

50 лет

1961

29 декабря

2011



Вычислительная электрофизиология сердца. От математического моделирования к клинической практике.

Калинин А.В.¹, Калинин В.В.²

¹ Институт проблем передачи информации им. А. А. Харкевича РАН

² Научный центр сердечно-сосудистой хирургии им. А. Н. Бакулева РАМН

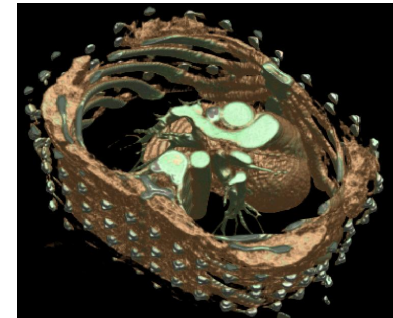
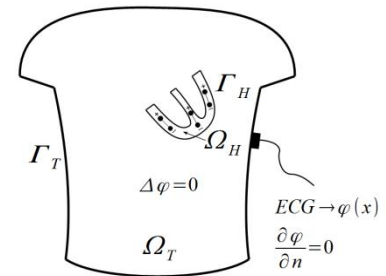


Вычислительная электрофизиология сердца

Вычислительная электрофизиология сердца –
направление электрофизиологии сердца,
характеризующееся математической формулировкой
электрофизиологических проблем и их решением
методами вычислительной математики при помощи
вычислительной техники.

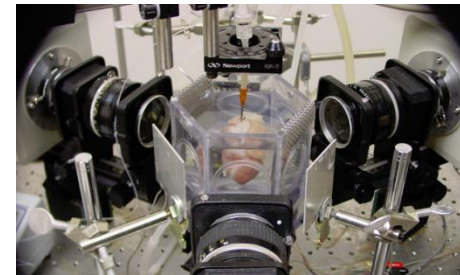
Предпосылки возникновения вычислительной электрофизиологии сердца

1. Описание электрофизиологических процессов сердца на классическом математическом языке дифференциальных уравнений в частных производных (бидоменная теория).
2. Возможность получения индивидуальной анатомии сердца высокого разрешения неинвазивным путем (КТ, МРТ).
3. Развитие программирования и вычислительной техники, снижение стоимости машинных вычислений.



Предпосылки возникновения вычислительной электрофизиологии сердца

4. Создание экспериментальных методов исследования (оптическое картирование, двумерные клеточные культуры и др.) , позволивших точно измерять электрофизиологические переменные.
5. Развитие новых методов лечения сердечных аритмий (катетерная абляция, имплантируемые устройства, генно-инженерная терапия, новые классы лекарственных препаратов), обеспечивших «спрос» на электрофизиологические результаты.



Основные задачи вычислительной электрофизиологии сердца

1. Исследование электрофизиологических процессов сердца в норме и патологии.
2. Изучение свойств электрического поля сердца и его связи с электрофизиологическими процессами (теория электрокардиографии).
3. Изучение влияния внешнего электрического поля на электрофизиологические процессы (теория электрокардиостимуляции и дефибрилляции).

Приложения вычислительной электрофизиологии сердца

Основные приложения:

1. Изучение механизмов сердечных аритмий.
2. Разработка методов неинвазивной диагностики сердечных аритмий.
3. Разработка методов лечения сердечных аритмий.

Интересные направления:

1. Создание методов низкоэнергетической дефибрилляции.
2. Проектирование биологических пейсмекеров и дефибрилляторов.
3. Проектирование новых антиаритмических препаратов.



История развития электрофизиологии сердца

Огюст Уоллер и бульдог Джимми



Огюст Д. Уоллер
1856-1921

В 1887 году английский физиолог Огюст Уоллер обнаружил, что измерение биопотенциалов сердца возможно с помощью электродов, наложенных на поверхность тела. Большинство экспериментов сначала было проведено на его любимом бульдоге Джимми.

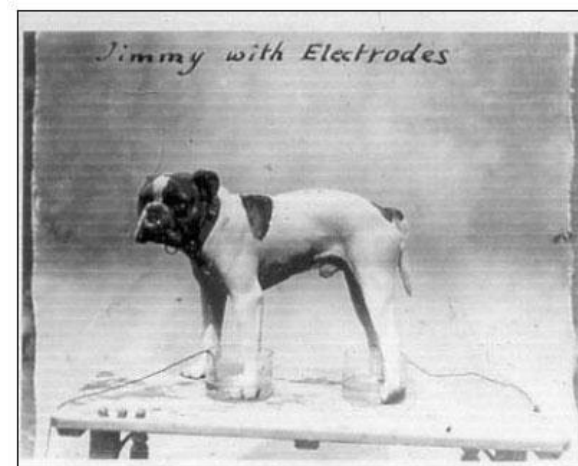


Fig. 3: Waller's dog, Jimmy, connected for electrogram with feet in saline.

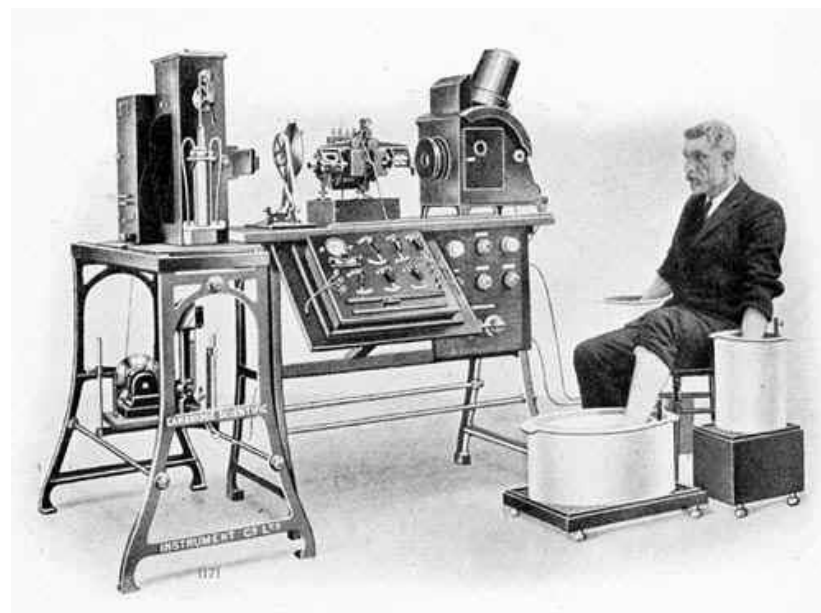
Вильям Эйнтховен



W. Einthoven

Вильям Эйнтховен
1860-1927

В 1903 Вильям Эйнтховен сконструировал первый электрокардиограф на основе струнного гальванометра. Электрокардиограф Эйнтховена позволил детально, без искажений записать ЭКГ



