

Российская академия наук

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ИНСТИТУТ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ МАТЕМАТИКИ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
(ИВМ РАН)

УДК 519.6

№ госрегистрации

Инв.№

УТВЕРЖДАЮ
Директор ИВМ РАН
чл.-корр.

_____ Е.Е.Тыртышников

«___» _____ 2012 г.

Государственный контракт от «01» декабря 2010 г. № 14.740.11.0844
Шифр «2010-1.1-400-150-053»

ОТЧЕТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

В рамках федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры
инновационной России» на 2009-2013 годы

по теме:

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ ЭЛЕКТРОИМПЕДАНСНОЙ ДИАГНОСТИКИ
И МОНИТОРИНГА СЕРДЕЧНО-СОСУДИСТЫХ И РЕСПИРАТОРНЫХ ЗАБОЛЕВАНИЙ
(промежуточный, этап № 4)

Наименование этапа: «Разработка реалистичных геометрических моделей всего тела,
построение расчетных сеток»

Руководитель НИР, зам. директора ИВМ

РАН, д. ф.-м. н., доцент

Ю. В. Василевский

подпись, дата

Москва 2012

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководитель темы, д.ф.-м.н., зам. директора ИВМ РАН	<hr/> подпись, дата	Ю.В. Василевский (введение, заключение)
Исполнители темы д.ф.-м.н., профессор МГУ им. М.В. Ломоносова	<hr/> подпись, дата	М.А. Ольшанский (раздел 2)
чл.-корр. РАН, директор ИВМ РАН	<hr/> подпись, дата	Е.Е. Тыртышников (раздел 2)
ген. директор НТЦ «Медасс»	<hr/> подпись, дата	Д.В. Николаев (раздел 1, 3)
к.ф.-м.н., с.н.с. ИВМ РАН	<hr/> подпись, дата	С.Г. Руднев (раздел 1, 3)
к.ф.-м.н., с.н.с. ИВМ РАН	<hr/> подпись, дата	В.Н. Чугунов (раздел 2, 4)
к.ф.-м.н., н.с. ИВМ РАН	<hr/> подпись, дата	И.В. Капырин (раздел 2)
к.ф.-м.н., доцент МФТИ	<hr/> подпись, дата	С.С. Симаков (раздел 1,3)
к.ф.-м.н., м.н.с. ИБРАЭ РАН	<hr/> подпись, дата	В.Ю. Саламатова (разделы 1,3)
к.ф.-м.н., н.с. ИВМ РАН	<hr/> подпись, дата	А.А. Данилов (разделы 2,4)
к.ф.-м.н., н.с. ИВМ РАН	<hr/> подпись, дата	К.Д. Никитин (разделы 2,4)

аспирант ИВМ РАН	<hr/>	А.Ю. Чернышенко (раздел 1)
	подпись, дата	
аспирант ИВМ РАН	<hr/>	К.М. Терехов (раздел 3)
	подпись, дата	
аспирант ИВМ РАН	<hr/>	Ю.А. Иванов (раздел 3)
	подпись, дата	
аспирантка МГУ им. М.В. Ломоносова	<hr/>	Т.К. Добросердова (раздел 3)
	подпись, дата	
аспирант МГУ им. М.В. Ломоносова	<hr/>	А.С. Галинов (раздел 1)
	подпись, дата	
студентка МГУ им. М.В. Ломоносова	<hr/>	А.С. Юрова (раздел 1)
	подпись, дата	
студент МГУ им. М.В. Ломоносова	<hr/>	А.М. Головкин (раздел 2, 4)
	подпись, дата	
студент МГУ им. М.В. Ломоносова	<hr/>	Г.Н. Лутидзе (раздел 1, 3)
	подпись, дата	
студент МФТИ	<hr/>	В.К. Крамаренко (раздел 2, 4)
	подпись, дата	
студент МГУ им. М.В. Ломоносова	<hr/>	М.Д. Подкорытов (раздел 2)
	подпись, дата	
студент МГУ им. М.В. Ломоносова	<hr/>	Р.А. Прямоносцев (раздел 4)
	подпись, дата	
Нормоконтролер вед. специалист ИВМ РАН	<hr/>	А.А. Загуменных
	подпись, дата	

Реферат

Отчет 17 с., 1 ч., 9 рис., 8 источников.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, СЕГМЕНТИРОВАНИЕ
МЕДИЦИНСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ, РАСЧЕТНЫЕ СЕТКИ.

