

## ВЛИЯНИЕ ТОПОЛОГИИ МИОКАРДА НА ФОРМИРОВАНИЕ Т ЗУБЦА В ЭКГ

<sup>1</sup>Арутюнова Е.Ю., <sup>2</sup>Борщевская А.М.

<sup>1</sup>г. Марьетта, США, Поуп Хай Скул, 12 класс;

<sup>2</sup>г. Жуковский, МОУ «Лицей №14», 9 класс

Руководитель: Арутюнов Ю.А., г. Жуковский, ООО «Двойная спираль»

Основная проблема исследования. Биология с разных сторон изучает законы функционирования живых объектов, самым сложным из которых можно считать человека. В современной медицине широко используются различные программы и имитационные модели, которые позволяют оценивать работу органов и систем организма человека. При этом особое внимание уделяется сердцу. В большинстве случаев, диагностика жизнедеятельности сердца вы-

полняется по результатам регистрации на стандартных отведениях электрических потенциалов, образующихся при работе сердца – ЭКГ (рис. 1).

Как видно из рис. 1, о большинстве заболеваний сердца может сообщить Т зубец. Однако механизм его возникновения в настоящее время до конца не изучен. Согласно устоявшимся представлениям [1, 2], электрофизическая модель сердца описывает возникновение только R зубца (рис. 2)

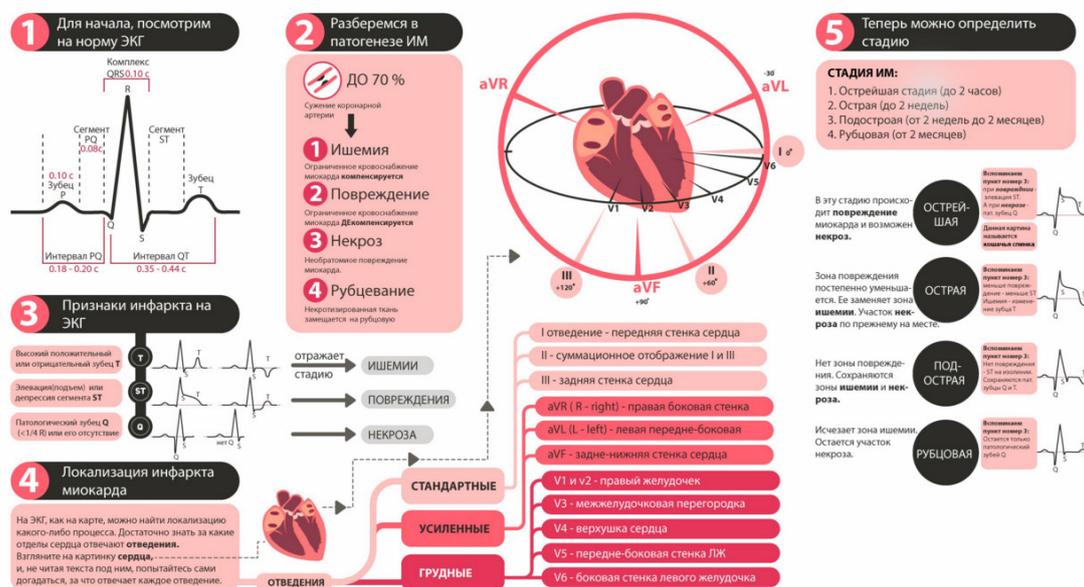


Рис. 1. Находим инфаркт Миокарда на ЭКГ [1]

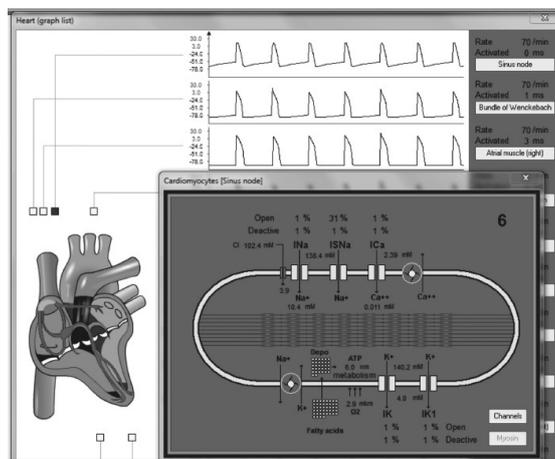


Рис. 2. Фрагмент работы электрофизиологической модели сердца [2]

При этом механизм формирования Т зубца, отражающего состояние сердца остается неизученным. Изучение механизма формирования Т зубца в сигнале ЭКГ составляет основную проблему исследования в статье.

