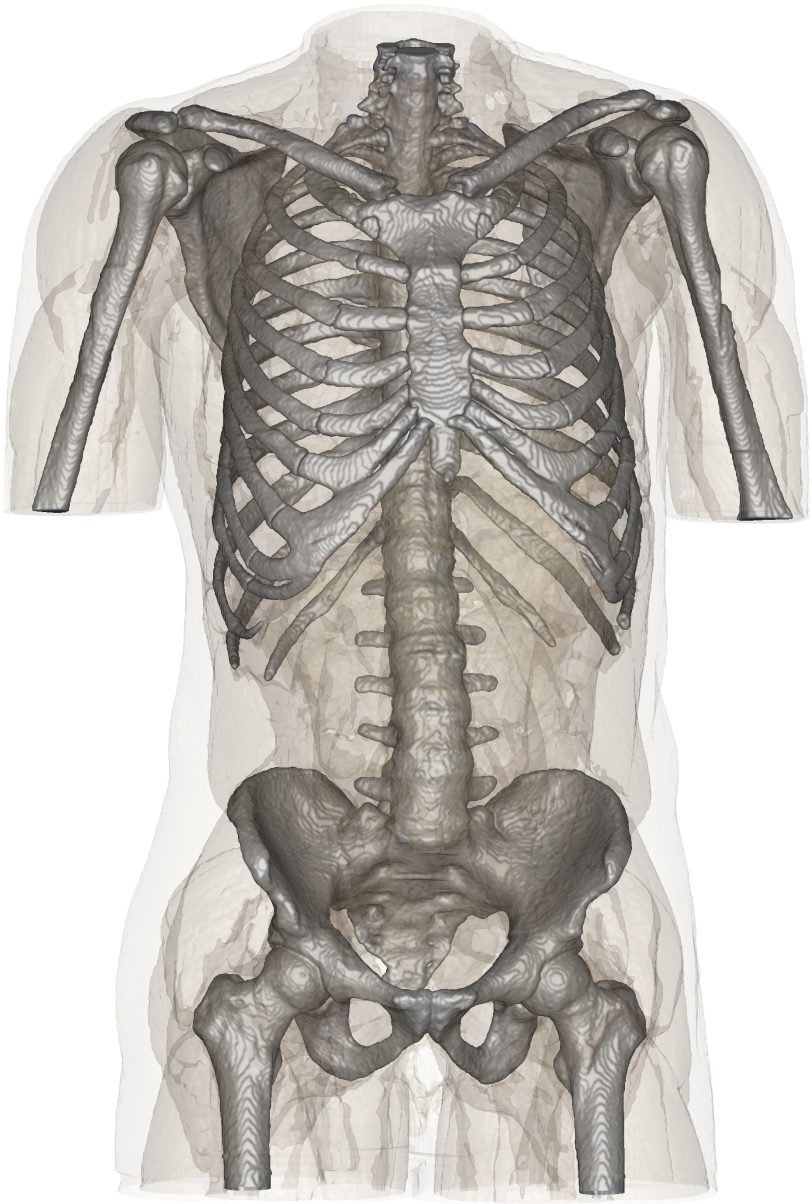


# ITK-SNAP

ITK-SNAP (`www.itksnap.org`)
Свободное ПО для визуализации и сегментирования



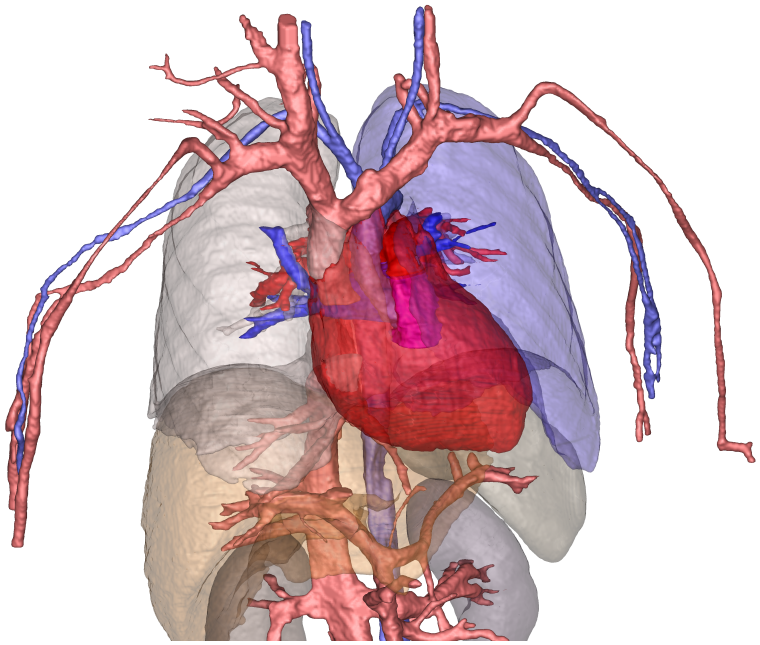
# Сегментированная модель



$567 \times 305 \times 843$ ячеек

$1 \times 1 \times 1$ мм

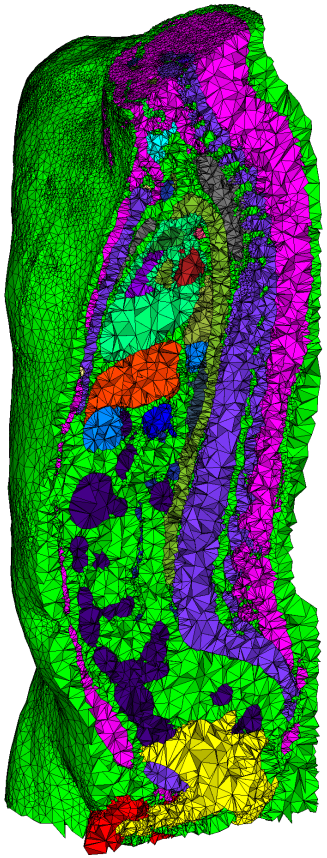