Проведена работа по созданию высокоразрешающих геометрических моделей для тел мужчины и женщины. Построены адаптивные расчетные сетки.

Кратко представлены особенности технологической цепочки создания сеток, описаны источники исходных данных, представлены результаты – геометрические модели и расчетные сетки для тела мужчины.

По аналогии с моделью мужчины была создана геометрическая модель и построена расчетная сетка для тела женщины. В работе принял участие большой коллектив молодых ученых, студентов и аспирантов. Получены практические навыки работы с большими объемами данных и расчетными сетками.

Полученные результаты будут использованы на следующем завершающем этапе проекта.

Оглавление

Реферат	4
Оглавление	5
Введение.....	6
1. Построение реалистичной геометрической модели всего тела мужчины на основе ранее разработанной модели туловища	7
1.1. Проект Visible Human	7
1.2. Сегментирование изображений в ИТК-SNAP	8
2. Построение пространственной расчетной сетки для реалистичной модели тела мужчины.....	11
3. Построение реалистичной геометрической модели тела женщины	12
4. Построение пространственной расчетной сетки для реалистичной модели тела женщины	14
Заключение.....	15
Список использованных источников	17

Введение

Биоимпедансный анализ состава тела человека применяется в медицине для характеристики гидратации тела, оценки жировой, мышечной массы и других значимых параметров состояния организма [1, 2]. Электропроводность органов и тканей различна, что позволяет оценивать состав тела человека с помощью измерений полного электрического сопротивления (импеданса) тела переменному току низкой интенсивности. Численное моделирование распределения электрического потенциала в неоднородной среде может быть использовано для обоснования применяемых методик измерений, основанных на предположении об упрощенной цилиндрической форме тела, и развития новых методов и электродных схем измерения.

В настоящей научно-исследовательской работе (в рамках ГК №14.740.11.084) предложены методы и алгоритмы численного моделирования биоимпедансных измерений с использованием неструктурированных сеток. Описаны основные этапы построения высокоразрешающей трехмерной геометрической модели тела человека и моделирования биоимпедансных измерений. Выполнены расчеты полей тока и потенциала для ряда схем измерений, применяемых в биоимпедансном анализе и реографии, проведен анализ результатов. Разработанные методы и алгоритмы, а также полученные результаты представлены в предыдущих промежуточных отчетах по проекту, а также в статье [3].

Четвертый этап настоящего проекта является по большей части техническим. Все используемые в работе методы и алгоритмы уже разработаны и реализованы на предыдущих этапах. Результатом этапа должны стать две расчетные сетки для мужчины и женщины.

Отчет состоит из четырех разделов. Первый раздел посвящен описанию исходных данных и процессу построения геометрической модели для тела мужчины.

Во втором разделе кратко представлены используемые алгоритмы для построения расчетных сеток и приводится результат построения сетки для тела мужчины.

В третьем и четвертом разделах приводятся аналогичные результаты построения геометрической модели и расчетной сетки для тела женщины.

1. Построение реалистичной геометрической модели всего тела мужчины на основе ранее разработанной модели туловища

1.1. *Проект Visible Human*

Проект Visible Human Project [4] был начат в 1986 году под эгидой правительства США с целью создания открытого архива цифровых изображений поперечных срезов тела человека, а также его МРТ и РКТ срезов. Первый набор данных был получен в 1994 году. С конца 90-х годов прошлого столетия и до настоящего времени полученные наборы данных для тел реальных мужчины и женщины широко используются как в образовательных целях (например, для изучения анатомии тела человека и виртуальной симуляции хирургических операций), так и в научных исследованиях (например, для развития методов и решения новых задач биомедицинской инженерии).