Вильям Эйнтховен

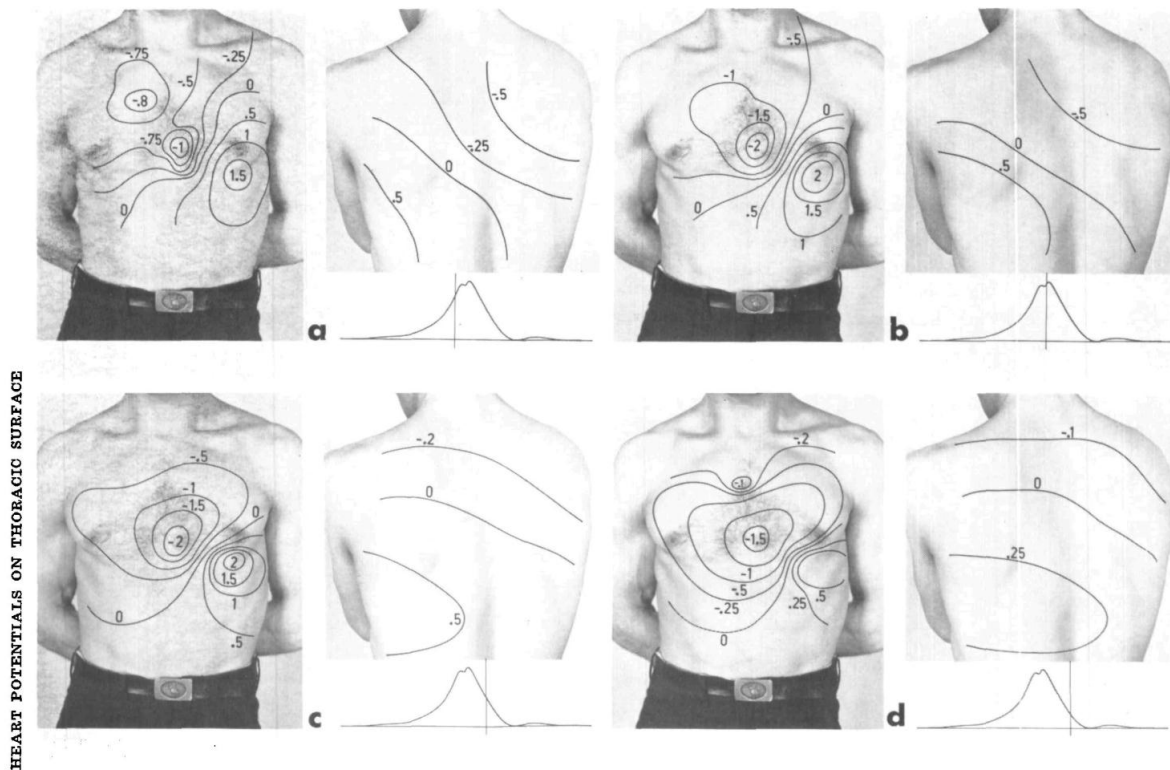


В лаборатории В. Эйнтховена, 1909

Бруно Таккарди

347

FIGURE 4



BRUNO TACCARDI

Distribution of Heart Potentials on the Thoracic Surface of Normal Human Subjects

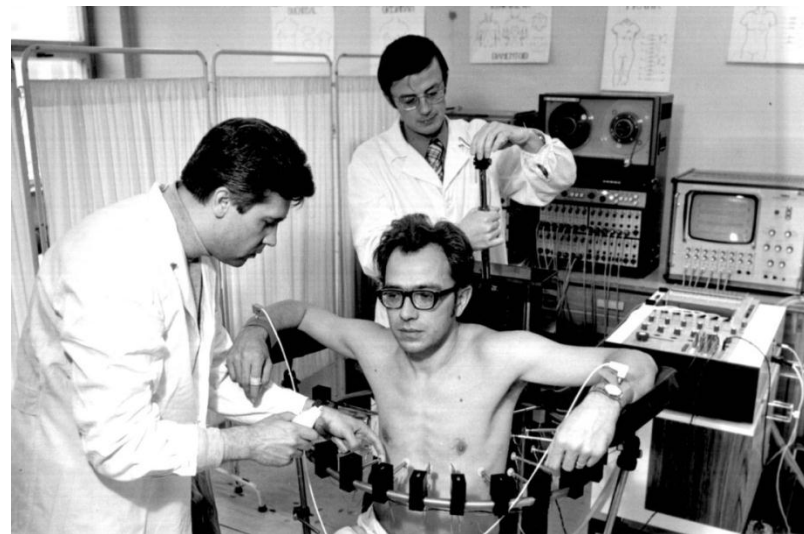
Circ. Res. 1963;12;341-352

Первые эксперименты в области вычислительной электрофизиологии сердца

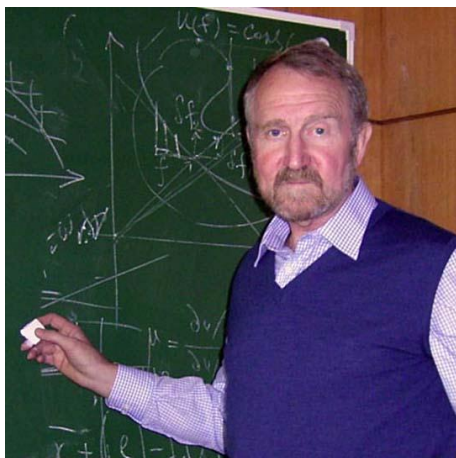


Л. И. Титомир, 1965.

Л. И. Титомир и другие.
Эксперименты в Институте
проблем измерений,
Словакия, 1970.

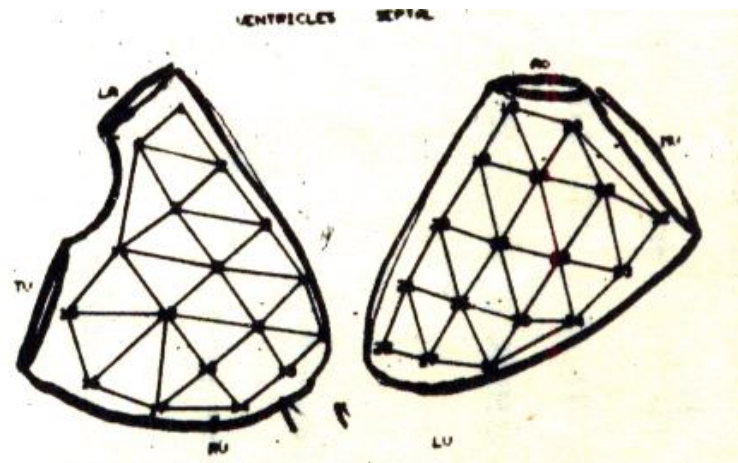


Первые результаты решения обратной задачи электрокардиографии

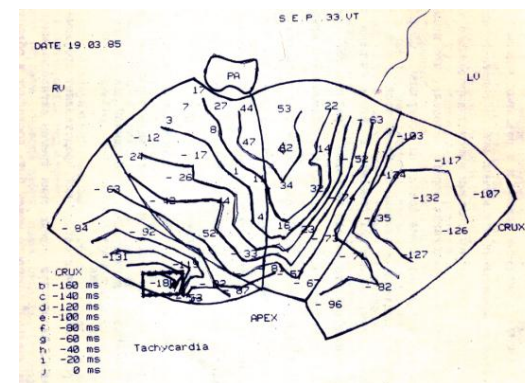
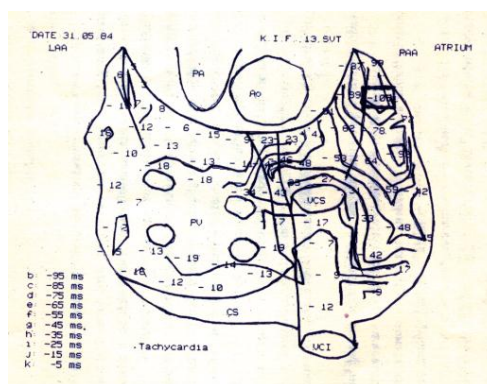


