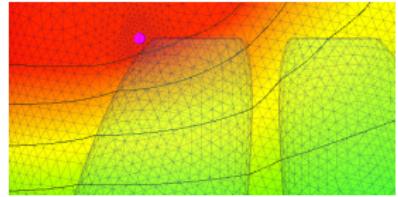
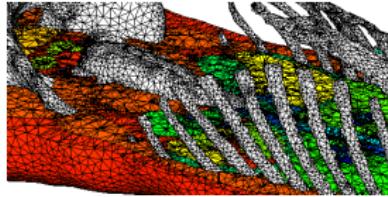


Сеточные технологии моделирования биоимпедансных измерений на примере данных Visible Human Project

А.А.Данилов, В.Ю.Саламатова, Ю.В.Василевский

Институт вычислительной математики РАН

Мат.модели и числ.методы в биоматематике 2012



Биоимпедансные измерения



- Импедансная томография/кардиография
- Биоимпедансный анализ состава тела



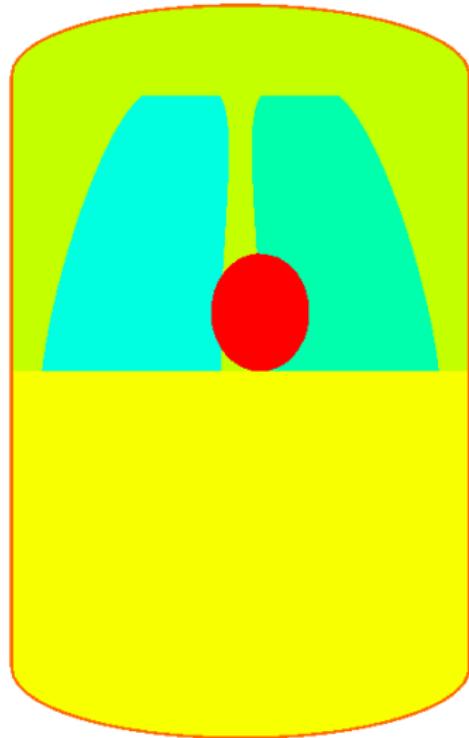
- Измеряется величина импеданса для нескольких частот
- Локальные, сегментные и полисегментные схемы
- Оценивается гидратация, безжировая, активная клеточная, скелетно-мышечная масса и др.

Неинвазивность, оперативность, портативность, простота и удобство

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

Grimnes S., Martinsen O.G. Bioimpedance and bioelectricity basics. Amsterdam: Elsevier, 2008.

Математическая модель



$$\begin{aligned}\operatorname{div}(\mathbf{C} \nabla U) &= 0 && \text{в } \Omega \\ \mathbf{J}_n = \pm I / S_{\pm} & && \text{на } \Gamma_{\pm} \\ \mathbf{J}_n = 0 & && \text{на } \partial\Omega \setminus \Gamma_{\pm}\end{aligned}$$

U – потенциал электрического поля

\mathbf{C} – тензор удельной проводимости

$\mathbf{E} = \nabla U$ – напряжённость поля

$\mathbf{J} = \mathbf{C} \mathbf{E}$ – плотность тока

I – зондирующий ток

S_{\pm} – площадь контакта электродов

Численный метод

$$\operatorname{div}(\mathbf{C} \nabla U) = 0$$

$$\mathbf{C} = \mathbf{C}_R + i \cdot \mathbf{C}_I, \quad U = U_R + i \cdot U_I,$$

$$\begin{cases} \operatorname{div}(\mathbf{C}_R \nabla U_R) - \operatorname{div}(\mathbf{C}_I \nabla U_I) = 0 \\ \operatorname{div}(\mathbf{C}_R \nabla U_I) + \operatorname{div}(\mathbf{C}_I \nabla U_R) = 0 \end{cases}$$

$$\begin{pmatrix} A_R & -A_I \\ A_I & A_R \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_R \\ x_I \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} b_R \\ b_I \end{pmatrix}$$

P1 FEM (AniFEM, Ani3D package, sf.net/projects/ani3d)

