

ВЛИЯНИЕ ОРИЕНТАЦИИ СЕРДЦА В ГРУДНОЙ КЛЕТКЕ НА ПРОСТРАНСТВЕННО-АМПЛИТУДНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КАРДИОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ (МОДЕЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ)

Артеева Н.В.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физиологии Коми научного центра Уральского отделения Российской Академии наук, Сыктывкар, e-mail: arteeva@physiol.komisc.ru

Влияние ориентации сердца в грудной клетке на пространственно-амплитудные характеристики кардиоэлектрического поля изучено в рамках компьютерной модели желудочков сердца собаки, основанной на экспериментальных данных. Модель позволяет воспроизводить последовательности де- и реполяризации желудочков, а также кардиоэлектрическое поле на поверхности туловища с учетом реальной геометрии сердца и торса. Для изучения влияния ориентации сердца на формирование кардиоэлектрического поля был выбран период ST-T, для которого характерно стабильное, мало изменяющееся на протяжении всего периода распределение кардиоэлектрических потенциалов. Ориентацию сердца в модели варьировали, изменяя угол наклона продольной оси сердца во фронтальной и сагиттальной анатомических плоскостях от 0 до 90 градусов. Моделирование показало, что наклон сердца в сагиттальной плоскости существенно изменяет амплитуды кардиоэлектрических потенциалов, а наклон сердца во фронтальной плоскости изменяет как амплитуды потенциалов, так и их распределение на поверхности туловища.

Ключевые слова: кардиоэлектрическое поле, пространственно-амплитудные характеристики, ориентация сердца.

THE EFFECT OF HEART ORIENTATION IN THE CHEST ON SPATIAL AND AMPLITUDE CHARACTERISTICS OF CARDIAC ELECTRIC FIELD (A MODEL STUDY)

Arteeva N.V.

Institute of Physiology, Komi science centre, Russian academy of sciences, Syktyvkar, e-mail: arteeva@physiol.komisc.ru

The effect of heart orientation in the chest on spatial and amplitude characteristics of cardiac electric field was studied in the framework of a computer model of a canine heart ventricles based on experimental data. The model allows to simulate the sequences of ventricular activation and repolarization as well as the body surface cardiac electric field, taking into account the real geometry of torso and heart. The effect of heart orientation on cardiac electric field formation was studied on the example of ST-T period, which is characterized by a stable body surface potential distribution throughout all the period. The heart orientation in the model was varied by declination of the longitudinal heart axis in frontal and sagittal anatomical planes from 0 to 90 degrees. The simulations showed that inclination of the heart in the sagittal plane changes the amplitudes of cardiac potentials, while inclination of the heart in the frontal plane changes both the amplitudes of the potentials and the body surface potential distribution.

Keywords: cardiac electric field, amplitude and spatial characteristics, heart orientation.

Отображение электрической активности сердца на кардиоэлектрическое поле, регистрируемое на поверхности туловища, в существенной степени зависит от внесердечных факторов, которые можно разделить на два типа. Факторы первого типа, связанные с электрической неоднородностью и ограниченностью торса как объемного проводника, влияют в основном на амплитудные характеристики поля, оказывая «масштабирующий эффект» на величину кардиоэлектрических потенциалов [5]. Факторы второго типа связаны с геометрическими характеристиками сердца и торса. Ранее нами было показано, что форма поверхности торса не оказывает существенного влияния на формирование

кардиоэлектрического поля [2]. Наибольшее влияние на кардиоэлектрическое поле оказывают положение и ориентация сердца в грудной клетке [7]. В частности, недавние клинические исследования показали, что даже незначительные различия в наклоне продольной анатомической оси сердца могут вызывать существенные изменения в направлении электрической оси сердца [8]. Поскольку направление продольной анатомической оси сердца варьирует как у человека, так и у экспериментальных животных, используемых в электрокардиологических исследованиях, для более точной интерпретации данных измерения кардиоэлектрических потенциалов необходимы точные знания о том, как ориентация сердца в грудной клетке влияет на формирование кардиоэлектрического поля на поверхности туловища.

Цель настоящей работы – изучить влияние наклона продольной оси сердца относительно продольной оси торса во фронтальной и сагиттальной анатомических плоскостях на пространственно-амплитудные характеристики кардиоэлектрического поля.

Методы

Исследования проводили в рамках дискретной компьютерной модели электрической активности желудочков сердца и формирования кардиоэлектрического поля, основанной на экспериментальных данных [6]. Модель позволяет воспроизводить последовательности активации и реполяризации желудочков, а также кардиоэлектрические потенциалы на поверхности туловища с учетом формы и взаимного пространственного расположения сердца и торса.