В. В. Шакин

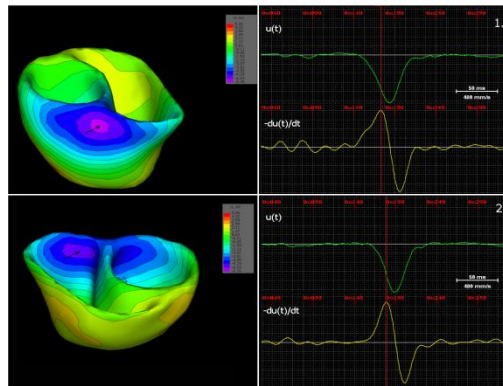
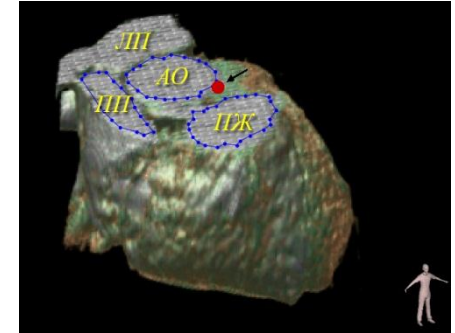
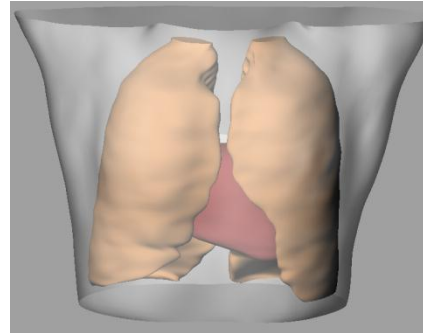
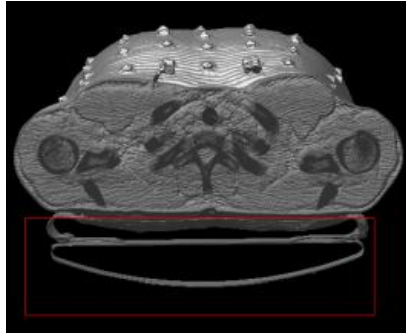
18.03.1941 - 09.06.2005



Результаты
1981 года

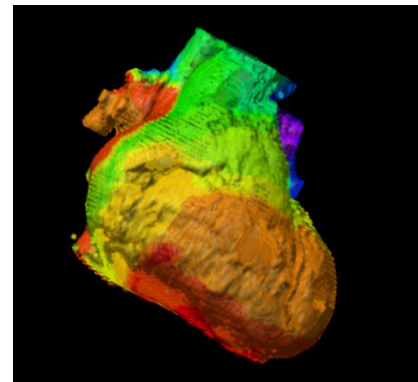


Современные результаты решения обратной задачи электрокардиографии



а)

б)

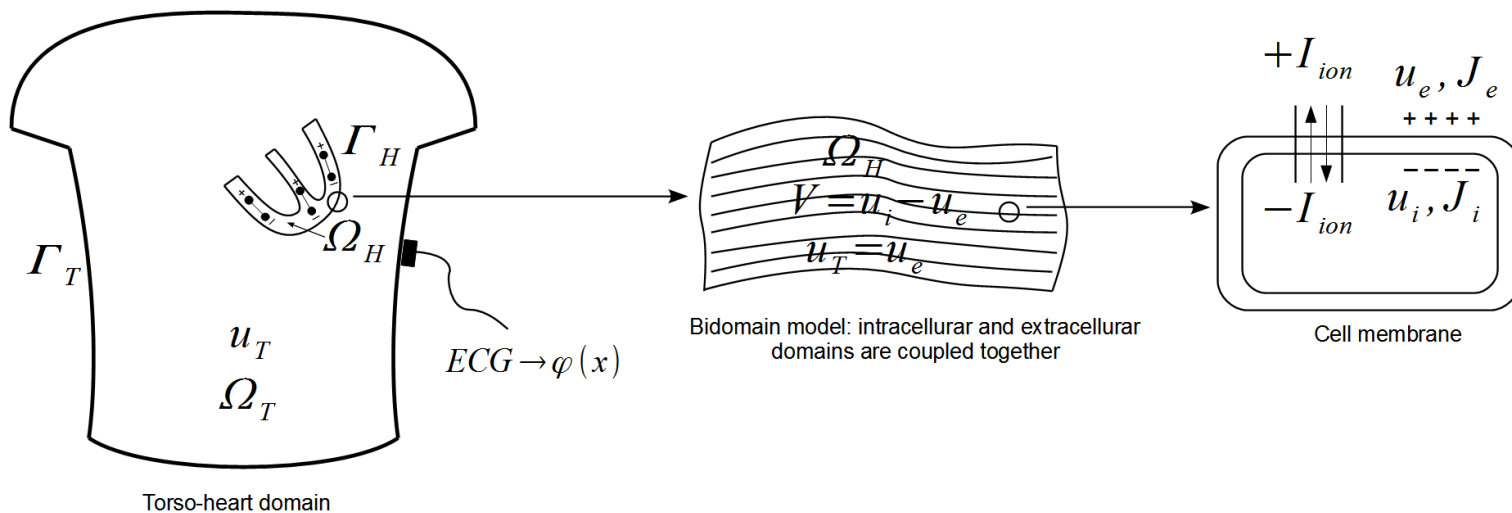


Результаты 2010 года,
совместная работа ИППИ им. Харкевича, МГУ им. Ломоносова, НЦ ССХ им. Бакулева



Математические модели

Бидоменная модель



$$\frac{\partial V}{\partial t} - \nabla(\sigma_i \nabla u_i) + I_{ion} = 0, \quad x \in \Omega_H, \quad (1)$$

$$\nabla(\sigma_i \nabla u_i + \sigma_e \nabla u_e) = 0, \quad x \in \Omega_H, \quad (2)$$