Численный метод

$$\operatorname{div}(\mathbf{C} \nabla U) = 0$$

$$\mathbf{C} = \mathbf{C}_R + i \cdot \mathbf{C}_I, \quad U = U_R + i \cdot U_I,$$

$$\begin{cases} \operatorname{div}(\mathbf{C}_R \nabla U_R) - \operatorname{div}(\mathbf{C}_I \nabla U_I) = 0 \\ \operatorname{div}(\mathbf{C}_R \nabla U_I) + \operatorname{div}(\mathbf{C}_I \nabla U_R) = 0 \end{cases}$$

$$\begin{pmatrix} A_R & -A_I \\ A_I & A_R \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_R \\ x_I \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} b_R \\ b_I \end{pmatrix}$$

P1 FEM (AniFEM, Ani3D package, sf.net/projects/ani3d)

Численный метод

$$\operatorname{div}(\mathbf{C} \nabla U) = 0$$

$$\mathbf{C} = \mathbf{C}_R + i \cdot \mathbf{C}_I, \quad U = U_R + i \cdot U_I,$$

$$\begin{cases} \operatorname{div}(\mathbf{C}_R \nabla U_R) - \operatorname{div}(\mathbf{C}_I \nabla U_I) = 0 \\ \operatorname{div}(\mathbf{C}_R \nabla U_I) + \operatorname{div}(\mathbf{C}_I \nabla U_R) = 0 \end{cases}$$

$$\begin{pmatrix} A_R & -A_I \\ A_I & A_R \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_R \\ x_I \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} b_R \\ b_I \end{pmatrix}$$

P1 FEM (AniFEM, Ani3D package, sf.net/projects/ani3d)

Численный метод

$$\operatorname{div}(\mathbf{C} \nabla U) = 0$$

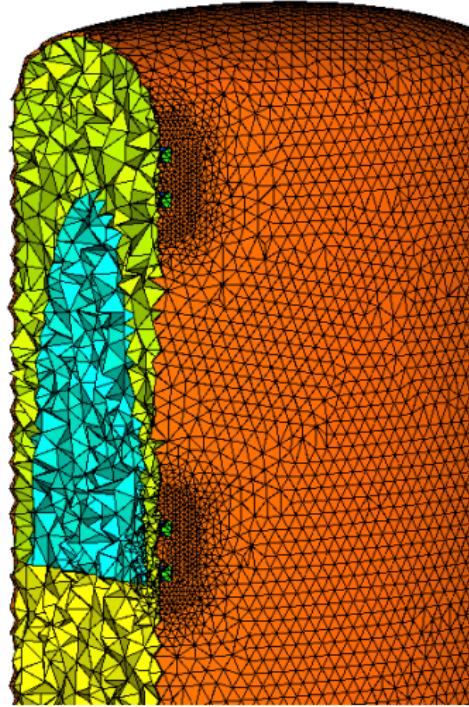
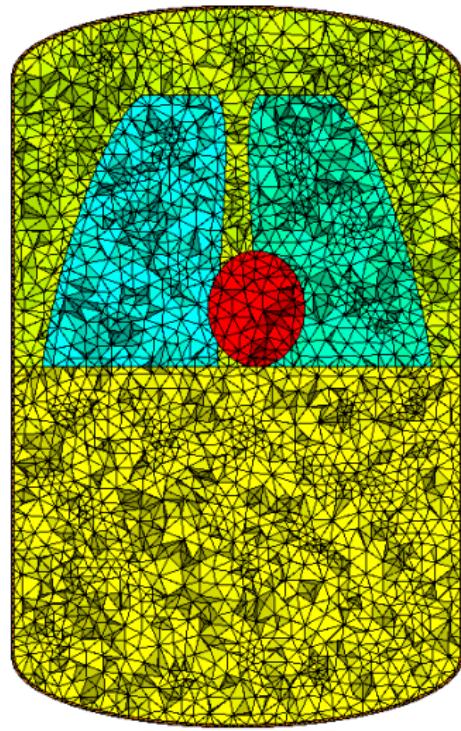
$$\mathbf{C} = \mathbf{C}_R + i \cdot \mathbf{C}_I, \quad U = U_R + i \cdot U_I,$$