26 органов и тканей

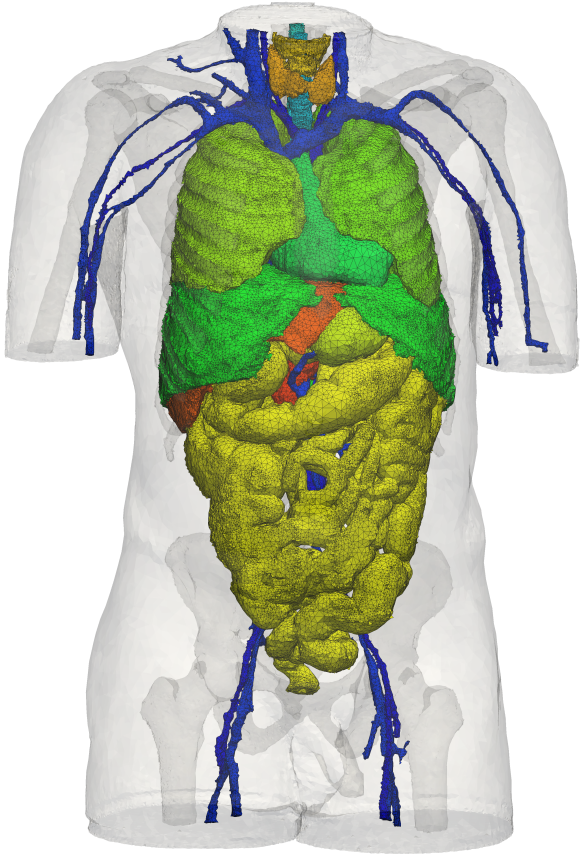


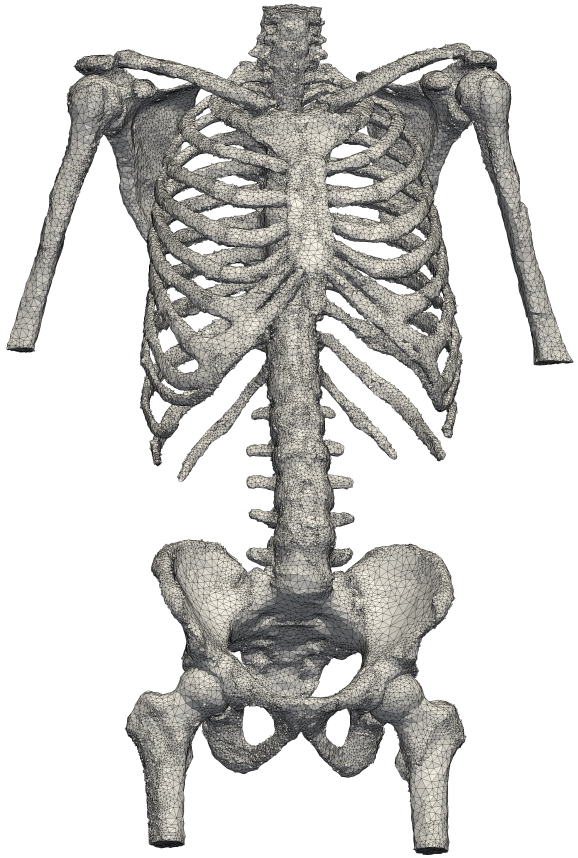
# Неструктурированные тетраэдральные сетки

## CGAL + Ani3D

CGAL Mesh (`www.cgal.org`) – построение сетки Делоне
Ani3D (`sf.net/projects/ani3d`) – улучшение качества сетки