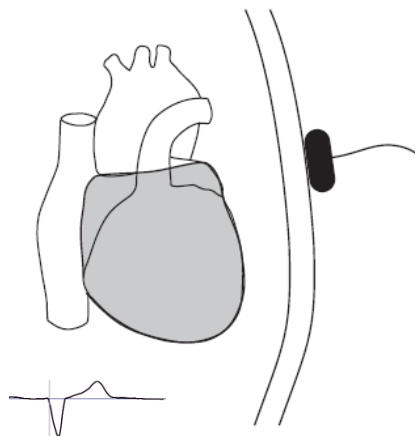
$$\nabla(\sigma_T \nabla u_T) = 0, \quad x \in \Omega_T \quad (3)$$

$$u_e = u_T, \quad x \in \Omega, \quad (4)$$

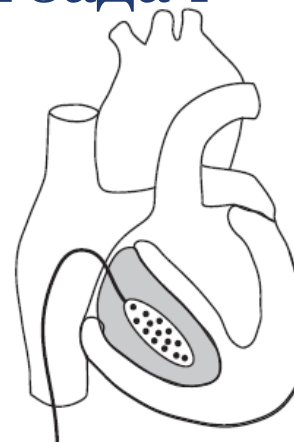
$$\mathbf{n}(\sigma_i \nabla u_i) = 0, \quad x \in \partial\Omega_H, \quad (5)$$

$$\mathbf{n}(\sigma_T \nabla u_T) = 0, \quad x \in \partial\Gamma_T. \quad (6)$$

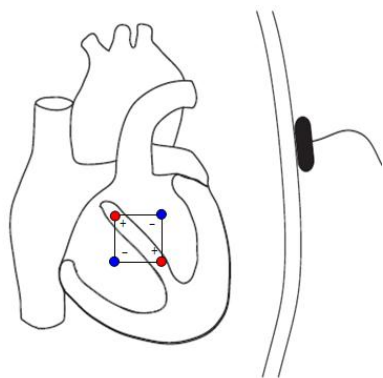
Различные постановки обратных задач



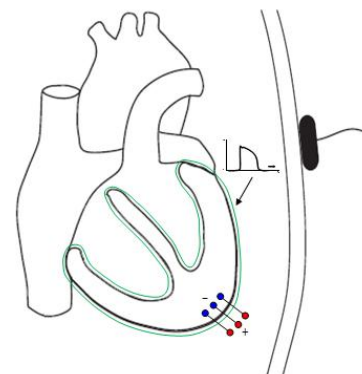
а) В терминах эпикардиальных потенциалов