$$\begin{cases} \operatorname{div}(\mathbf{C}_R \nabla U_R) - \operatorname{div}(\mathbf{C}_I \nabla U_I) = 0 \\ \operatorname{div}(\mathbf{C}_R \nabla U_I) + \operatorname{div}(\mathbf{C}_I \nabla U_R) = 0 \end{cases}$$

$$\begin{pmatrix} A_R & -A_I \\ A_I & A_R \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_R \\ x_I \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} b_R \\ b_I \end{pmatrix}$$

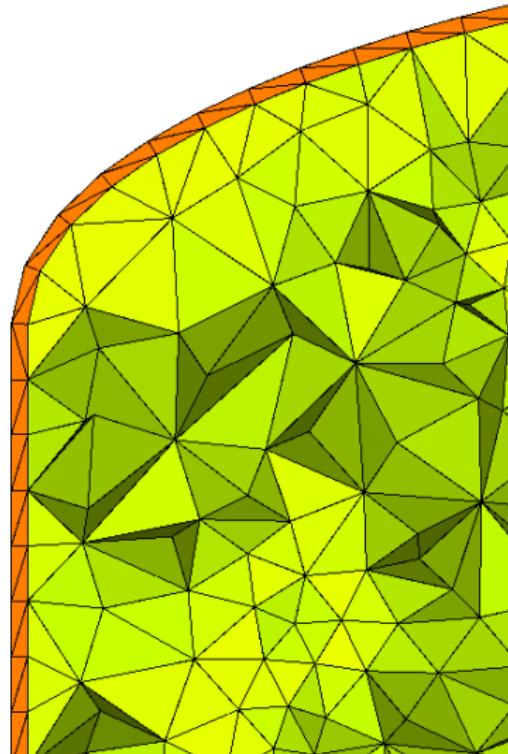
P1 FEM (AniFEM, Ani3D package, sf.net/projects/ani3d)

Простейшая геометрическая модель

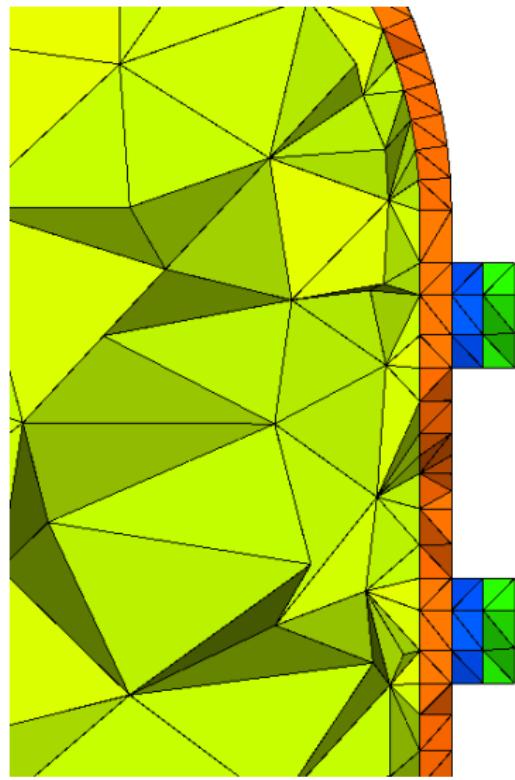


AniAFT + AniMBA (Ani3D package, sf.net/projects/ani3d)