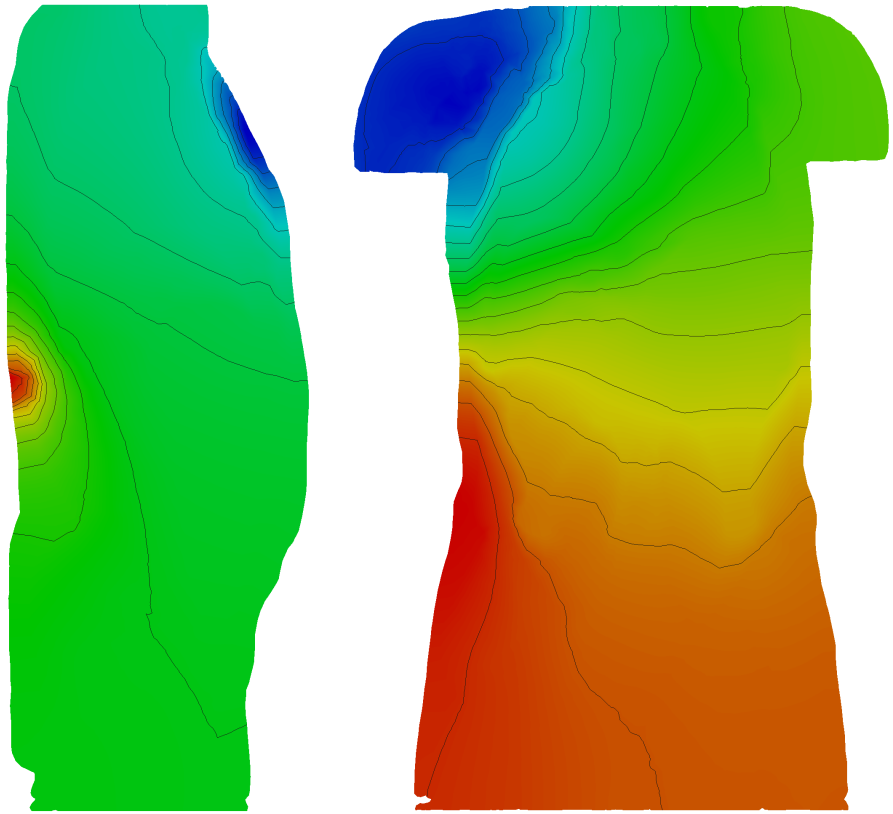


413508 вершин, 2315329 тетраэдров, 84430 боковых граней

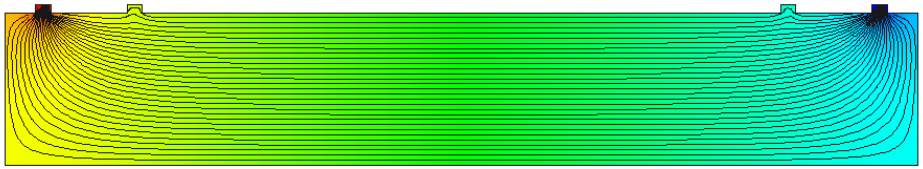
# Численное решение

## Ani3D – P1 МКЭ

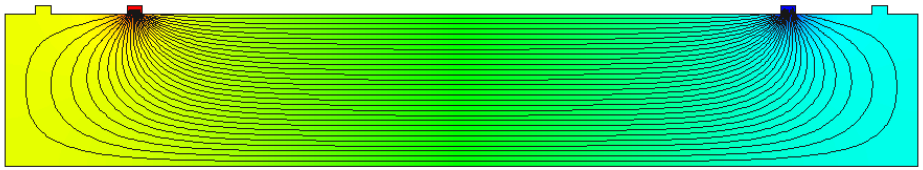
P1 МКЭ дискретизация с помощью пакета Ani3D