б) В терминах эндокардиальных потенциалов



в) В терминах источников

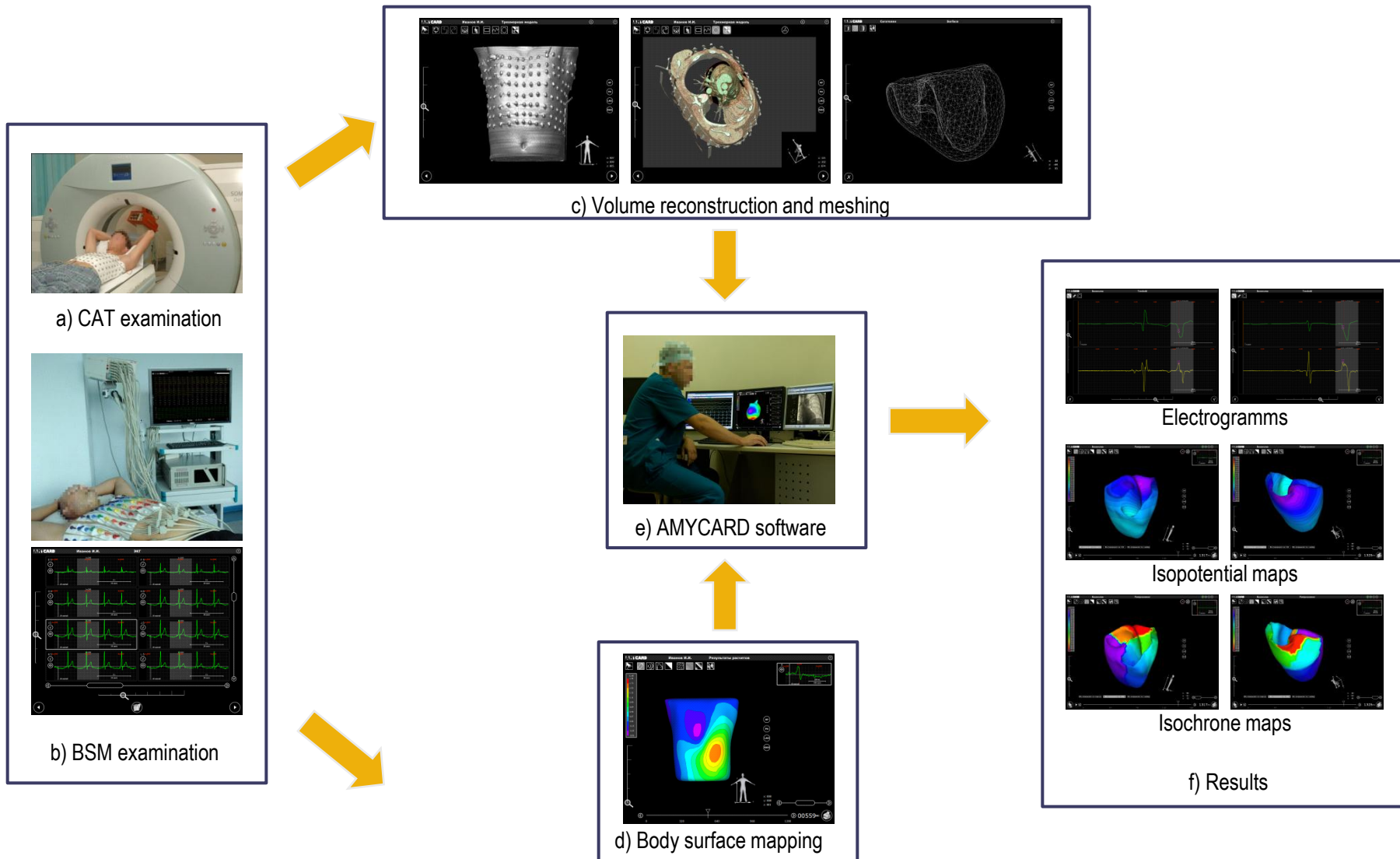


в) В терминах поверхностного потенциала действия

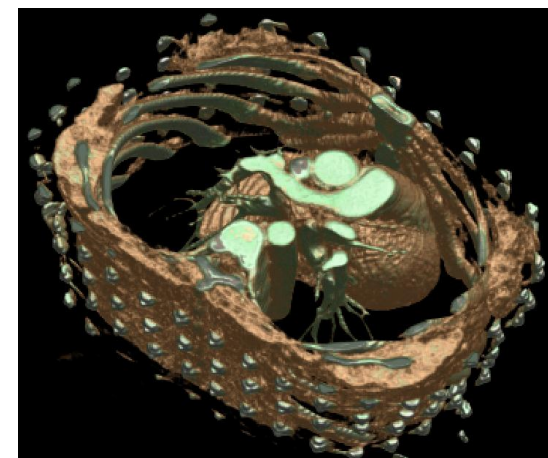
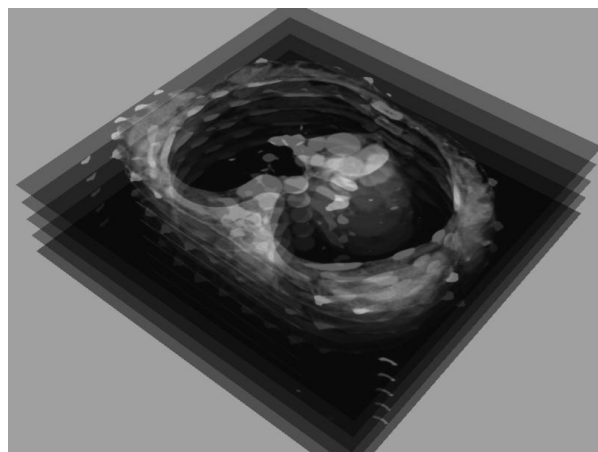
Клиническая практика

Неинвазивное электрофизиологическое исследование сердца на основе решения обратной задачи в терминах эпикардальных и эндокардиальных потенциалов

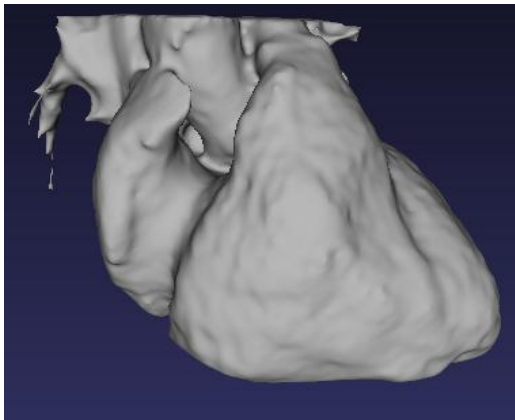
Схема исследования



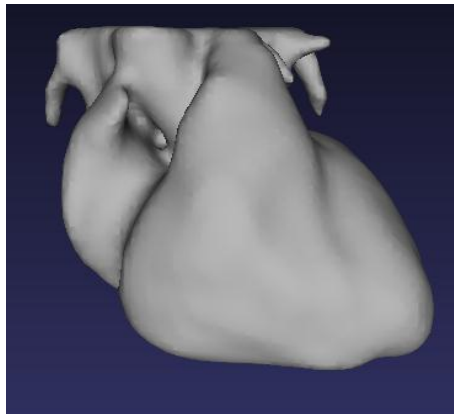
Методы получения индивидуальной анатомии



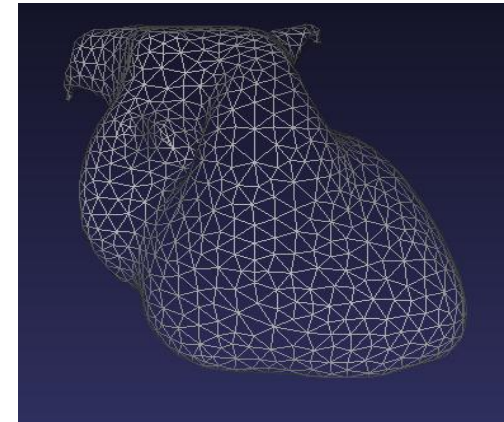
Построение расчетных сеток



1. Initial grid
350 000 elements



2. Optimized grid
20 000 elements



3. Grid for the numerical
calculations
5 000 elements

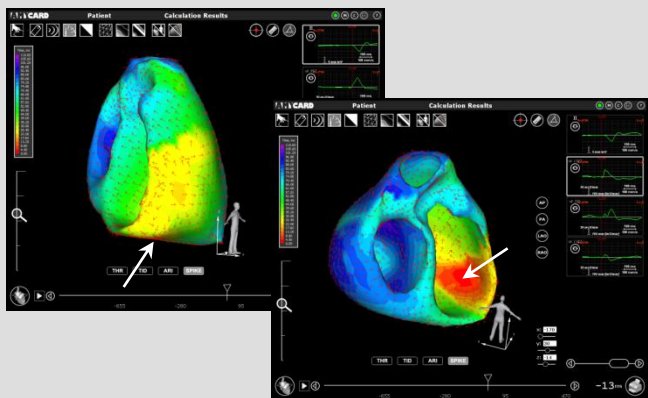
Экраны графического пользовательского интерфейса

The screenshot displays the graphical user interface of the ECG CARD software, organized into six main panels:

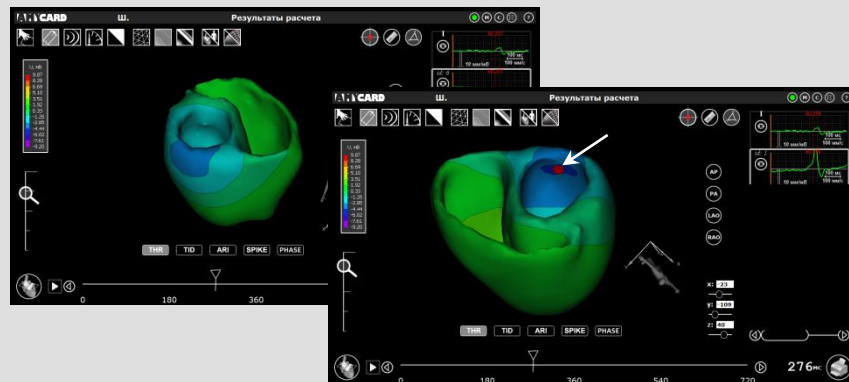
- ЭКГ (ECG):** Shows a grid of ECG waveforms for multiple leads (I, II, III, aVR, aVL, aVF, V1, V2, V3, V4, V5, V6) with a time axis and zoom controls.
- Томограмма (Tomogram):** Displays a cross-sectional CT scan of the chest with a control panel for image manipulation.
- Объемная реконструкция (Volume reconstruction):** Shows a 3D volume reconstruction of the heart and surrounding structures.
- Привязка электродов (Electrode attachment):** Shows a 3D model of the heart with colored dots representing electrode positions and a control panel for attachment.
- Поверхность (Surface):** Shows a 3D wireframe surface reconstruction of the heart.
- Результаты расчета (Calculation results):** Shows a 3D surface reconstruction with a color-coded map and a control panel for calculation results.

The interface includes a top navigation bar with the logo, patient name, and study name, and a bottom navigation bar with a close button.