Анизотропные коэффициенты проводимости



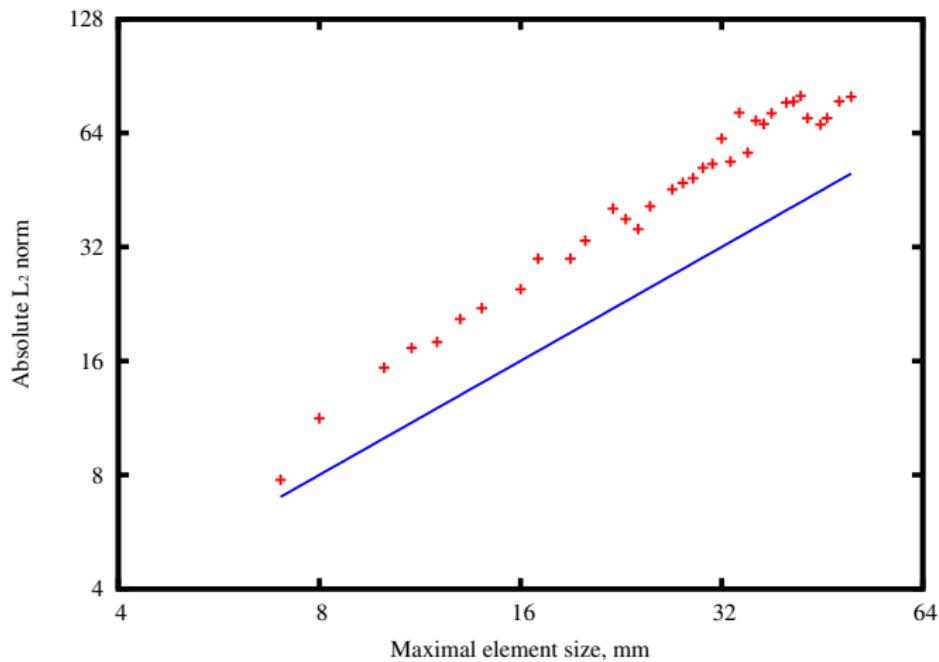
кожа – 1 мм



гель – 2 мм, медь – 0.5 мм

Экспериментальный анализ сходимости

Последовательность неструктурированных сеток



Экспериментальный анализ сходимости

Последовательность иерархически измельченных сеток

N_V	N_T	Memory, Mb	N_{it}	Time, s	L_2 -norm
2032	9359	7.16	13	0.02	1.24E-03
14221	74872	37.3	23	0.18	9.31E-04
106509	598976	299.1	58	3.70	5.07E-04
824777	4791808	2437.5	127	68.55	1.53E-04
6492497	38334464	20015.3	353	2634.15	—

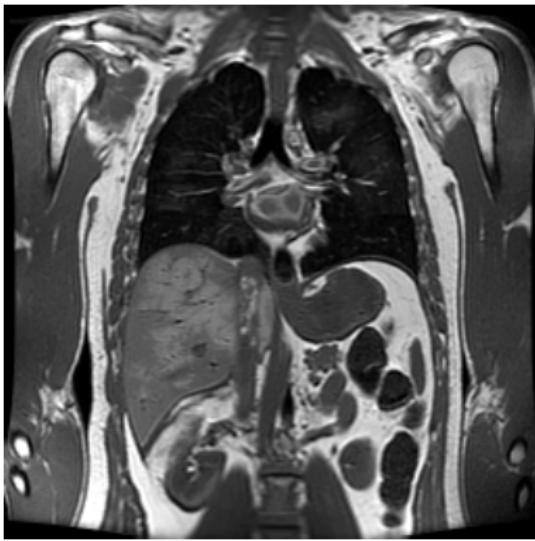
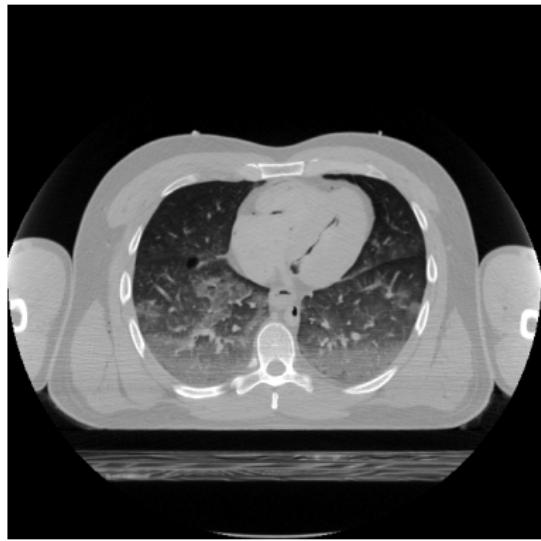
Асимптотический второй порядок сходимости

