

В.В. Поляков, А.В. Головин, И.М. Дашкова
Компьютерные реотомографические исследования

В медицинской практике широко используют методы компьютерной томографии. В зависимости от вида используемого излучения различают ультразвуковую, радиоизотопную, рентгеновскую томографию, а также компьютерную томографию на основе ядерного магнитного резонанса (ЯМР). Каждая из томографических систем имеет свои наиболее эффективные области применения в диагностике заболеваний и перспективы развития, а также недостатки. В связи с этим задача поиска новых методов томографической диагностики, позволяющих выявлять различные дефекты в биологических тканях, является актуальной.

Одним из перспективных направлений исследований в этом направлении следует считать выявление структуры и свойств биологического объекта по электрографическим данным методом реотомографии, т.е. на основе исследования распределения потенциалов на поверхности объекта, через который пропускают электрический ток. Такое распределение сложным образом зависит от электрических свойств тканей, формы и размеров ее структурных элементов и в настоящее время практически не изучено. Метод реотомографии позволяет избежать ряда недостатков существующих томографических систем, в частности, лучевой нагрузки при рентгеновской томографии и ограничений по глубине сканирования для ультразвуковой томографии.

Наиболее подходящими для моделирования при реотомографии являются объекты, допускающие переход от трехмерного случая к двумерному (плоскому), хорошо описываемому плоской моделью. В работе такое моделирование проведено для предплечья человека. Моделировался срез, произведенный перпендикулярно оси левого предплечья на уровне среднего отдела.

Модель среза биологического объекта основывалась на методе конечных элементов [1], в котором каждый структурный элемент представлял собой квадрат одинакового размера. В модели предполагалось, что электрический ток протекает только вдоль направлений, перпендикулярных сторонам квадрата. Электрическое сопротивление такого квадрата моделировалось согласно рисунку 1.

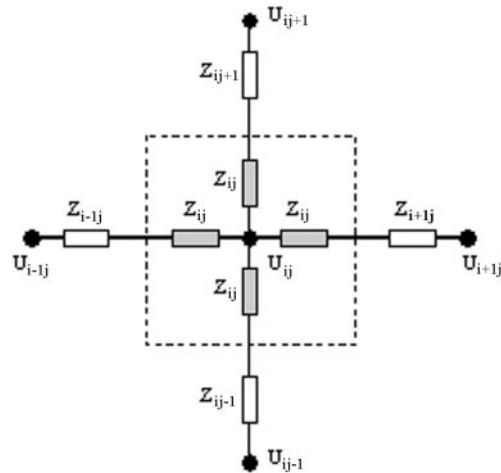


Рис. 1. Модель среза биообъекта

На рисунке рассматриваемый квадрат выделен пунктиром. U_{ij} – потенциал в центре ячейки; Z_{ij} – значение сопротивления, связанное с ячейкой; U_{i-1j} , U_{i+1j} , U_{ij-1} , U_{ij+1} и Z_{i-1j} , Z_{i+1j} , Z_{ij-1} , Z_{ij+1} – значения потенциалов и сопротивлений в соседних ячейках, граничащих с моделируемым квадратом.

Для потенциала в центре ячейки справедлива формула

$$U_{ij} = (\sigma_{i-1j} U_{i-1j} + \sigma_{i+1j} U_{i+1j} + \sigma_{ij-1} U_{ij-1} + \sigma_{ij+1} U_{ij+1}) / (\sigma_{i-1j} + \sigma_{i+1j} + \sigma_{ij-1} + \sigma_{ij+1}), \quad (1)$$

где σ_{i-1j} , σ_{i+1j} , σ_{ij-1} , σ_{ij+1} – электропроводности, которые рассчитывались по формулам:

$$\sigma_{i-1j} = 1 / (Z_{i-1j} + Z_{ij}), \quad \sigma_{i+1j} = 1 / (Z_{i+1j} + Z_{ij});$$

$$\sigma_{ij-1} = 1 / (Z_{ij-1} + Z_{ij}), \quad \sigma_{ij+1} = 1 / (Z_{ij+1} + Z_{ij}).$$

На основе приведенной модели была получена система уравнений, которая решалась численно на ЭВМ. Для этого была разработана специальная программа, позволяющая моделировать структурно-неоднородные биологические объекты и получать на выходе распределение потенциала на поверхности исследуемого биообъекта.