BiCGStab + ILU2



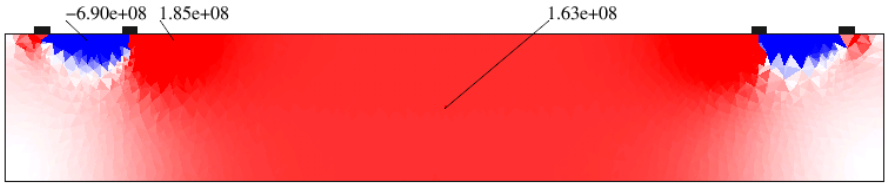
# Функция чувствительности



линии тока для токовых электродов – $\mathbf{J}_{\mathrm{cc}}$



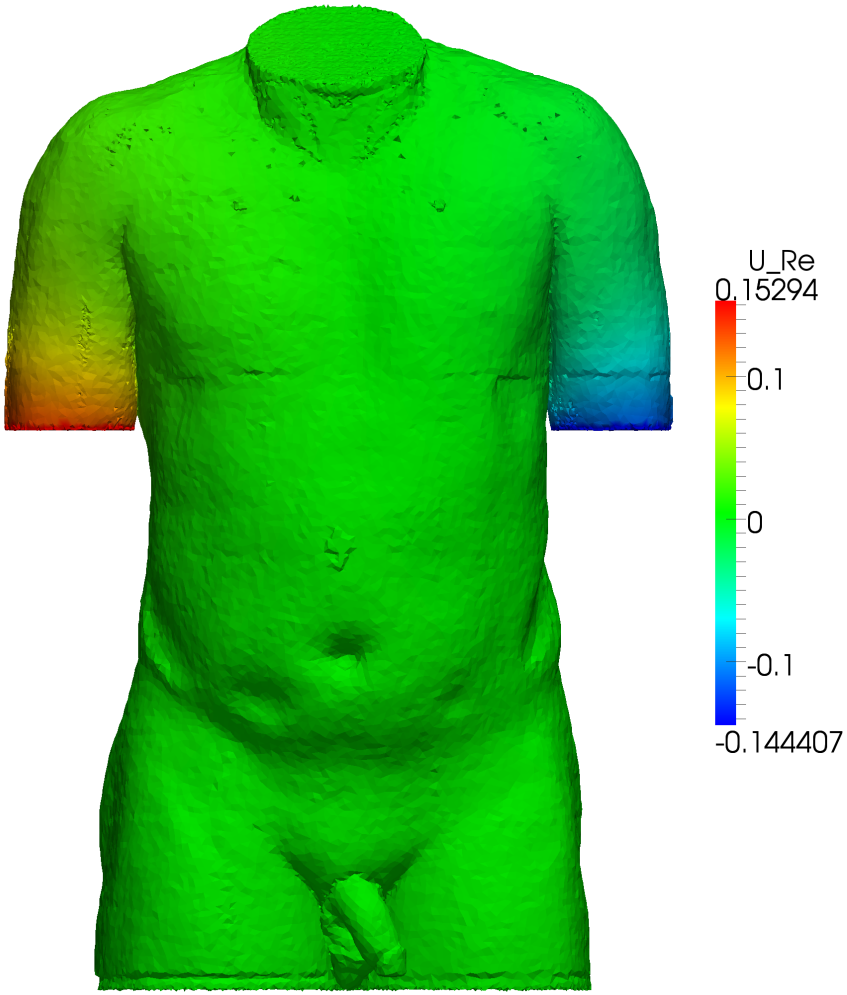
линии тока для потенциальных электродов – $\mathbf{J}_{\mathrm{reci}}$