Visible Human Project

Visible Human Project

U.S. National Library of Medicine

www.nlm.nih.gov/research/visible

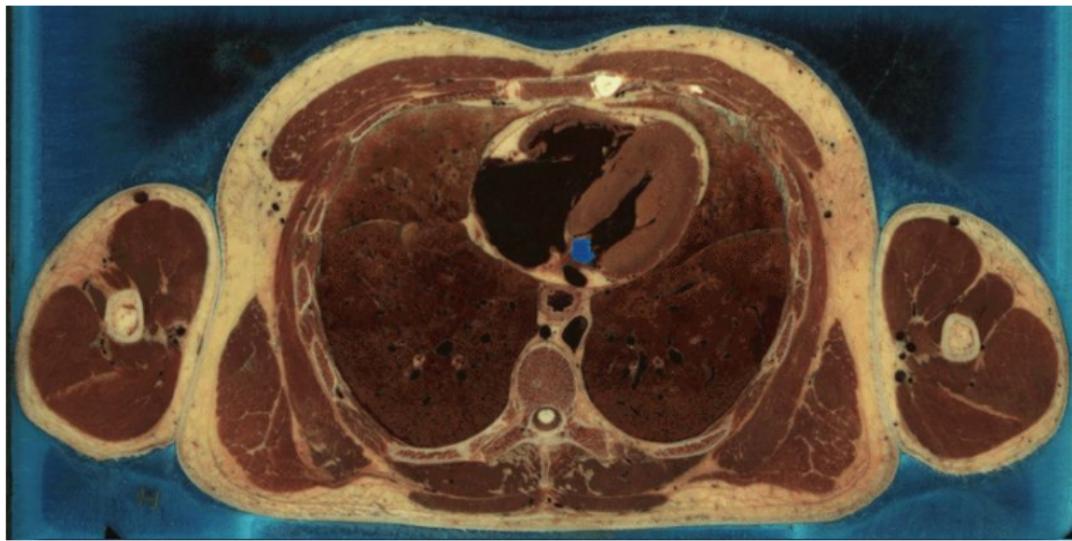


Visible Human Project

Visible Human Project

U.S. National Library of Medicine

www.nlm.nih.gov/research/visible

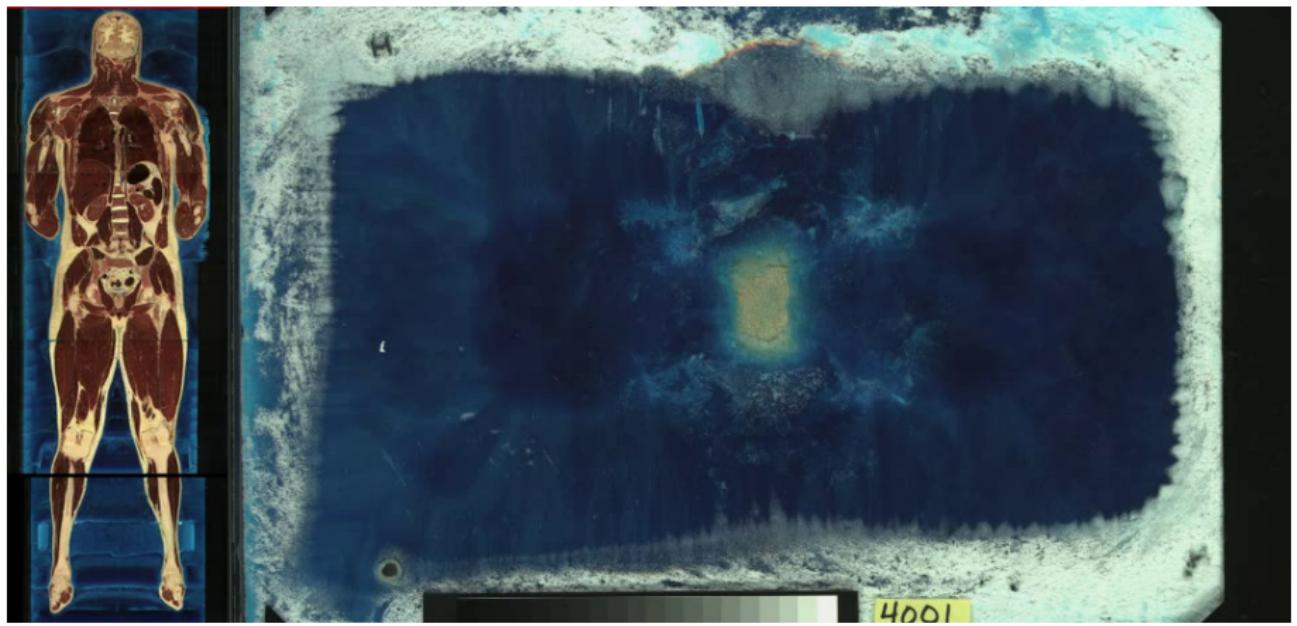


Visible Human Project

Visible Human Project

