

УДК 612.067:612.17

ОТОБРАЖЕНИЕ ГРАДИЕНТОВ РЕПОЛЯРИЗАЦИИ В МИОКАРДЕ ЖЕЛУДОЧКОВ НА ПОВЕРХНОСТЬ ТЕЛА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ОРИЕНТАЦИИ СЕРДЦА

Артеева Н.В.

*Институт физиологии Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук,
ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар, e-mail: natalia.arteyeva@gmail.com*

Методами математического моделирования изучено отображение трансверсального и апикобазального градиентов реполяризации в желудочках сердца на поверхность тела в зависимости от наклона сердца во фронтальной плоскости. Эквивалентный электрический генератор сердца моделировали как осевой диполь, состоящий из двух компонент, имитирующих апикобазальный и трансверсальный градиенты реполяризации. Угол наклона вертикальной оси сердца во фронтальной плоскости изменяли от 0 до 90 градусов, моделируя вертикальную, «квазивертикальную», «квазигоризонтальную» и горизонтальную ориентацию сердца. Кардиоэлектрическое поле моделировали как распределение потенциалов поля диполя на поверхности эллипса, представлявшего собой поверхность туловища. При моделировании учитывали реалистичное положение сердца относительно поверхности торса. Согласно результатам моделирования, разное соотношение между трансверсальным и апикобазальным градиентами реполяризации может продуцировать одинаковое кардиоэлектрическое поле, в то время как одинаковое соотношение между этими двумя градиентами может продуцировать разное поле, в зависимости от ориентации сердца. Моделирование показало, что наклон вертикальной оси сердца во фронтальной плоскости изменяет как амплитуду Т-волны, так и распределение потенциала на поверхности туловища. Таким образом, при анализе кардиоэлектрического поля необходимо учитывать ориентацию сердца.

Ключевые слова: градиент реполяризации, апикобазальный, трансмуральный, ориентация сердца

THE REFLECTION OF REPOLARIZATION GRADIENTS IN THE HEART VENTRICLES ONTO THE BODY SURFACE DEPENDING ON THE HEART ORIENTATION

Arteeva N.V.

*Institute of Physiology of Komi Science centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
FRC Komi SCUB RUS, Syktyvkar, e-mail: natalia.arteyeva@gmail.com*

The reflection of the apicobasal and the transversal repolarization gradients in the heart ventricles onto the body surface depending on the heart declination in the frontal plane was studied by means of mathematical simulations. The equivalent electrical heart generator was simulated as a dipole, consisted of the two components, imitating the apicobasal and transversal repolarization gradients. The declination of the vertical heart axis in the frontal plane was varied from 0 to 90 degrees, simulating the vertical, «quazivertical», horizontal and «quazihorizontal» heart orientation. The cardioelectric field was simulated as the distribution of potentials of the dipole field on the elliptical surface, imitating the surface of the torso. When simulating, we had took into account the realistic position of the heart relatively to the torso surface. According to the results of simulations, the different ratio between the transversal and apicobasal repolarization gradients could produce the same body surface potential distribution, while the same ratio between these two gradients could produce the differing potential distributions, depending on the heart orientation. The simulations demonstrated that the heart declination in the frontal plane could change the T-wave amplitude as well as the body surface potential distribution. Thus, in the analysis of the cardioelectric field, the orientation of the heart must be taken into account.

Keywords: repolarization gradient, apicobasal, transmural, heart orientation

Т-волна на ЭКГ является результатом неодинакового времени окончания реполяризации в разных отделах желудочков сердца, т.е. результатом наличия градиентов реполяризации. Прежде всего, Т-волна ассоциируется с апикобазальным [1] и трансмуральным [2] градиентами реполяризации. Кроме того, были зарегистрированы переднезадний и межжелудочковый градиенты реполяризации [1, 3].

Процесс реполяризации желудочков чаще всего характеризуется не одним, а несколькими градиентами реполяризации. Соотношение между величиной этих градиентов может быть различным – может преобладать один из них или два-три градиента могут быть сопоставимы по величине. В любом случае, суммарный вектор реполяризации представляет

собой суперпозицию нескольких векторов, сформированных разнонаправленными градиентами реполяризации.