В работах настоящего проекта использованы данные проекта VHP, предоставленные Национальной медицинской библиотекой США (U.S. National Library of Medicine). Архив данных для тела мужчины представляет набор из 1871 фотографии поперечных срезов замороженного трупа мужчины вдоль длины тела с разрешением 0.33мм и расстоянием между срезами 1мм. Помимо фотографий также имеются КТ изображения высокого разрешения как обычного, так и замороженного трупа мужчины. Разрешение КТ снимков варьируется от 0.5мм до 1мм, интервалы между снимками составляют 1мм для замороженного трупа и меняются от 1мм до 5мм для обычного трупа. Для незамороженного трупа также доступны МРТ снимки с разрешением от 1мм до 2мм и расстоянием между снимками до 5мм. Примеры снимков представлены на Рисунке 1.

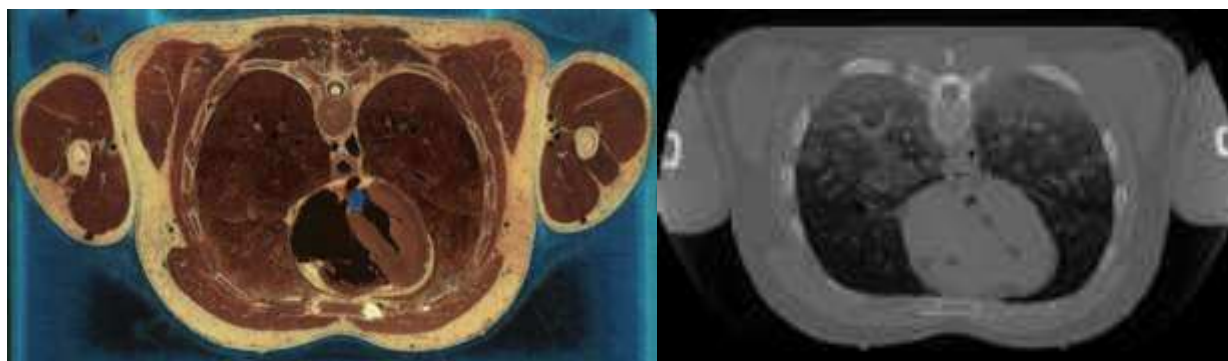


Рисунок 1 – Примеры цветного изображения и РКТ-среза тела мужчины.

Перед получением фотографий срезов замороженного тела труп был разрезан на несколько частей, что привело к появлению дефектов и сдвигов в трехмерном изображении. Полный объем набора данных составляет 37,5 Гб. Обработка такого объема данных потребует огромного количества оперативной памяти компьютера. Поэтому разрешение снимков было уменьшено до 1 мм за счёт осреднения блоков 3x3 в исходных снимках. Таким образом, рабочий массив данных имел размеры 575x333x1878 ячеек (вокселей), каждая из которых отвечает за объем 1 мм³ и содержит три цветовых компоненты (красный, зелёный и синий), размер массива составляет примерно 1 028 Мб.

Первым и основным этапом построения конечно-элементной модели туловища человека является обработка полученных изображений, а именно, сегментация – выделение основных частей и внутренних органов тела человека. Существенным моментом для реализации данного процесса и построения относительно корректных моделей является понимание анатомической структуры срезов, позволяющее идентифицировать интересующие элементы изображения.

1.2. Сегментирование изображений в ITK-SNAP

ITK-SNAP – это интерактивное приложение, которое позволяет просматривать трехмерные изображения, а также проводить обработку данных изображений (например, сегментирование интересующих областей) в ручном режиме и/или автоматическом с помощью нескольких различных методов, предлагаемых разработчиками. Приложение имеет простой и понятный интерфейс, что позволяет достаточно быстро начать продуктивно работать с данной программой.

Наиболее часто ITK-SNAP используется для работы с МРТ- и КТ-срезов. Окно приложения представляют собой набор из четырех окон, в трех из которых показываются три проекции исследуемой области, и в последнем – полученный после обработки изображений объем, см. Рисунок 2.



Рисунок 2 – Интерфейс программы ИТК-SNAP.