**Актуальность** исследования. В настоящее время существует много моделей описывающих электрическую активность сердца [3, 4]. Например, в резистивной модели сердечнососудистой системы, за аналог сердца принимался источник несинусоидального переменного электрического напряжения связанный с выпрямителем тока, представляющим из себя сердечный клапан. В модели электрической активности сердца для моделирования электрической активности возбудимых волокон сердца использовано приближение в виде генератора переменного электрического поля. Однако все эти модели основаны на представлении о том, что меридиан сердца представляет из себя кольцо (см. рис.1). В то же время, результаты современных исследований [5, 6] показали, что миокард сердца имеет топологию Мебиуса (рис. 3).

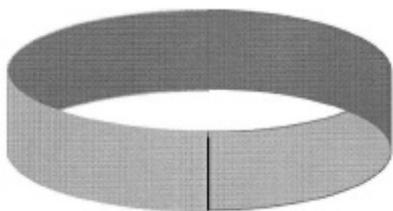


Рис. 3. Меридиан Сердца [6]

а



Это делает актуальным оценку влияния неориентированной поверхности (см. рис. 3) на распространение электрического потенциала, регистрируемого в стандартных отведениях при снятии ЭКГ.

**Цель** исследования. Определить, влияет ли топология миокарда сердца на формирование Т зубца в ЭКГ.

**Гипотеза.** Принимаем, что в синусовом узле сердца периодически вырабатывается электрический R-импульс (см. рис. 1). В этом приближении, в качестве гипотезы полагаем, что электрический импульс по мере своего движения по замкнутому меридиану сердца ослабевает из электрического сопротивления тканей миокарда и «набегает» на периодический сигнал (R зубец), накладываясь и вызывая появление в сигнале ЭКГ Т зубца.

**Задачи работы:**

а – определить, за какое время электрический ток пройдет по кольцевому контуру;  
б – оценить влияния неориентированной поверхности на время обхода контура.

**Предмет исследования.** Известно, что меридиан сердца [6] представляет собой фигуру (см. рис. 3) с поверхностью Мебиуса. Результаты 3D сканирования миокарда показали, что он имеет переменные размеры: длина 60 см, ширина 8–10 см, толщина 0,5–2 см [7]. На основании полученных данных в работе принимаем, что морфологически-подобная модель миокарда с масштабируемыми электрофизическими характеристиками, может быть выполнена из разделенного между собой слоев диэлектрика проводящего гибкого материала толщиной 0,1 мм (рис. 4) длиной 60 см и шириной 8 см.

б



Рис. 4. Образец имитатор:  
а – в форме кольца; б – в форме неориентированной поверхности

**Основная часть**

В соответствии с выдвинутой гипотезой, определим, за какое время импульс электрического тока пройдет по окружности экспериментальных образцов. Известно, что электрическое поле это одна из составляющих частей электромагнитного поля [8] и, следовательно при приложении разности потенциалов к изолированным обкладкам кольца, электрический импульс будет распространяться со скоростью света  $c=300\ 000\ \text{км/с}$ . Таким образом, импульс электрического сигнала пройдет по окружности образца за время:

$$t = L / v, \quad (1)$$

где  $L$  – длина окружности;  $v$  – скорость распространения электромагнитной волны.

Рассмотрим случай кольца (см. рис. 4,а). Длина окружности, т.е. длина проводящего слоя составляет 60 см. Проводники между собой не замкнуты, т.е. расстояние  $L$  которое будет преодолевать будет равно длине окружности и составит 60 см. При этом, при приложении разности потенциалов источник электрического сигнала будет работать в режиме холостого хода. Расчет по формуле (1) показывает, что время  $t_1$ , за которое электрический ток пройдет по кольцевому контуру составит:

$$t_1 = \frac{60\ \text{см}}{300000\ \text{км/с}} = \frac{0,6\ \text{м}}{300\ 000\ 000\ \text{м/с}} = 2 \cdot 10^{-9}\ \text{с} = 2.$$