Было бы удобно подразделить эти градиенты на две группы – с одной стороны, это апикобазальный градиент, направление которого совпадает с направлением продольной оси сердца, с другой – градиенты, лежащие в трансверсальных плоскостях сердца (трансмуральный, переднезадний и межжелудочковый). Следует отметить, что трансмуральный градиент реполяризации лишь условно можно отнести к трансверсальным градиентам, поскольку наряду с трансверсальной компонентой кардиоэлектрического поля он продуцирует также и апикобазальную компоненту [4].

Информация о градиентах реполяризации в желудочках важна для оценки физиологического состояния сердца. Чтобы получить эту информацию неинвазивно, на основе измерений кардиоэлектрического поля, необходимо знать механизмы отображения градиентов реполяризации на поверхность тела. А это отображение в значительной мере зависит от внесердечных факторов, в частности от ориентации сердца в грудной клетке. Ранее нами было показано, что ориентация сердца в грудной клетке в существенно большей степени влияет на формирование кардиоэлектрического поля, нежели форма торса [5].

Цель настоящего модельного исследования – изучить отображение различных комбинаций трансверсального и апикобазального градиентов реполяризации в желудочках сердца на поверхность тела в зависимости от наклона сердца во фронтальной плоскости.

Материалы и методы исследования

Суммарный электрический генератор сердца в период реполяризации желудочков – эквивалентный Т-вектор – моделировали как одиночный диполь, помещенный в центр желудочков. Т-вектор задавали в системе координат, связанной с сердцем (рис. 1). Т-вектор лежал во фронтальной плоскости и состоял из двух компонент – апикобазальной ($T_{\text{apicobasal}}$) и трансверсальной ($T_{\text{transversal}}$), имитирующих апикобазальный и трансверсальный градиенты реполяризации.

Задавали разное соотношение между апикобазальной и трансверсальной компонентами Т-вектора: либо одна из них преобладала по величине в большей или меньшей степени, либо они были равны. Угол наклона вертикальной оси сердца относительно вертикальной оси торса во фронтальной плоскости составлял 0° , 30° , 60° и 90° , что соответствует вертикальной, «квазивертикальной», «квазигоризонтальной» и горизонтальной ориентации сердца.

Т-вектор был помещен в эллиптический торс и немного смещен к его передней поверхности, что соот-

ветствует положению сердца в грудной клетке. Кардиоэлектрическое поле моделировали как распределение потенциалов поля диполя на поверхности эллипса.

Результаты исследования и их обсуждение

Вертикальная ориентация сердца. Доминирующий апикобазальный градиент реполяризации продуцирует распределение потенциала с отрицательной краниальной и положительной каудальной областями, характерное для таких видов животных, как собака, кошка и кролик (рис. 2). При доминирующем трансверсальном градиенте потенциалы на правой половине торса отрицательны, на левой – положительны. Промежуточные комбинации апикобазального и трансверсального градиентов дают распределение потенциала, характерное для человека: отрицательный экстремум потенциала расположен в верхней правой, положительный – в нижней левой части грудной клетки.

«Квазивертикальная» и «квазигоризонтальная» ориентация сердца. Наклон сердца на 30° – 60° во фронтальной плоскости «ослабляет» апикобазальную составляющую поля и «усиливает» трансверсальную (рис. 2). Таким образом, доминирующий апикобазальный градиент продуцирует распределение потенциала, похожее на то, которое было получено при одинаковой величине апикобазального и трансверсального градиентов при вертикальной ориентации сердца. При данной ориентации сердца наиболее «реалистичное» поле дает именно доминирующий апикобазальный градиент. При доминировании трансверсального градиента потенциалы в краниальной части поверхности торса отрицательны, что нехарактерно для человека и животных при нормальных условиях.