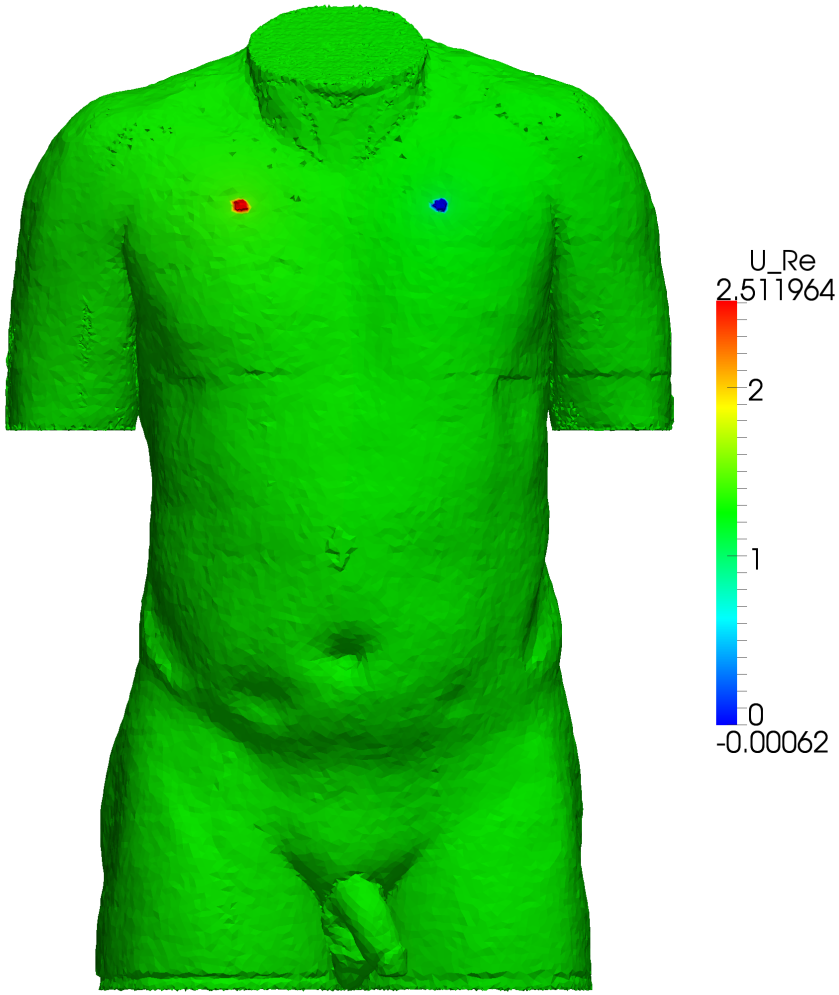



функция чувствительности $S = \mathbf{J}_{\mathrm{reci}} \cdot \mathbf{J}_{\mathrm{cc}}$