Результатом сегментации медицинских изображений при использовании ИТК-SNAP является трёхмерный массив целочисленных данных, в котором каждому вокселю ставится в соответствие номер органа, которому он принадлежит. Помимо сегментации внутренних органов, с помощью ИТК-SNAP задается положение различных электродов на исследуемых областях. Полученный в конечном итоге массив является первым и ключевым звеном в процессе построения расчетных сеток.

В качестве отправной точки на данном этапе использовалась сегментированная модель туловища мужчины, полученная в рамках 2-ого этапа ГК № 14.740.11.0844.

Модель туловища мужчины (см. Рисунок 3), полученная в результате сегментации и используемая для симуляции биоимпедансных измерений, состоит из следующих тканей и систем: висцеральный жир, мышцы, система кровеносных сосудов, желудочно-кишечный тракт, сердце, легкие, почки, селезенка, костная система (см. Рисунок 4).



Рисунок 3 – Модель туловища мужчины, полученная на основе проекта Visible Human.



Рисунок 4 – Внутренние органы сегментированной модели туловища.

Дальнейшая техническая работа по оконтуриванию срезов была проведена группой студентов и аспирантов. Каждый участник проекта получил свою выделенную часть тела и работал над ней, параллельно с другими участниками. Участки для сегментирования были подобраны так, чтобы минимизировать пересечения между исполнителями. После объединения всех сегментированных данных была проведена операция сглаживания сегментированного изображения. На завершающем этапе были проверены и исправлены некоторые замеченные неточности.

Итоговая сегментированная модель содержит 32 выделенных органа и ткани с физическим разрешением 1x1x1мм. Размеры сегментированного изображения составляют 575x333x1878мм.



Рисунок 5 – Внутренние органы сегментированной модели тела мужчины.

На Рисунке 5 представлена итоговая сегментированная модель тела мужчины.

2. Построение пространственной расчетной сетки для реалистичной модели тела мужчины

Для построения расчётных сеток в рамках этапа 2 ГК №14.740.11.084 было разработано программное обеспечение на основе библиотеки алгоритмов CGAL (www.cgal.org). Пакет CGAL включает алгоритмы построения неструктурированных тетраэдральных сеток при помощи метода измельчения триангуляции Делоне, предложенного в работах [5, 6]. Предлагаемая технология, основанная на работах [7, 8], использует понятие триангуляции Делоне с ограничениями для аппроксимации криволинейных рёбер и граней области и позволяет точно представлять внешнюю поверхность и внутренние поверхности сложных областей.

Входными данными разработанного генератора сеток является трёхмерный массив меток – сегментированное изображение, полученное в программе ИТК-SNAP. Предполагается, что в сегментированном изображении отсутствует поверхностный слой кожи, а места контакта электродов отмечены отдельными маркерами, плотно прилегающими к телу. Форма маркеров, соответствующих электродам не важна. На первом этапе строится тетраэдральная сетка для тела без кожи и для маркеров прилегающих

электродов. На втором этапе тетраэдры маркеров удаляются из сетки, а боковые грани оставшиеся рядом с ними помечаются отдельными номерами. На третьем этапе вдоль поверхности построенной сетки создаётся слой треугольных призм толщиной в 1мм для кожи и дополнительные слои для электродов в тех местах, которые были помечены маркерами. На завершающем этапе каждая треугольная призма разбивается на три тетраэдра с сохранением конформности сетки.

Подробное описание используемых алгоритмов представлено в отчетах, подготовленных в рамках этапов 2 и 3 ГК №14.740.11.084. В рамках работ над текущим этапом был создан программный комплекс для автоматического построения тетраэдральных сеток, включающий в себя алгоритмы построения базовой сетки Делоне, сглаживания сетки и добавления поверхностного слоя кожи и электродов.