Рис. 1. Эквивалентный Т-вектор в системе координат, связанной с сердцем. $T_{\text{apicobasal}}$ и $T_{\text{transversal}}$ – апикобазальная и трансверсальная компоненты Т-вектора

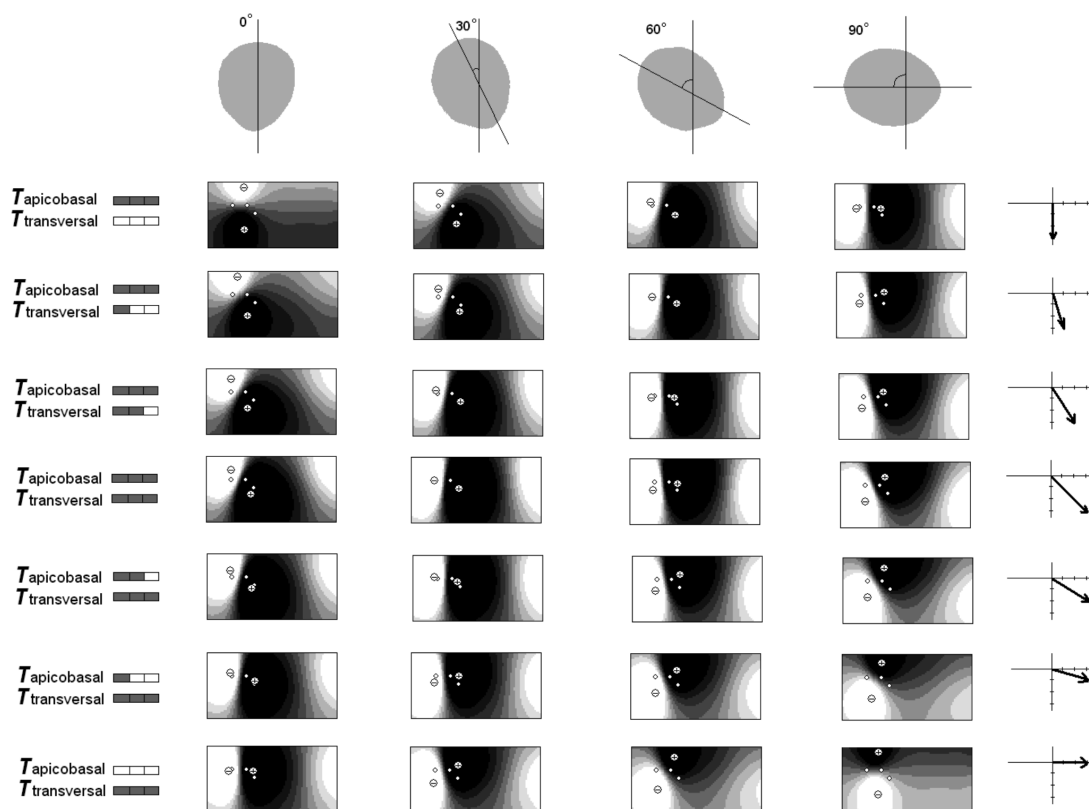


Рис. 2. Распределения потенциала на поверхности торса, смоделированные для разных комбинаций апикобазального и трансверсального градиентов реполяризации и разной ориентации сердца.

Левая половина карт соответствует вентральной, правая – дорсальной поверхности торса; темная область соответствует положительным, светлая – отрицательным потенциалам. На картах обозначено положение отведений $V1-V3$, а также экстремумов потенциала (знаками «+» и «-»). Относительные величины апикобазального и трансверсального градиентов показаны слева, амплитуда и направление T -вектора во фронтальной плоскости – справа. Наклон продольной оси сердца во фронтальной плоскости показан в верхней части рисунка

Горизонтальная ориентация сердца.
 При наклоне сердца на 90° имеет место инверсия направлений градиентов относительно поверхности торса: апикобазальный градиент теперь ориентирован справа налево, а трансверсальный – снизу вверх (рис. 2). При такой ориентации сердца ни одна комбинация апикобазального и трансверсального градиентов не дает распределения потенциала, похожего на измеренное в эксперименте у человека или животных в норме.