U.S. National Library of Medicine

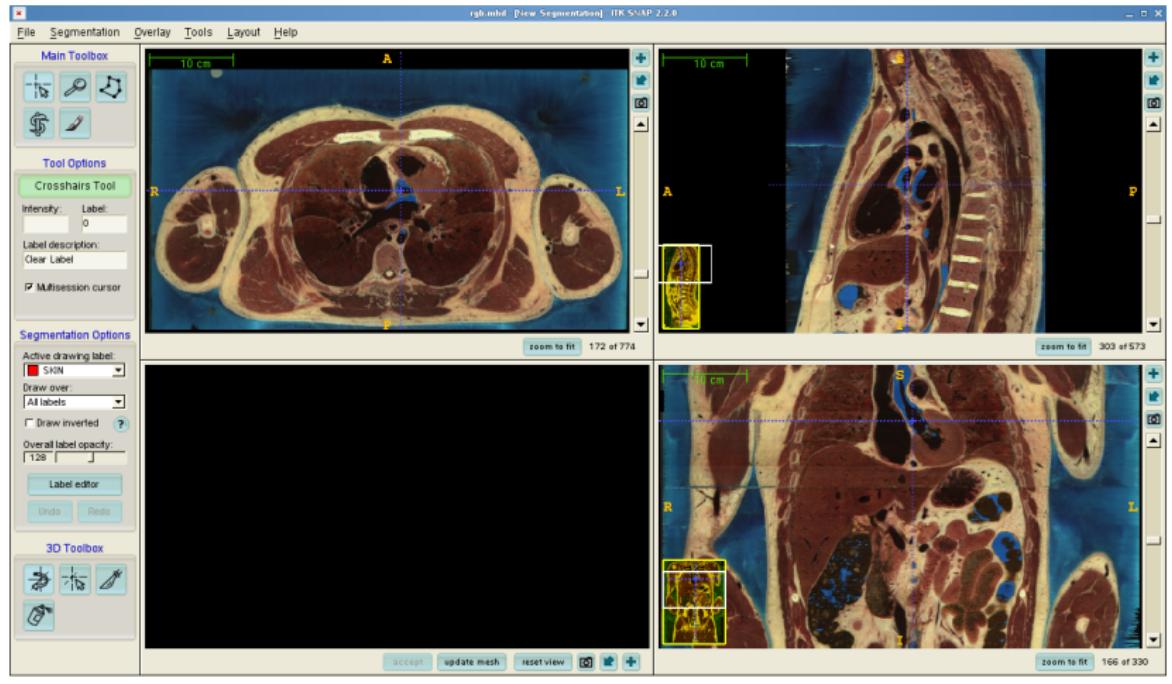
www.nlm.nih.gov/research/visible



ITK-SNAP software

ITK-SNAP (www.itksnap.org)

Free software for Visualization and Segmentation



Manual segmentation

Semi-automatic tissue segmentation

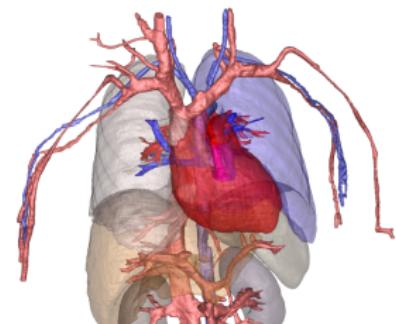
Fix shapes, fill hollow spaces, smooth boundaries, ...