# Примеры расчётов

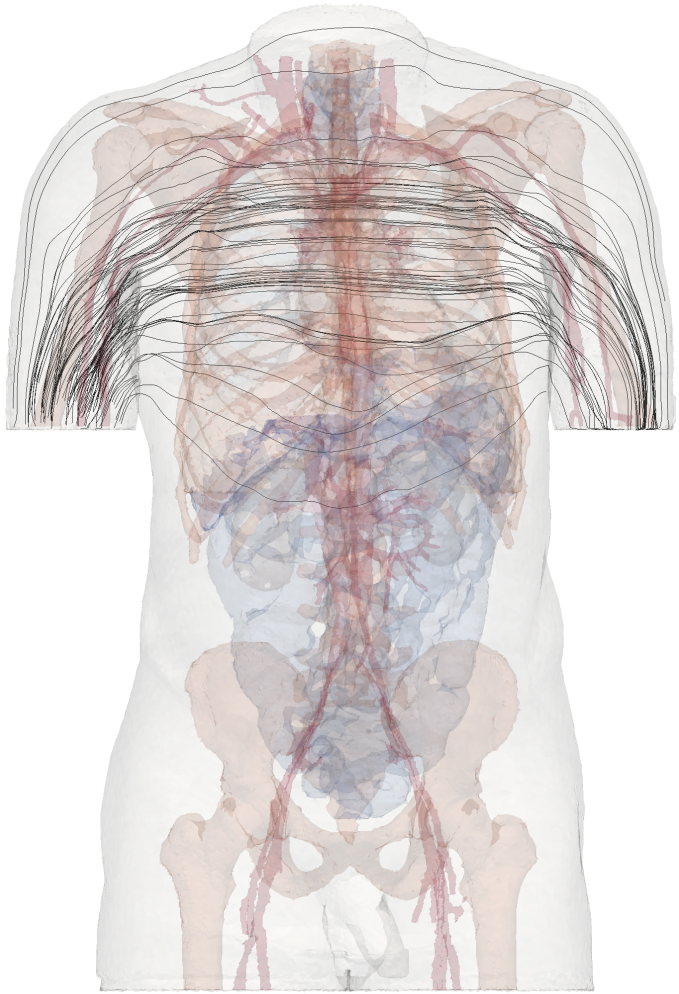
## Схема измерения



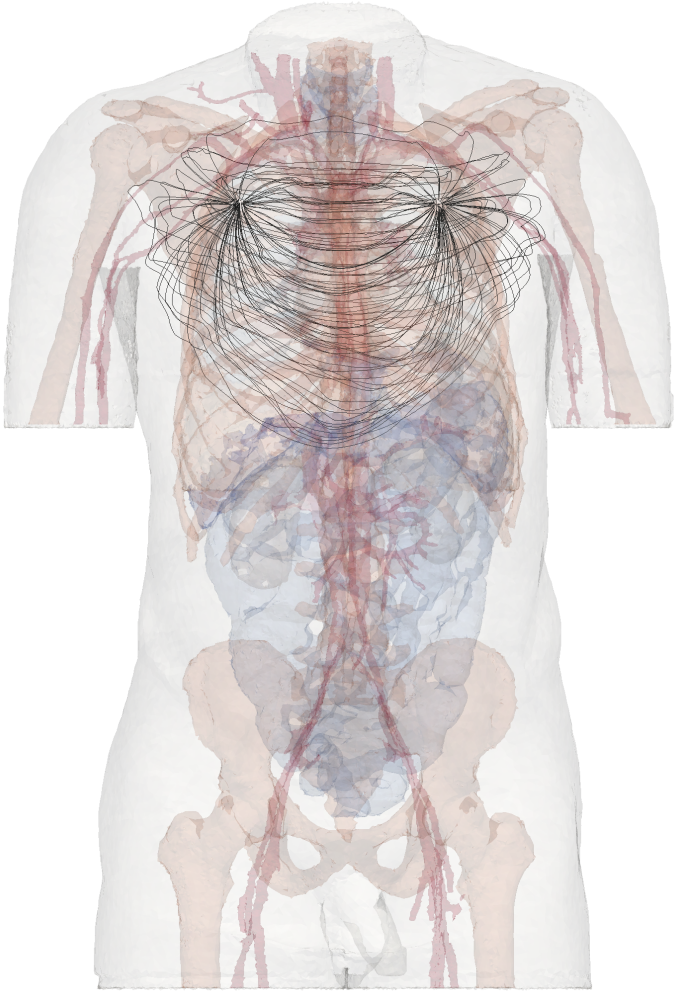