Соотношение между амплитудой T -волны, ориентацией сердца и градиентами реполяризации. Соотношение между амплитудой T -волны, наклоном сердца и относительной величиной апикобазального и трансверсального градиентов анализировали на примере грудного отведения $V2$ (рис. 3). Моделирование показало, что амплитуда T -волны более чувствительна к изменениям в величине того градиента,

который в большей степени параллелен оси отведения (под осью отведения мы понимаем линию, соединяющую геометрический центр сердца и точку отведения). Например, при вертикальной ориентации сердца амплитуда T -волны в отведении $V2$ очень чувствительна к изменениям в величине трансверсального градиента реполяризации и совершенно нечувствительна к изменениям в величине апикобазального градиента; при горизонтальной ориентации сердца ситуация меняется на обратную (рис. 3). Моделирование также наглядно продемонстрировало, что одна и та же величина T -вектора может продуцировать разную амплитуду T -волны в зависимости от ориентации сердца (рис. 3).

Цель настоящего модельного исследования определила выбор эквивалентного электрического генератора сердца в виде неподвижного диполя, помещенного в центр сердца. Во-первых, поле такого диполя до-

статочно хорошо аппроксимирует реальное кардиоэлектрическое поле в период реполяризации желудочков [6]. Во-вторых, дипольная, то есть векторная, модель позволяет задавать любую конкретную величину апикобазальной и трансверсальной составляющих результирующего Т-вектора, что достаточно затруднительно при использовании сложных реалистичных компьютерных моделей электрической активности сердца. И, в-третьих, при всей своей простоте данная модель полностью адекватна цели исследования, поскольку ее усложнение не дало бы принципиально новых результатов.

Моделирование показало, что разные комбинации апикобазального и трансверсального градиентов реполяризации могут продуцировать одинаковое распределение потенциала, в то время как одна и та же их комбинация может давать разные распределения потенциала, в зависимости от ориентации сердца. Другими словами, при «горизонтализации» сердца (по сравнению с его вертикальным расположением) апикобазальный и трансверсальный градиенты могут как бы поменяться местами: трансверсальный градиент будет ориентирован ближе к апикобазальному направлению, в то время как апикобазальный градиент – ближе к трансверсальному направлению.

Соответственно, изменения амплитуды Т-волны могут быть связаны как с изменениями величины и направления Т-вектора, так и с разной ориентацией сердца. Поэтому при сравнении результатов, полученных на моделях с разными геометрическими параметрами, а также экспериментальных данных, измеренных у человека и разных видов животных, необходимо учитывать ориентацию сердца.

В частности, у кролика и кошки в период Т-волны на поверхности туловища формируется распределение потенциала с отрицательной краниальной и положительной каудальной областями. Положение сердца у этих животных близко к вертикальному, что может говорить о преобладании у них апикобазального градиента реполяризации. У человека, если судить по распределению потенциала на поверхности тела и векторкардиографическим данным, трансверсальная составляющая Т-вектора превалирует над апикобазальной [7]. Однако, возможно, это лишь кажущаяся картина, поскольку у большинства людей положение сердца ближе к горизонтальному, нежели к вертикальному. Таким образом, результаты моделирования наглядно демонстрируют необходимость учитывать ориентацию сердца при анализе электро- и векторкардиографических данных.