Если в качестве образца использовать кольцо с топологией Мебиуса (см. рис. 4,б), тогда следует учитывать особенные свойства, присущие ленте Мебиуса свернутой в кольцо. В частности А. Мебиус в своем труде «Об объеме многогранников» описал геометрическую поверхность, названную затем в его честь, обладающую всего одной стороной. Т.е. если взять ленту и закрасить одну сторону одним цветом, а другую – другим, тогда не важно, в каком месте и направлении было начато окрашивание, вся фигура будет закрашена одним цветом. Таким образом, при приложении разности потенциалов к разделенным слоям диэлектрика полосам (см. рис. 4,б) источник электрического сигнала будет работать в режиме короткого замыкания, а длина проходимого электрическим током контура будет удваиваться. Выполним по формуле (1) расчет времени  $t_2$ , за которое электрический ток пройдет по контуру в форме неориентированной поверхности с учетом того, что для рассматриваемого случая  $L=120\ \text{см}$ :

$$t_2 = \frac{120\ \text{см}}{300000\ \text{км/с}} = \frac{1,2\ \text{м}}{300\ 000\ 000\ \text{м/с}} = 4 \cdot 10^{-9}\ \text{с} = 4\ \text{нс}.$$

Результаты расчета позволяют оценить влияние неориентированной поверхности на время обхода контура. Видно, что время  $t_2$  в два раза больше по сравнению с  $t_1$ . Из результатов расчета времени  $t_1$ ,  $t_2$  так же видно, что электрический импульс действительно может «набегать» на периодический сигнал (R зубец) (см. рис. 1). Однако вызывать появление в сигнале ЭКГ Т зубца он не может, т.к. время, через которое появляется Т зубец составляет 0,35–0,44 с, а даже в приближении топологии Мебиуса время  $t_2$  в  $10^8$  раз длиннее.

В то же время известно, что отношение скорости электромагнитной волны в вакууме  $c$  к скорости ее распространения в системе  $v$ :  $n=c/v$  – называется коэффициентом замедления. Эта характеристика имеет тот же физический смысл, что и показатель преломления прозрачной среды для света [9]. И если предположить, что реальные ткани миокарда сердца по своим токопроводящим свойствам отличаются от использованных проводников (см. рис. 4), и в сердце на пути электрического тока имеется замедляющая система (линию задержки), то

тогда становится возможным существенно понизить скорость распространения электрического поля, а значит, и тока. Поэтому ЭКГ в соответствующем отведении покажет появление Т зубца не сразу после появления R зубца цепи. И двухкратное увеличение времени  $t_2$  по сравнению с  $t_1$  как раз и показывает на повреждение миокарда, когда Т зубец сливается с R зубцом (см. рис. 1)

Рассмотрим еще один механизм, который может вызывать появление импульсов в сигнале ЭКГ. Известно, что изменение электрического поля распространяется по проводнику со скоростью электромагнитной волны, активируя электроны в цепи. Но сами электроны движутся гораздо медленнее. Скорость упорядоченного движения электронов (или в случае сердца каких либо других носителей заряда) принято называть дрейфовой скоростью:

$$v_d = \frac{I}{enS} \quad (2)$$

где  $I$  – сила тока;  $e$  – заряд электрона  $e=1,6 \cdot 10^{-19}\ \text{Кл}$ ;  $n$  – концентрация атомов,

в металлах  $n = 10^{28} - 10^{29} \text{ м}^{-3}$ ;  $S$  – поперечное сечение проводника.

Оценим дрейфовую скорость. Известно, что сила тока в 100 мА считается смертельно опасной и вызывает остановку сердца [10]. На основании этого принимаем, что в здоровом сердце протекает ток 10 мА. Для использованных образцов (см. рис. 4) поперечное сечение  $S$  составляет 8 мм<sup>2</sup>. Результаты расчета дрейфовой скорости по формуле (2):

$$v_d = \frac{10 \text{ мА}}{1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3} \cdot 8 \text{ мм}^2} = \frac{10 \cdot 10^{-3} \text{ А}}{1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3} \cdot 8 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2} = 7,8 \cdot 10^{-7} \text{ м/с.}$$