High resolution segmented model of VHP torso



$567 \times 305 \times 843$ voxels
 $1 \times 1 \times 1$ mm
26 organs and tissues

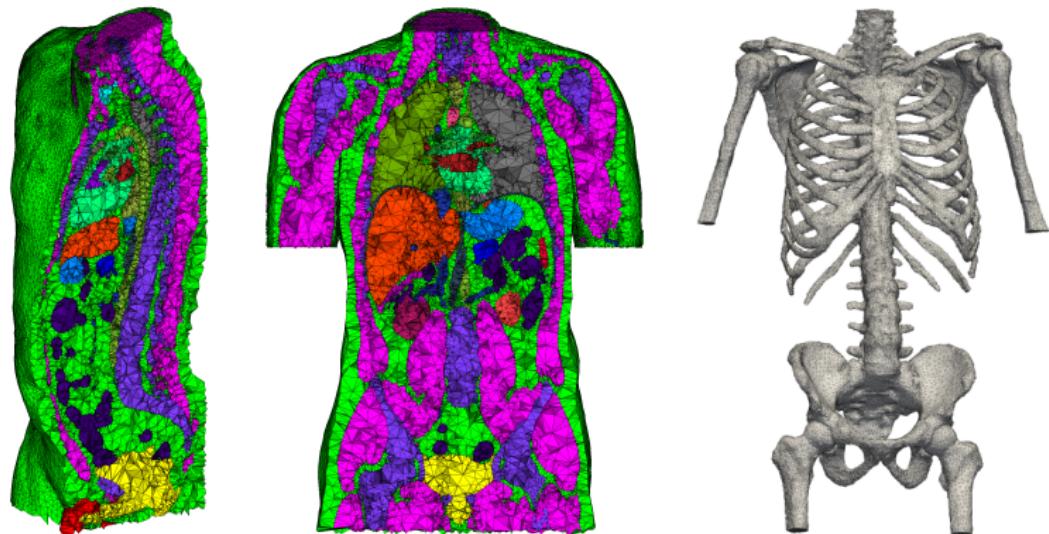


Total 146m voxels, 68m material voxels



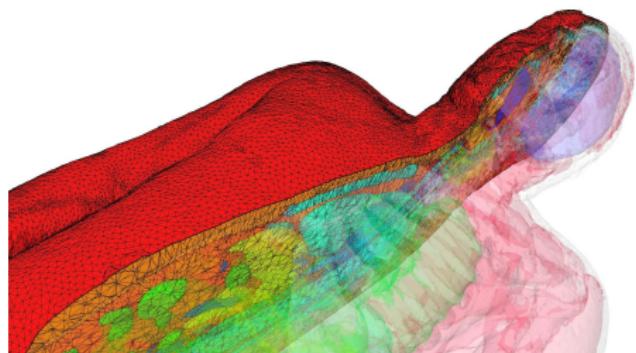
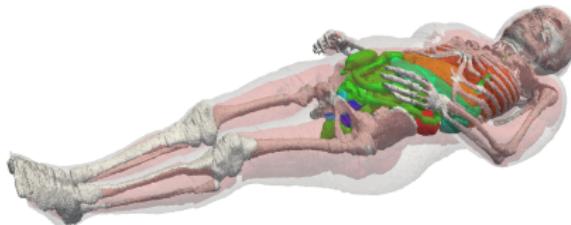
Unstructured tetrahedral meshes

CGAL Mesh (www.cgal.org) – Delaunay mesh generation
Ani3D (sf.net/projects/ani3d) – mesh cosmetics