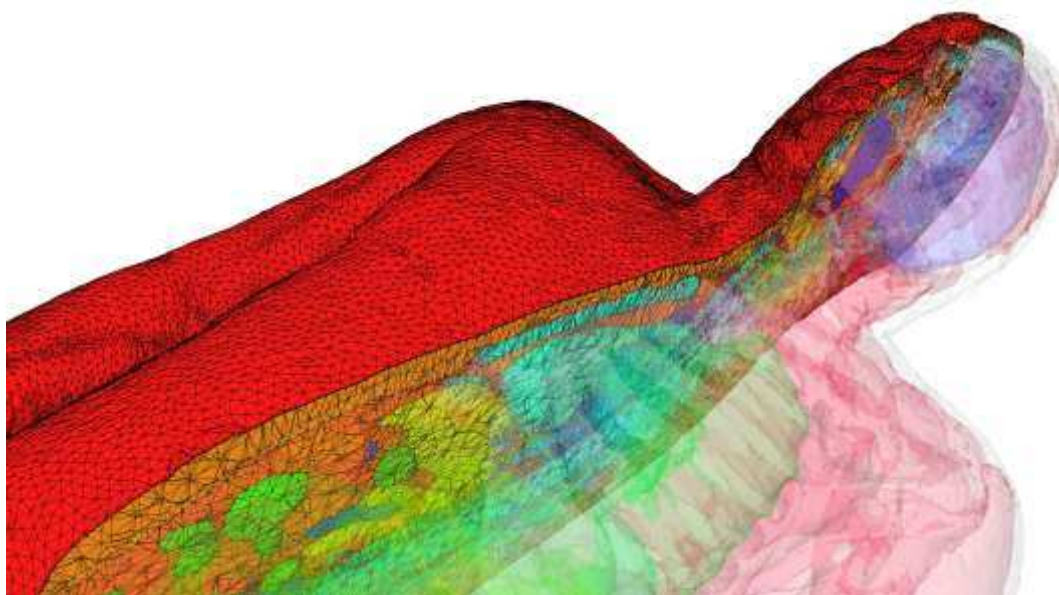


Рисунок 6 – Разрез тетраэдральной сетки для тела мужчины.

На Рисунке 6 изображен разрез полученной неструктурированной сетки для тела человека. Сетка содержит 574 128 вершин и 3 300 481 тетраэдр. Шаг сетки автоматически измельчается вблизи геометрических особенностей модели. Построенная сетка будет использована на следующем этапе работы по проекту.

3. Построение реалистичной геометрической модели тела женщины

Технологическая цепочка создания реалистичной геометрической модели тела женщины полностью повторяет цепочку создания сегментированной модели для мужчины. В качестве начальных данных взяты фотоснимки из проекта Visible Human Project для

женщины. Помимо фотоснимков в проекте содержатся КТ и МРТ снимки. Однако фотоснимки имеют лучшее разрешение. Так всего имеется 5187 снимков с шагом 0,33 мм и разрешением 0,167x0,167 мм. Общий объём данных составляет 181,8 Гб. Разрешение снимков было уменьшено до 1x1x1 мм, а лишние поля обрезаны. Итоговый объём данных для сегментирования составил 682x510x1729 ячеек (вокселей) с размером 1 мм³, объём файла – 1 136 Мб. На Рисунке 7 представлен пример анатомического среза тела женщины.