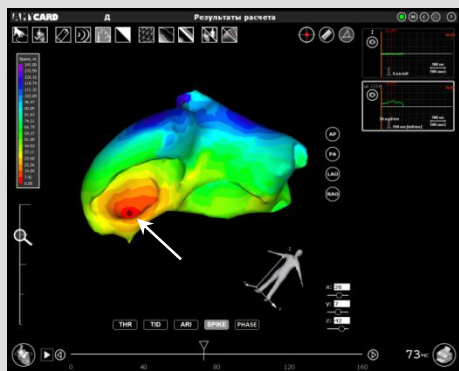
Клиническое применение



Ventricular Ectopic Focus



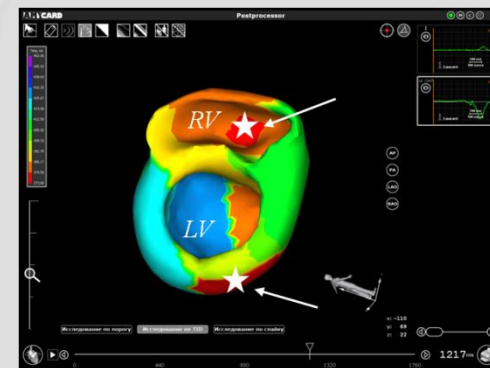
WPW



Atrial Ectopic Focus

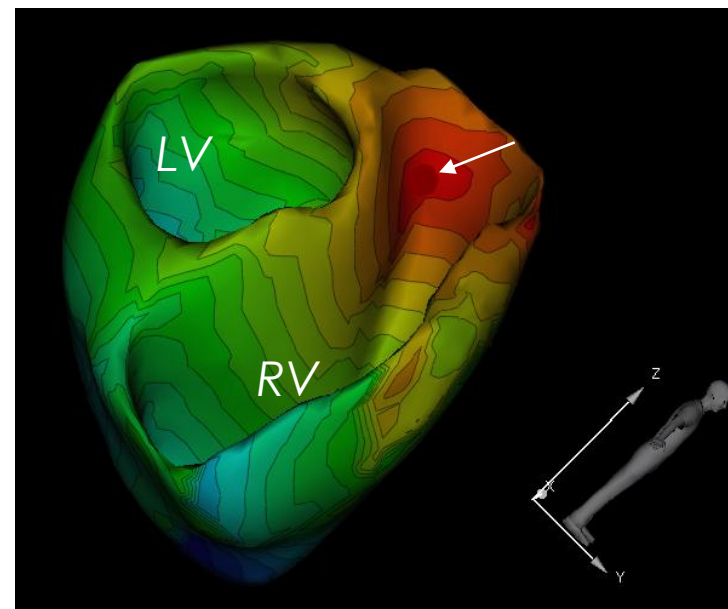
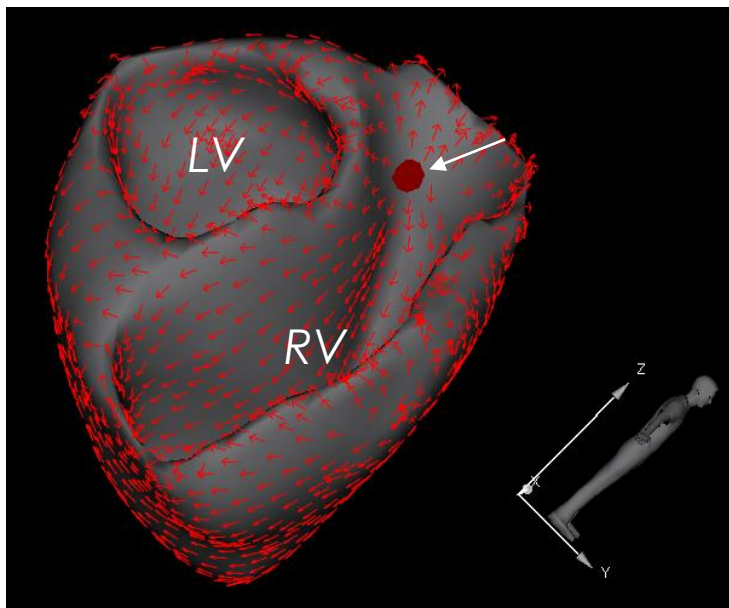