Для проверки модели был проведен расчет распределения потенциала на поверхности среза, проведенного перпендикулярно оси левого предплечья на уровне среднего отдела. Внешний вид среза представлен на рисунке 2 [2].

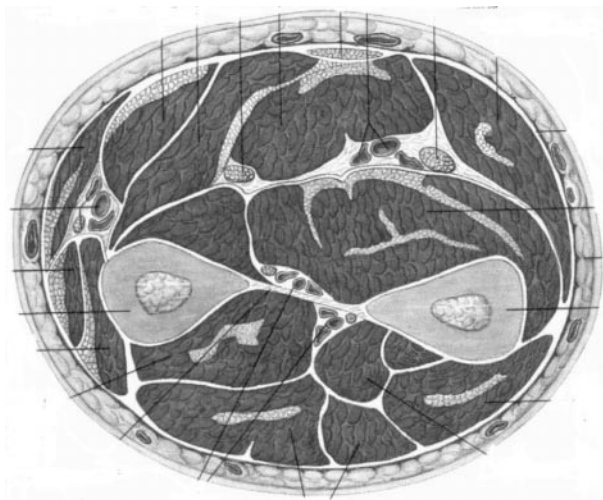
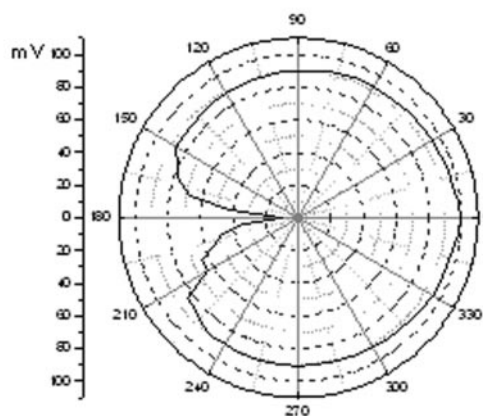


Рис. 2. Анатомический срез предплечья человека на уровне среднего отдела

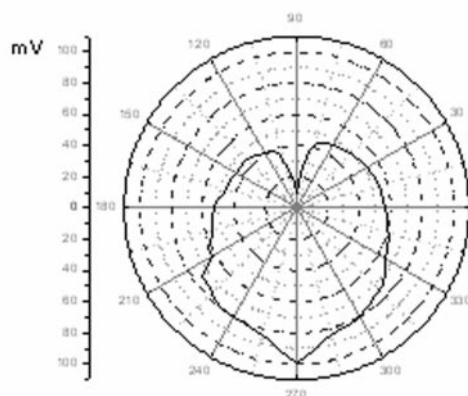
Топология анатомического среза моделировалась согласно [4], значения сопротивлений тканей выбирались на основе экспериментальных данных из [3] и составляли $\rho_{\text{кожи}} = 10^7$ Ом·см, $\rho_{\text{кости}} = 10^9$ Ом·см, $\rho_{\text{соед. ткани}} = 3,3 \cdot 10^3$ Ом·см, $\rho_{\text{костн. мозга}} = 1,4 \cdot 10^3$ Ом·см, $\rho_{\text{крови}} = 170$ Ом·см, $\rho_{\text{мышц}} = 200$ Ом·см. Элементы моделирования представляли собой квадраты одинакового размера, образующие прямоугольник размером 48 x 40 квадратов. Результаты расчета, представленные в виде зависимости величины потенциала рассматриваемого квадрата от угла между радиусами, проведенными через квадрат с нулевым потенциалом и через рассматриваемый квадрат, приведены на рисунках 3–6.