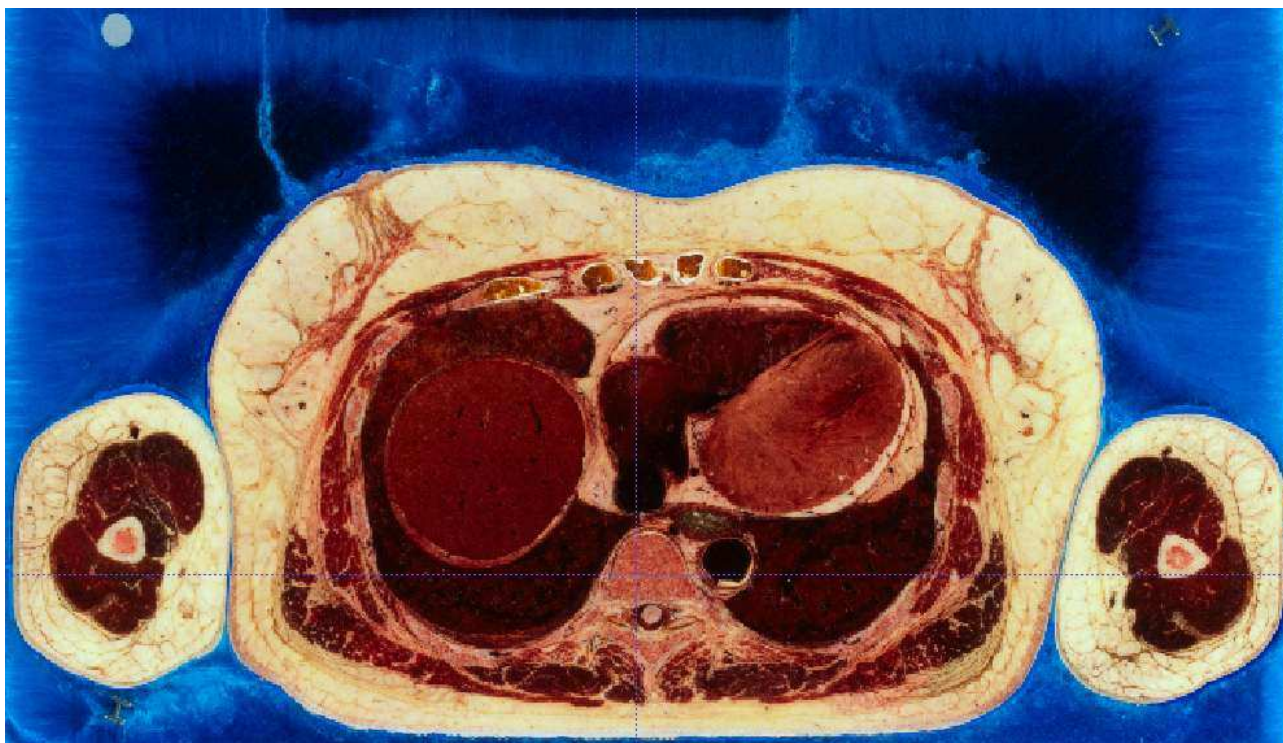


Рисунок 7 – Пример цветного изображения среза тела женщины.

В отличие от сегментирования тела мужчины, сегментация тела женщины начиналась с нуля. Учитывая опыт выполнения сегментирования для тела мужчины, работа по сегментации женщины была также распределена между несколькими исполнителями. Однако в этот раз каждый исполнитель работал над своим конкретным органом или системой органов. Процесс был реализован таким образом, что участники могут периодически обмениваться своими частичными результатами с другими участникам. Для этого была разработана процедура, позволяющая корректно вносить свои изменения в сегментированную модель в общую модель с учетом того, что с последней синхронизации другими пользователями уже могли быть внесены другие изменения. Идея этой процедуры основана на создании так называемых патчей – разности текущей сегментации и предыдущей общей сегментацией. После этого патч может быть применен к текущей общей сегментации, при этом оператор, применяющий патч, может дополнительно проследить, не совершил ли исполнитель каких-то грубых ошибок при сегментировании.

Также для удобства работы с данными они были разбиты на 3 непересекающиеся части: голова, туловище и руки, ноги. Работая с меньшими по объёму данными, участнику сегментирования нужно меньше ресурсов на персональном компьютере. Участниками проекта была проделана огромная работа по обработке анатомических срезов. Изначально было решено несколько уменьшить детализацию геометрической модели. Так в сегментированной модели выделяется лишь 24 органа и ткани. В частности теперь нет разделения отдельно на правые и левые органы, как это было сделано для модели мужчины.