Atrial Flutter

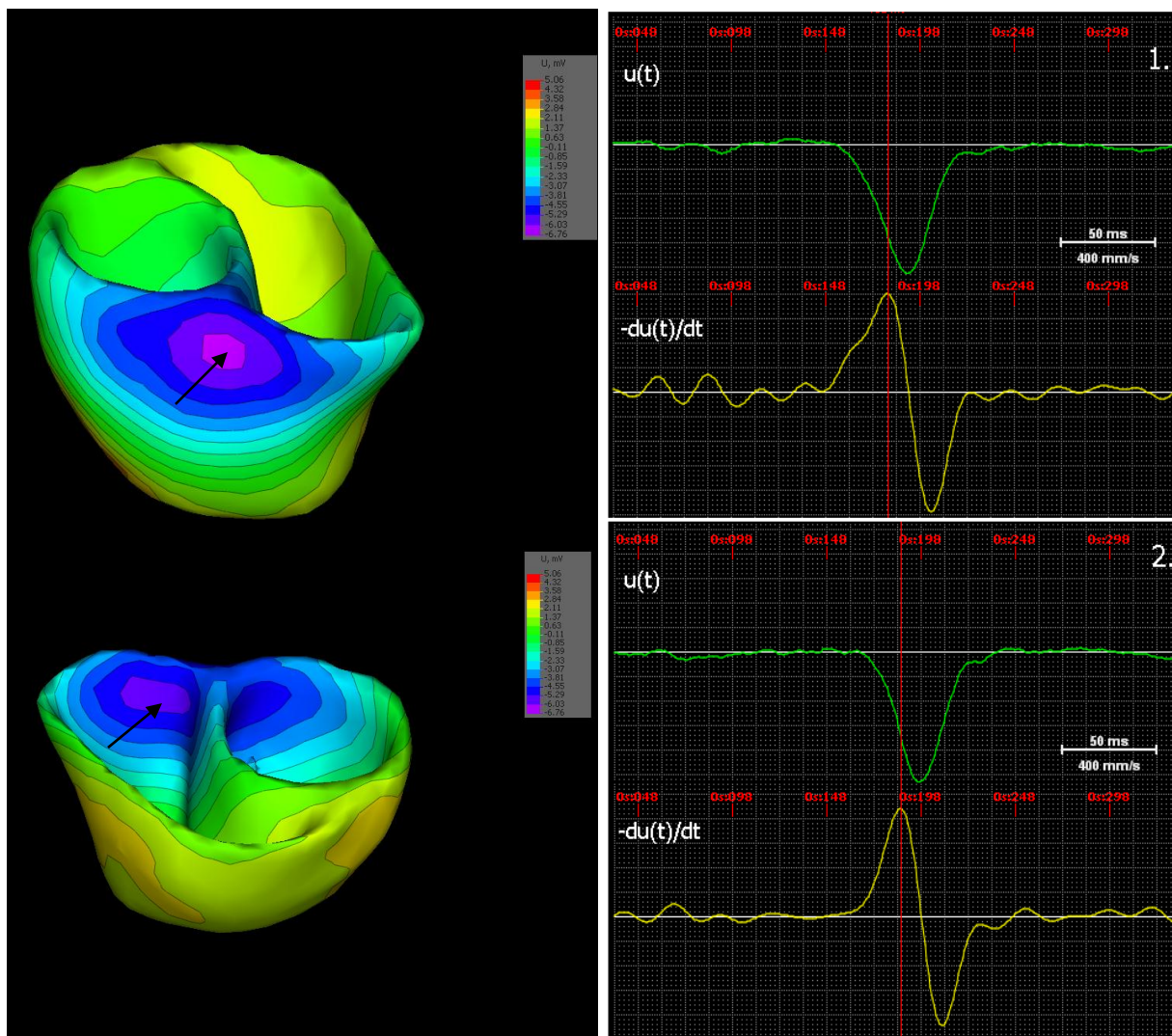


CRT

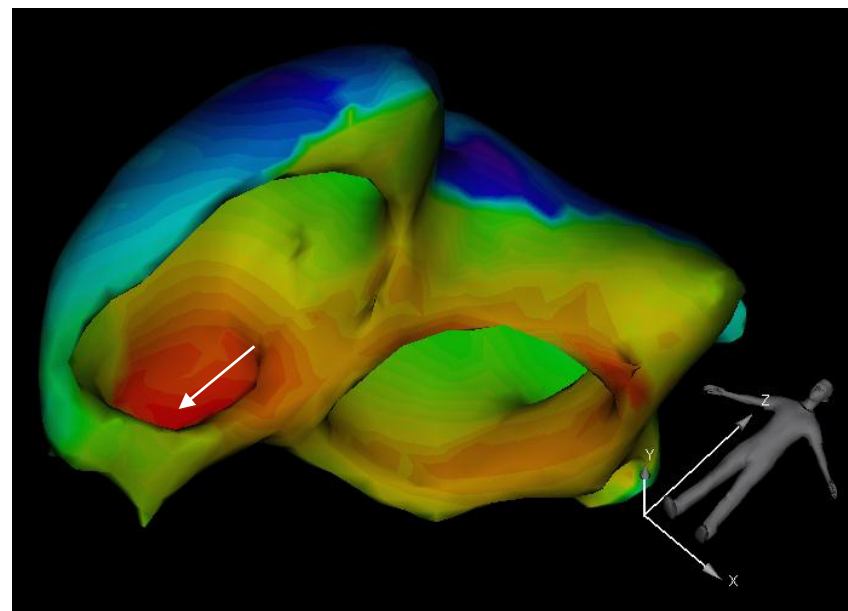
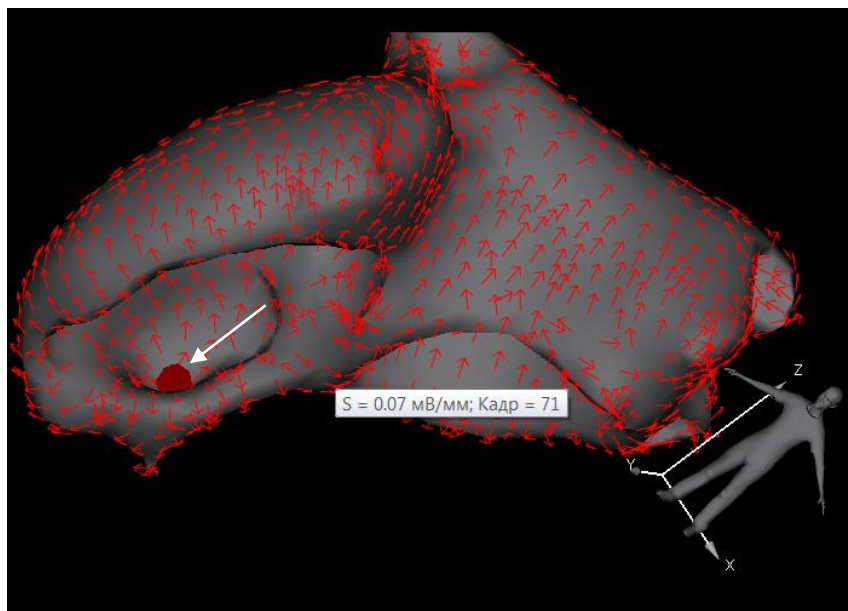
Желудочковая фокусная аритмия