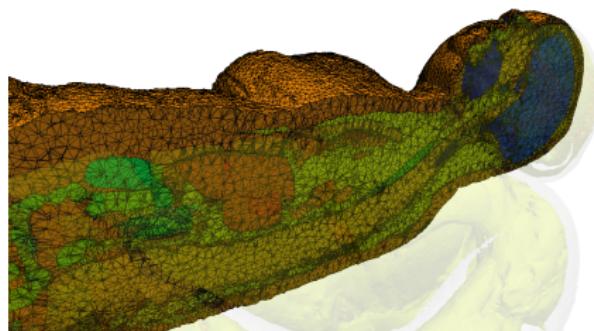


413 508 vertices, 2 315 329 tetraedra, 84 430 boundary faces

Full body male and female models



VHP-Man

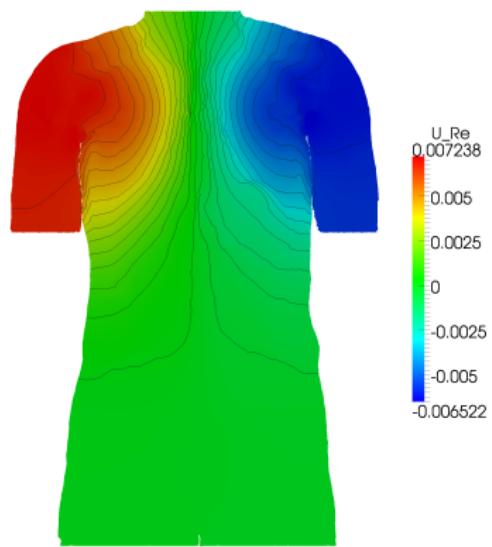
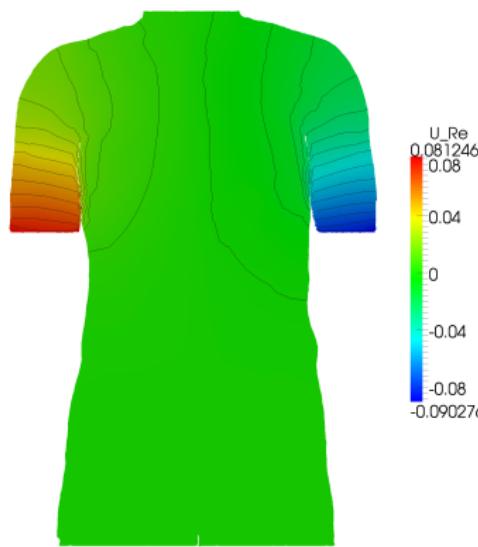


VHP-Woman

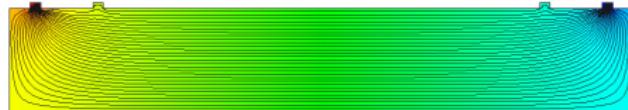
3.3 – 3.5m tetraedra

Численное решение

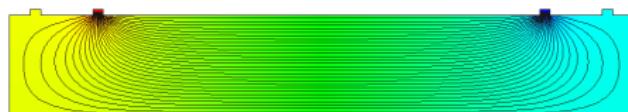
P1 FEM из пакета Ani3D (GMRes + ILU2 solver)



Функция чувствительности



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



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



функция чувствительности

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

$$\Delta U = \int_V S(x, y, z) \Delta \rho(x, y, z) dv$$

Анализ чувствительности

Токовые электроды



Анализ чувствительности

Обратное поле для потенциальных электродов



Анализ чувствительности

Функция чувствительности



Мониторинг гидратации легких



Выводы

- Разработана и проанализирована численная схема моделирования биоимпедансных измерений
- Построены высокоразрешающие 3D сегментированные и конечно-элементные модели тела человека
- Показана высокая чувствительность результатов измерений в интересующих участках тела для стандартных электродных конфигураций
- Модели будут использованы для разработки новых методик биоимпедансных измерений
- Модели могут быть использованы для расчетов влияния других физических полей на организм человека