Таким образом, были проведены расчеты и получены реотомограммы для различных входных параметров: 1) угла наложения электродов; 2) величины тестирующего напряжения; 3) величины удельной электропроводности; кроме того, были рассмотрены реотомограммы в норме и при наличии в исследуемом биообъекте различных патологий.

На рисунке 3 представлены распределения потенциала на уровне средних отделов предплечья в зависимости от угла наложения электродов. Реотомограмма на рисунке 3а соответствует следующему наложению электродов: первый электрод, на который подается тестирующее напряжение 100 мВ, расположен под углом 0° ; второй – 180° . Причем следует отметить, что ход реотомограммы от 0 до 180° отличается от ее поведения в пределах 180 – 360° , где наблюдается скачок, который обусловлен, по-видимому, физиологическими особенностями исследуемого биообъекта, а именно расположением локтевой и лучевой костей.



а)



б)

Рис. 3 Распределение потенциала на уровне средних отделов предплечья при наложении электродов под углами: а) 0° и 180° ; б) 90° и 270°

Если мы, исходя из топологии среза на уровне средних отделов предплечья (рис. 2), горизонтально разобьем исследуемый биообъект условно на две равные области, то обе кости – лучевая и локтевая – будут располагаться во второй (нижней) плоскости относительно оси разбиения. А поскольку величина удельной электропроводности костной ткани резко отличается (на несколько порядков) от электропроводности других тканей биообъекта, то именно расположение лучевой и локтевой костей объясняет происхождение скачка на нижней части реотомограммы.

Далее (рис. 3б) представлена реотомограмма, полученная при расположении электрода с тестирующим напряжением, равным 100 мВ как и в первом случае, под углом 270° , а второго – 90° . Таким образом, угол между электродами как в первом, так и во втором случаях составлял 180° . Данная реотомограмма облада-

ет некоторой симметрией относительно вертикальной оси разбоя, и это также связано с особенностями внутренней структуры исследуемого биообъекта. Заметим, что и на второй реотомограмме прослеживается скачок в области $195-225^{\circ}$, обоснование возникновения которого описано выше.

Нами были получены также реотомограммы с другими углами между накладываемыми электродами, и, хотя вид реотомограмм отличался друг от друга, их все можно считать нормальными, т.е. реотомограммами в норме, поскольку структура исследуемого биообъекта была запрограммирована без каких-либо патологических отклонений. Таким образом, в качестве реотомограммы в норме мы можем взять любую из полученных выше; остановим свой выбор на второй реотомограмме (рис. 3б), и далее в работе под реотомограммой в норме подразумевается именно это распределение.

В результате расчетов были получены реотомограммы в норме и для различных патологий, таких как переломы и инородные объекты (рис. 4–5). Было установлено, что при моделировании перелома и инородного объекта наблюдаются ярко выраженные отклонения от вида кривой в нормальном состоянии организма, по величине и характеру которых можно восстановить структуру исследуемого участка. Так, для инородных объектов, обладающих высокой проводимостью, были получены реотомограммы с ярко выраженным минимумом в пределах локализации данного инородного тела. В случаях с диэлектрическими включениями наблюдается противоположное поведение реотомограмм, а именно: появляются локальные максимумы.

Для проверки правильности предложенного подхода было проведено экспериментальное исследование распределения потенциала на поверхности правого предплечья на уровне среднего отдела у испытуемых из возрастной группы 21–22 года. Установка потенциалов и их регистрация осуществлялись с помощью набора жидкостных датчиков, каждый диаметром 5 мм, закрепленных в жесткой обойме диаметром 80 мм. Полученные экспериментальные данные (рис. 6) качественно согласуются с результатами расчета.

Анализ распределения потенциала на уровне средних отделов предплечья показывает, что теоретическая реотомограмма правильно передает ход опытных точек и может служить основой для получения информации о физиологическом состоянии организма человека.