Синдром WPW



Предсердная фокусная аритмия



Предсердная аритмия по типу reentry

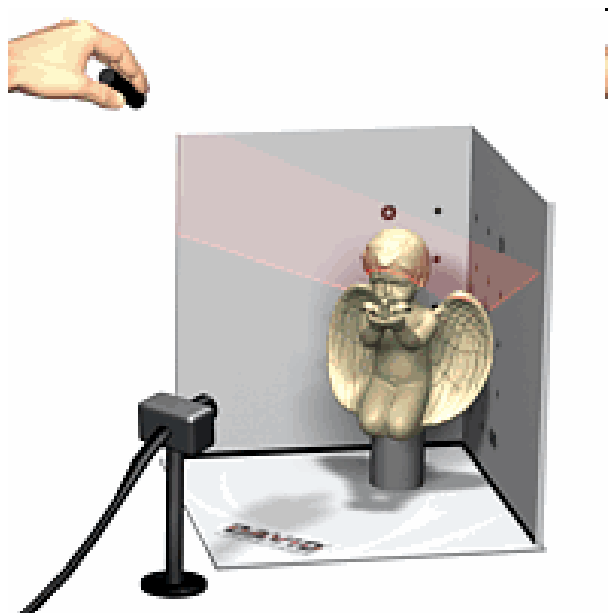


Перспективные разработки

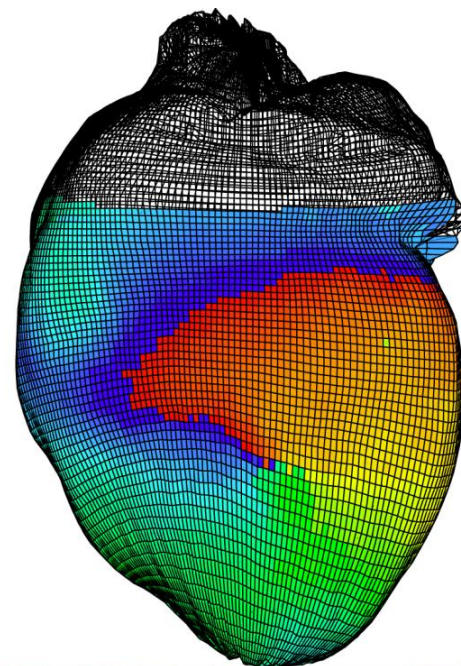
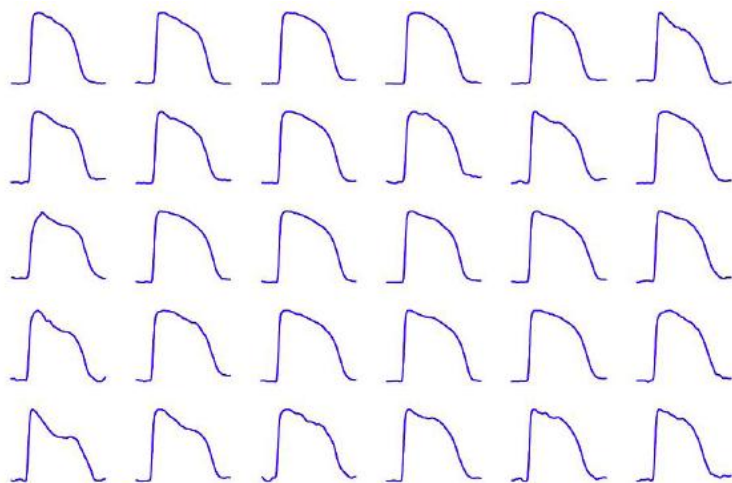
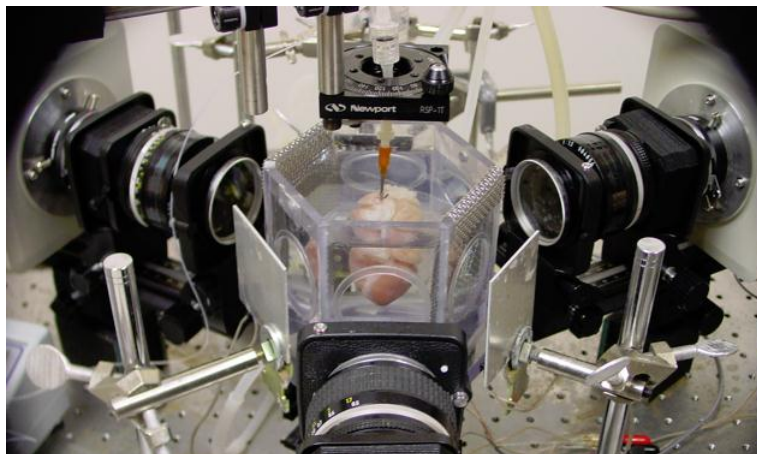
Вычислительная реконструкция и трехмерная визуализации геометрии и внутренних свойств объектов на основе оптической информации

Методы получения индивидуальной анатомии

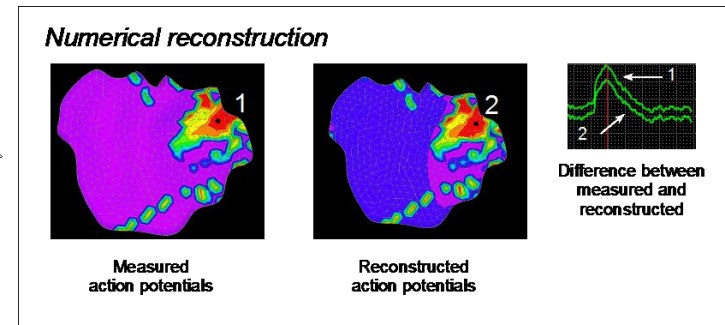
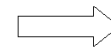
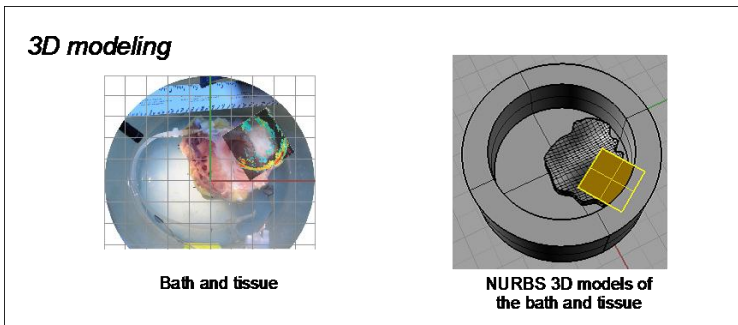
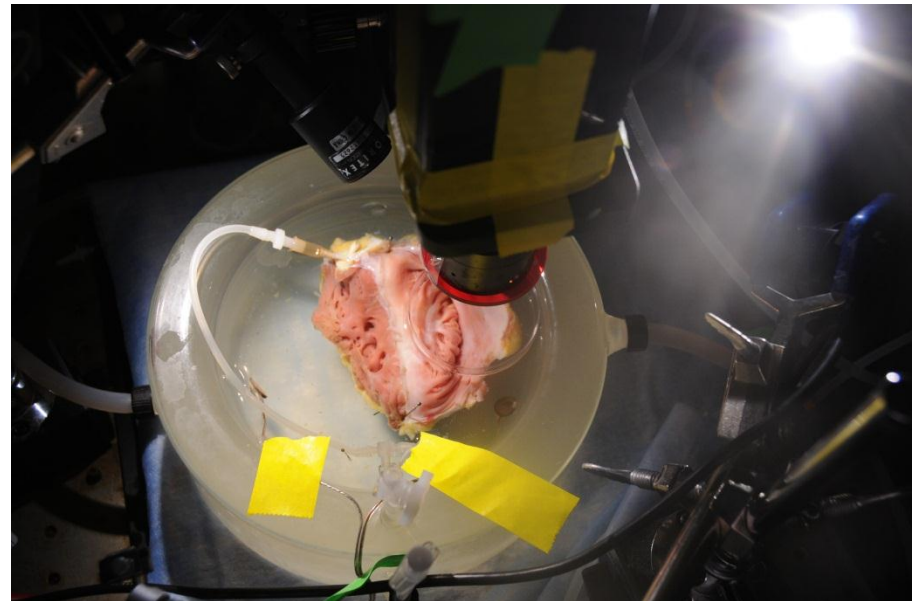
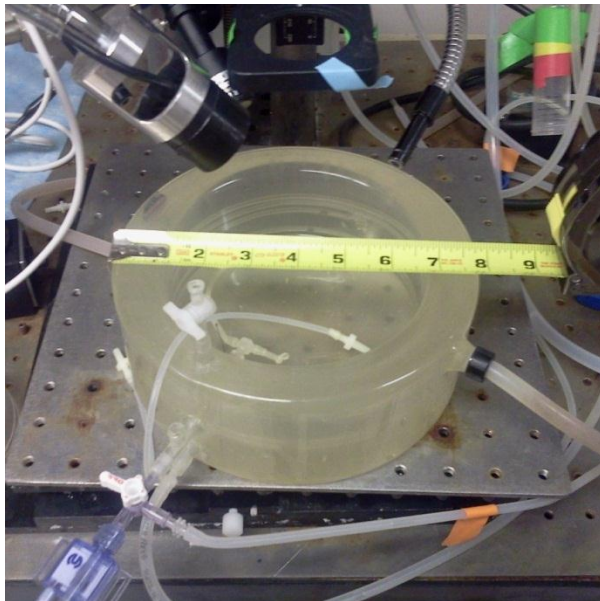
Трехмерное лазерное сканирование



Регистрация потенциала действия сердца



Верификация алгоритмов численной реконструкции потенциала действия сердца



Спасибо за внимание!