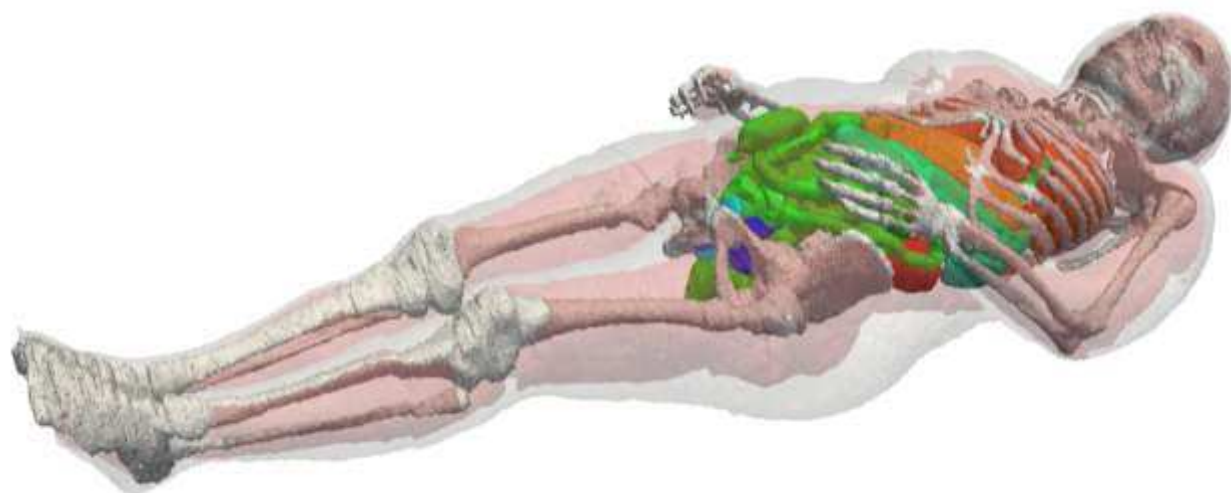


Рисунок 8 – Внутренние органы сегментированной модели тела женщины.

На Рисунке 8 представлена итоговая сегментированная модель тела женщины.

4. Построение пространственной расчетной сетки для реалистичной модели тела женщины

Разработанные ранее методы построения расчетной сетки являются универсальными, и подходят как к сегментированной модели мужчины, так и к сегментированной модели женщины. Процесс построения сетки сводится к технической работе, которую исполнитель выполняет с помощью разработанного программного комплекса.