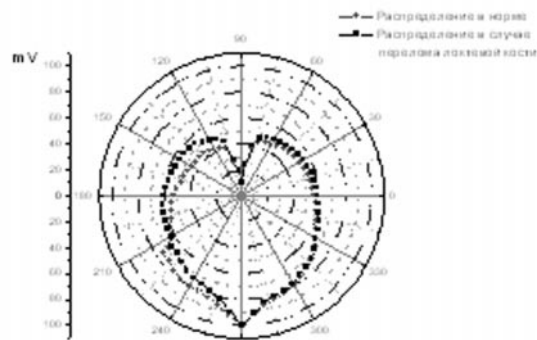


Рис. 4. Распределение потенциала на уровне средних отделов предплечья в норме и при закрытом переломе локтевой кости

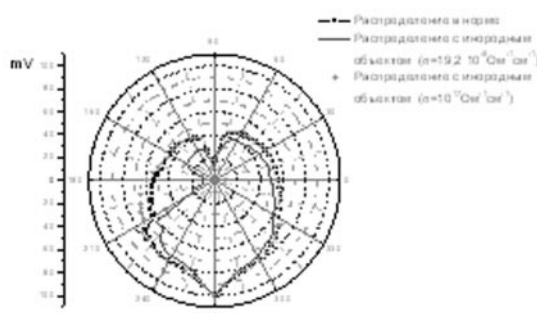


Рис. 5. Распределение потенциала на уровне средних отделов предплечья в норме и при наличии инородных объектов с различными электрическими свойствами

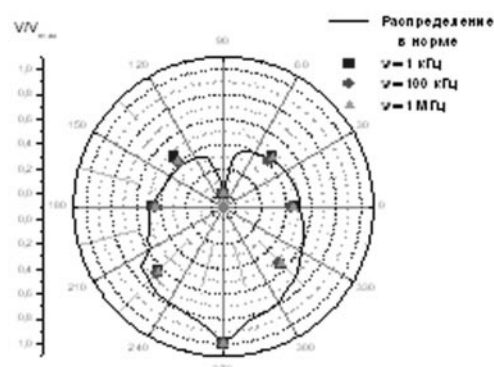


Рис. 6. Реотомограмма в норме и экспериментальные точки, соответствующие различной частоте тестирующего напряжения

Создание специализированных устройств для регистрации реотомограмм не имеет принципиальных трудностей и предполагается как следующий этап разработки автоматизации представленного в данной работе нового перспективного метода исследования функциональных и патологических отклонений в биологических тканях.

Основные выводы и результаты работы следующие:

1. Представлен метод медицинской диагностики на основе компьютерной реотомографии. Создана модель среза на уровне средних отделов предплечья, основанная на методе конечных элементов, для которой проведены расчеты распределения электрического потенциала.

2. Установлен информативный параметр компьютерной реотомографии, таким параметром является кривая распределения потенциалов и ее поведение.

3. Для проверки правильности предложенного подхода была создана установка на основе жидкостных датчиков и проведены эксперименты; сопоставление расчетных данных с экспериментальными показало качественное согласие.

4. Проведены модельные расчеты, подтверждающие возможность диагностики патологических отклонений в рассматриваемом органе, которые качественно согласуются с проведенными экспериментами.

Литература

1. Шуп Т. Решение инженерных задач на ЭВМ. М., 1982.
2. Синельников Р.Д., Синельников Я.Р. Атлас анатомии человека. М., 1989. Т. I.
3. Электрический импеданс биологических тканей. М., 1990.
4. Поляков В.В., Головин А.В., Дашкова И.М. Моделирование объектов при медицинской компьютерной реотомографии // Контроль, измерение, информатизация: Мат. междунар. науч.-техн. конф. Барнаул, 2000.

5. Поляков В.В., Головин А.В., Дашкова И.М. Разработка метода компьютерных реотомографических исследований // Интеграция интеллектуальных и материальных ресурсов научных, образовательных и производственных структур в рамках краевого комплексного учебно-научного центра «Алтай» на базе Алтайского государственного университета: Мат. межрегион. науч.-практ. 14 июня 2001 г. Барнаул, 2001.