# Примеры расчётов

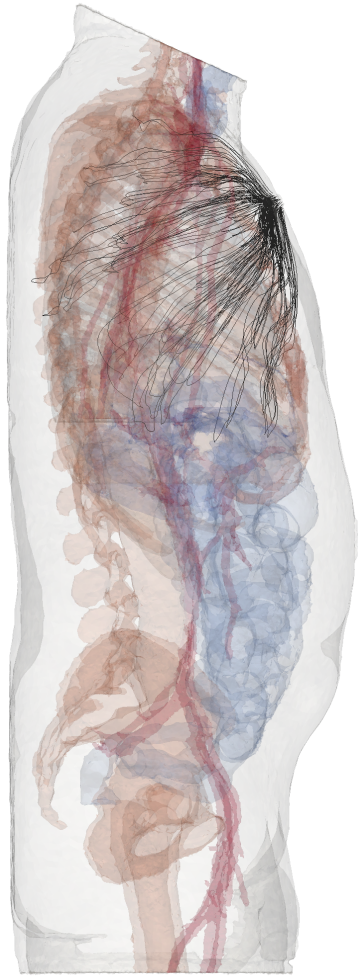
## Токовые электроды



# Примеры расчётов

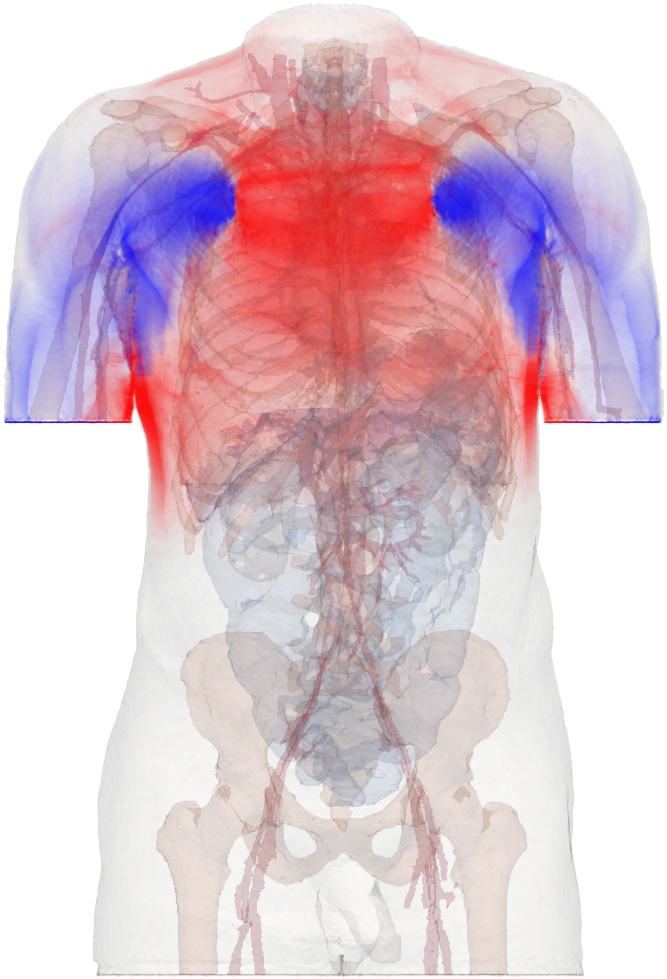