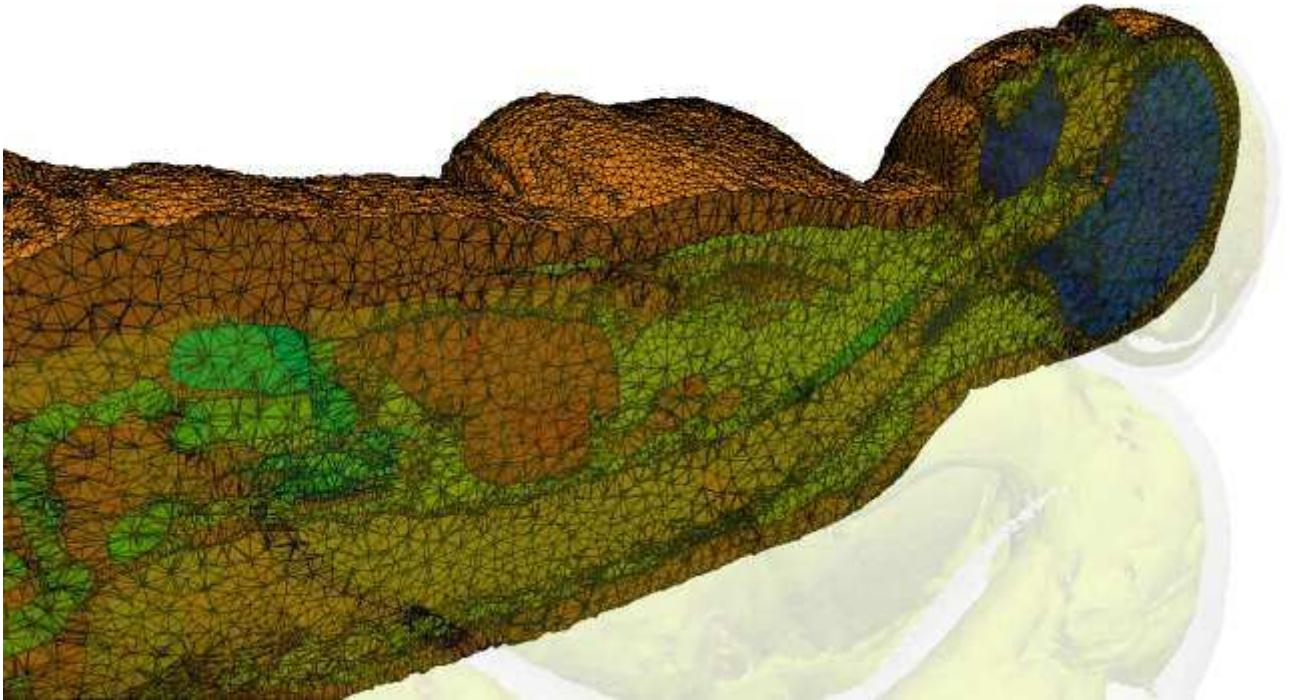


Рисунок 9 – Разрез тетраэдральной сетки для тела женщины.

На Рисунке 9 изображен разрез полученной неструктурированной сетки для тела женщины. Сетка содержит 562 084 вершины и 3 165 781 тетраэдр. Шаг сетки автоматически измельчается вблизи геометрических особенностей модели. Построенная сетка будет также использована на следующем этапе работы по проекту.

Заключение

Содержание настоящего отчёта исчерпывает задания Этапа № 4 Календарного плана Государственного контракта № 14.740.11.0844 от 01 декабря 2010г. Поставленные задачи выполнены полностью.

На данном этапе были выполнены следующие работы:

– Проведена сегментация всего тела мужчины на основе анатомических срезов из проекта Visible Human.

– Построена тетраэдральная расчетная сетка для модели тела мужчины на основе сегментированной модели.

– Проведена сегментация всего тела женщины на основе анатомических срезов из проекта Visible Human.

– Построена тетраэдральная расчетная сетка для модели тела женщины на основе сегментированной модели.

Полученные результаты являются необходимыми для проведения работ на следующем этапе проекта.

К работам на настоящем этапе привлечено большое количество молодежи: 5 молодых кандидатов наук, 5 аспирантов и 6 студентов. По результатам работы опубликована одна статья и одна статья сдана в печать:

1. *Василевский Ю.В., Данилов А.А., Николаев Д.В., Руднев С.Г., Саламатова В.Ю., Смирнов А.В.* Конечно-элементный анализ задач биоимпедансной диагностики // ЖВМиМФ, 2012, Т.52, №4, С.733–745.
2. Danilov A.A., Nikolaev D.V., Rudnev S.G., Salamatova V.Yu., Vassilevski Yu.V. Modelling of bioimpedance measurements: unstructured mesh application to real human anatomy // Russ. J. Numer. Anal. Math. Modelling, сдана в печать

Все заданные целевые индикаторы и показатели достигнуты.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Николаев Д.В., Смирнов А.В., Бобринская И.Г., Руднев С.Г. Биоимпедансный анализ состава тела человека. – М.: Наука, 2009. – 392 с.
2. Grimmes S. and Martinsen O.G. Bioimpedance and Bioelectricity Basics. – Amsterdam: Elsevier, 2008. – 471 p.
3. Василевский Ю.В., Данилов А.А., Николаев Д.В., Руднев С.Г., Саламатова В.Ю., Смирнов А.В. Конечно-элементный анализ задач биоимпедансной диагностики // ЖВМиМФ – 2012, – Т.52, №4, – С.733–745.
4. Visible Human Project [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.nlm.nih.gov/research/visible/visible_human.html, свободный. Язык английский.
5. Chew L.P. Guaranteed-quality mesh generation for curved surfaces // Proc. 9th Annu. ACM Sympos. Comput. Geom. – 1993. – P. 274–280.
6. Ruppert J. A Delaunay refinement algorithm for quality 2-dimensional mesh generation // J. Algorithms. – 1995. – V. 18. – P. 548–585.
7. Boissonnat J.D. and Oudot S. Provably good sampling and meshing of surfaces // Graphical Models. – 2005. V. 67. – P. 405–451.
8. Oudot S., Rineau L., Yvinec M. Meshing volumes bounded by smooth surfaces // Proc. 14th International Meshing Roundtable. – 2005. P. 203–219.