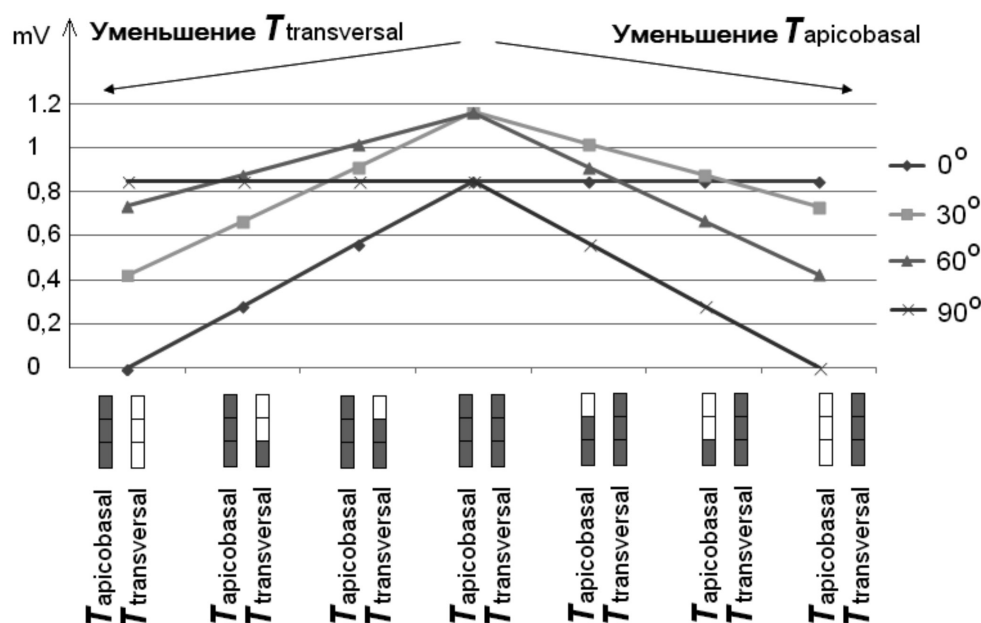


Рис. 3. Зависимость амплитуды Т-волны (грудное отведение V2) от наклона сердца и соотношения между апикобазальным и трансверсальными градиентами реполяризации. Относительные величины апикобазальной ($T_{apicobasal}$) и трансверсальной ($T_{transversal}$) компонент Т-вектора показаны в нижней части рисунка. Угол наклона продольной оси сердца во фронтальной плоскости указан справа

Заключение

Согласно результатам моделирования, разное соотношение между трансверсальным и апикобазальным градиентами реполяризации может продуцировать одинаковое кардиоэлектрическое поле, в то время как одинаковое соотношение между этими градиентами – разное поле, в зависимости от ориентации сердца. Моделирование показало, что наклон вертикальной оси сердца во фронтальной плоскости изменяет как амплитуду Т-волны, так и распределение потенциала на поверхности туловища.

Список литературы

1. Janse M.J., Coronel R., Opthof T., Sosunov E.A., Anyukhovskiy E.P., Rosen M.R. Repolarization gradients in the intact heart: transmural or apico-basal? *Prog. Biophys. Mol. Biol.* 2012. Vol. 109. № 1–2. P. 6–15.
2. Antzelevitch C. Transmural dispersion of repolarization and the T wave. *Cardiovasc. Res.* 2001. Vol. 50. P. 426–431.
3. Pandit S.V., Kaur K., Zlochiver S., Noujaim S.F., Furspan P., Mironov S., Shibayama J., Anumonwo J., Jalife J. Left-to-right ventricular differences in I(KATP) underlie epicardial repolarization gradient during global ischemia. *Heart Rhythm.* 2011. Vol. 8. № 11. P. 1732–1739.
4. Artyeva N.V., Azarov J.E., Vityazev V.A., Shmakov D.N. Action potential duration gradients in the heart ventricles and the cardiac electric field during ventricular repolarization (A model study). *J. Electrocardiol.* 2015. Vol. 48. № 4. P. 678–685.
5. Артеева Н.В. Влияние ориентации сердца в грудной клетке на пространственно-амплитудные характеристики кардиоэлектрического поля (модельное исследование) // *Современные проблемы науки и образования.* 2017. № 2. URL: <http://science-education.ru/ru/article/view?id=26252> (дата обращения: 12.09.2018).
6. Титомир Л.И., Трунов В.Г., Айду Э.А.И. Неинвазивная электрокардиопография. М.: Наука, 2003. 198 с.
7. Vahedi F., Odenstedt J., Hartford M., Gilljam T., Bergfeldt L. Vectorcardiography analysis of the repolarization response to pharmacologically induced autonomic nervous system modulation in healthy subjects. *J. Appl. Physiol.* 2012. Vol. 113. P. 368–376.