## Потенциальные электроды

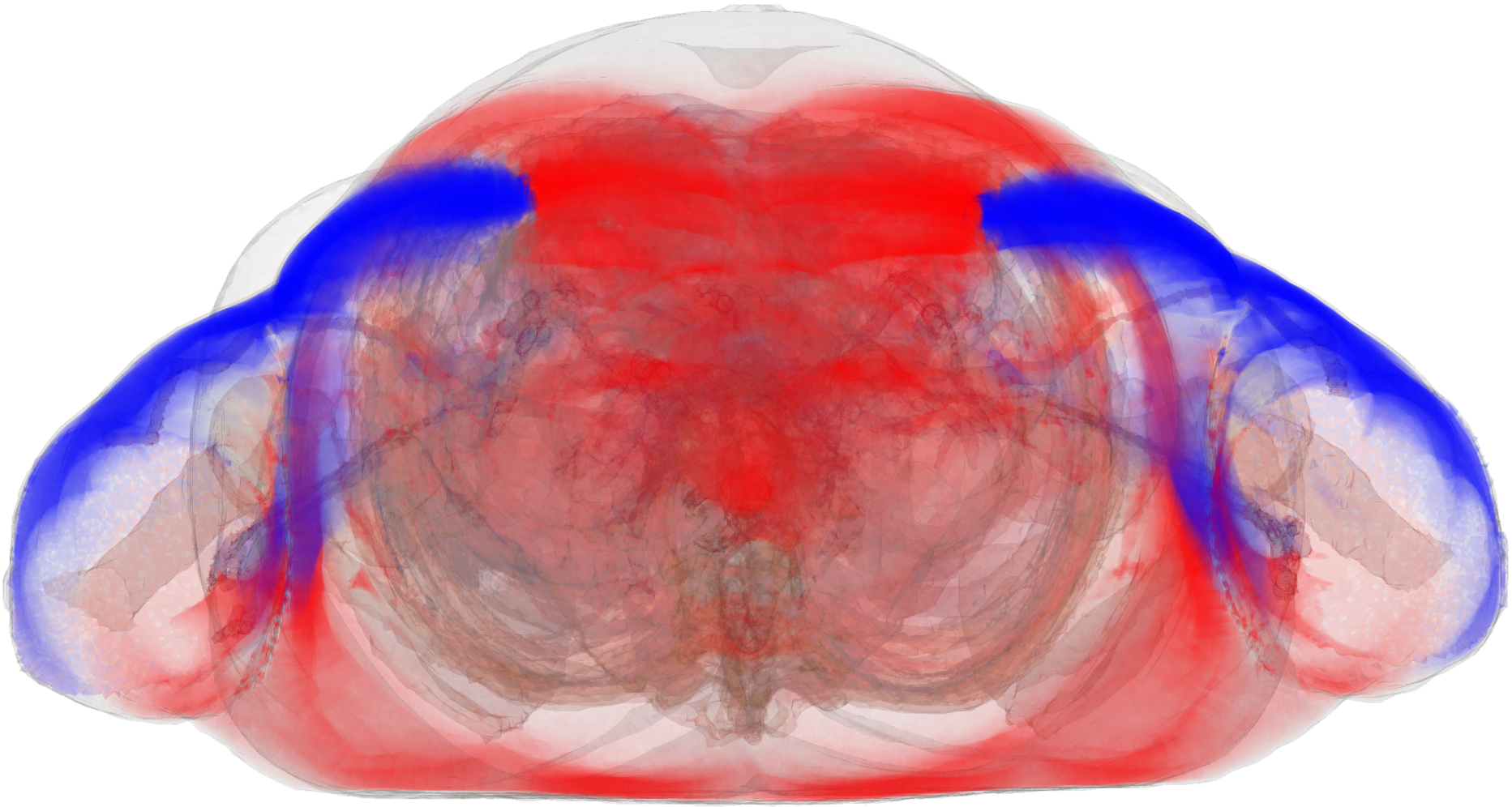




# Примеры расчётов

## Поле чувствительности



# Примеры расчётов

## Поле чувствительности