Расчет по формуле (1) показывает, что время  $t_{1д}$ , за которое электроны пройдут по кольцевому контуру составит:

$$t_{1д} = \frac{0,6 \text{ м}}{7,8 \cdot 10^{-7} \text{ м/с}} = 7,7 \cdot 10^5 \text{ с} = 8,91 \text{ сут.}$$

А для неориентированного контура время  $t_{2д}$  составит:

$$t_{2д} = \frac{1,2 \text{ м}}{7,8 \cdot 10^{-7} \text{ м/с}} = 15,4 \cdot 10^5 \text{ с} = 17,82 \text{ сут.}$$

Видно, что дрейфовая скорость вызывать появление в сигнале ЭКГ Т зубца он не может, т.к. время, через которое появляется «набегание» сигнала составляет несколько недель.

### Заключение

Показано, что электрический импульс по мере своего движения по замкнутому меридиану сердца может «набегать» на периодический сигнал (R зубец) и накладываясь вызывать появление в сигнале ЭКГ Т зубца.

При создании образцов имитаторов работы сердца необходимо учитывать коэффициент замедления, т.к. реальные ткани миокарда отличаются по проводящим свойствам от металлов.

Инфаркт миокарда может быть вызван нарушением его топологии, т.к. в этом случае время «набегания» сокращается в два раза, что и приводит к совмещению R и T зубцов.

### Список литературы

1. Находим инфаркт Миокарда на ЭКГ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://yandex.ru/images/search?from=tabbar&text=yf%5Bjlv%20byafhr%20vbjrflf%20yf%20%22RU&pos=0&img\\_url=https%3A%2F%2Fsosud-ok.ru%2Fwp-content%2Fuploads%2F2019%2F07%2Finfarkt-na-ekg.jpg&grt=simage](https://yandex.ru/images/search?from=tabbar&text=yf%5Bjlv%20byafhr%20vbjrflf%20yf%20%22RU&pos=0&img_url=https%3A%2F%2Fsosud-ok.ru%2Fwp-content%2Fuploads%2F2019%2F07%2Finfarkt-na-ekg.jpg&grt=simage) (дата обращения 01.08.2019).
2. Хаимзон И.И., Бондарчук И.П. Электрофизиологическая модель сердца (виртуальное сердце) // Клиническая информатика и Телемедицина – 2011, – Т.7. Вып.8. – С. 10–15.
3. The influence of the cardiomyocardial topology on the magnetizing force measured by magnetocardiograph // Yu.A. Arutyunov, A.A. Drobayzko, E.A. Chaschin, I.N. Vozovikov, P.A. Shashok // International research journal. – 2017. – Vol. 04(58) part 4. – P. 6–12.
4. Федорова В.Н. Медицинская и биологическая физика. Курс лекций с задачами : учеб. пособие / В.Н. Федорова, Е.В. Фаустов. – М.: ГЭОТАР-Медиа, 2008. – 592 с.
5. Buckberg G. D. Basic science review: The helix and the heart // The Journal of Thoracic and Cardiovascular Surgery. – 2002. – Vol. 124. № 5. – P. 75–85.
6. Лисин А.В., Платоненко В.И. Топологические свойства и отношения живых систем. Эффект нелокальности в живых системах // Вестник международной академии наук (Русская секция). – 2009. – №.1. – С. 21–27.
7. Арутюнов Ю.А., Архипов И.П., Байбаков В.Н., Глинских В.А., Рудой А.А., Чашин Е.А. Бизнес планирование проекта по созданию и внедрению модели миокарда сердца с помощью 3D-принтера // Ростовский научный журнал. – 2018. – № 1. – С. 355–363.
8. Википедия [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%AD%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%80%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%B8%D0%B9\\_%D1%82%D0%BE%D0%BA](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%AD%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%80%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%B8%D0%B9_%D1%82%D0%BE%D0%BA) (дата обращения 01.08.2019).
9. Скорость электрического тока [Электронный ресурс] // Наука и жизнь. – Режим доступа: <https://www.nkj.ru/archive/articles/5527/> (дата обращения 01.08.2019).
10. FB [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://fb.ru/article/321240/kakoy-opasnyiy-tok-dlya-cheloveka-smertelnyie-i-opasnyie-znacheniya-toka> (дата обращения 01.08.2019).