Положение начальных очагов активации и распределение длительностей потенциалов действия в желудочках задавали на основе данных многоканального синхронного картирования кардиоэлектрических потенциалов на поверхности туловища, эпикарде и в интрамуральных слоях желудочков сердца собаки [3,4]. Форму желудочков, форму поверхности торса и положение геометрического центра желудочков в грудной клетке, а также соотношение величин сердца и торса задавали на основе измерений у собак. Потенциал в точке наблюдения на поверхности туловища вычисляли как сумму потенциалов, генерируемых отдельными ячейками модели; каждая ячейка модели представляла собой диполь, дипольный момент которого был равен градиенту потенциала действия между данной ячейкой и соседними ячейками в данный момент времени. Суммарный электрический вектор вычисляли как суперпозицию всех элементарных диполей модели. При моделировании кардиоэлектрических потенциалов проводящую среду тела рассматривали как однородный неограниченный проводник.

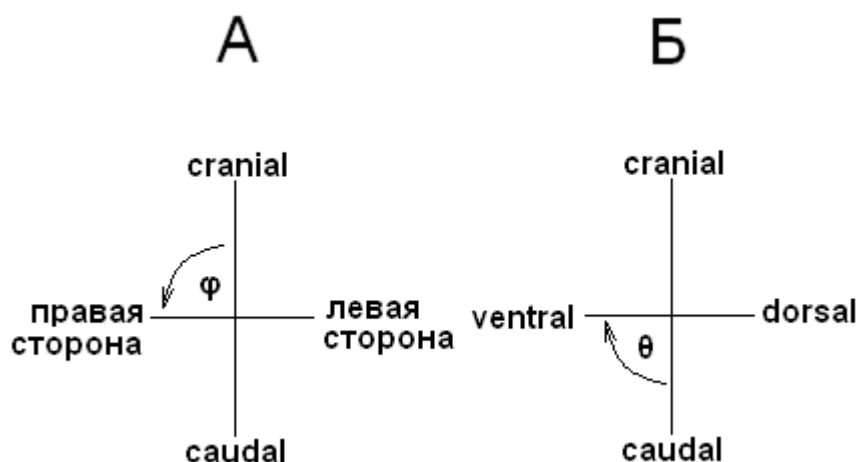


Рис. 1. Направление поворота продольной оси сердца во фронтальной (А) и сагиттальной (Б) плоскостях

Cranial – краниальное направление, caudal – каудальное направление, ventral – вентральная поверхность торса, dorsal – дорсальная поверхность торса, φ и θ – углы наклона продольной оси сердца во фронтальной и сагиттальной плоскостях, соответственно.

Ориентацию сердца в модели варьировали, последовательно изменяя угол наклона продольной оси сердца во фронтальной и сагиттальной анатомических плоскостях от 0 до 90 градусов (Рис. 1). В качестве амплитудной характеристики кардиоэлектрического поля рассматривали амплитуду Т-волны, в качестве пространственной характеристики – распределение потенциала на поверхности туловища.

Результаты исследования

Влияние ориентации сердца на формирование кардиоэлектрического поля изучали на примере периода реполяризации желудочков (ST-T период). В результате гетерогенности реполяризации в желудочках сердца формируется суммарный электрический вектор реполяризации, который генерирует на поверхности туловища стабильное, мало изменяющееся на протяжении времени распределение кардиоэлектрических потенциалов.

Суммарный электрический вектор реполяризации в желудочках сердца, смоделированный при нормальной последовательности реполяризации желудочков у собаки, был направлен вправо (от левого желудочка к правому) и вниз (от основания желудочков к их верхушке). Соответственно, при вертикальной ориентации сердца (когда направление продольной оси желудочков совпадало с направлением продольной оси торса) распределение потенциала на поверхности туловища было краниокаудальным, с положительной каудальной и отрицательной краниальной областями, а положительный экстремум был расположен правее, чем отрицательный (Рис. 2). Изменения в ориентации сердца в модели вызывали изменение как амплитудных, так и пространственных

характеристик кардиоэлектрического поля на поверхности туловища.

Поворот продольной оси сердца во фронтальной плоскости. При повороте продольной оси сердца во фронтальной плоскости имели место кардинальные изменения в распределении потенциалов на поверхности туловища (Рис. 2, А). По мере увеличения угла наклона область отрицательных потенциалов смещалась вправо и в результате стала занимать бóльшую часть вентральной поверхности грудной клетки; соответственно, отрицательный экстремум также смещался вправо, с дорсально-боковой поверхности торса на вентральную поверхность. Область положительных потенциалов смещалась влево, на дорсальную поверхность туловища, при этом положение положительного экстремума было относительно стабильным. При повороте более чем на 60° имела место частичная инверсия в распределении потенциалов на поверхности туловища.

В результате изменений в распределении потенциалов на поверхности туловища изменялись амплитуда и полярность Т-волны. На большей части поверхности туловища Т-волна была инвертирована (Рис. 2, А и 3, А).

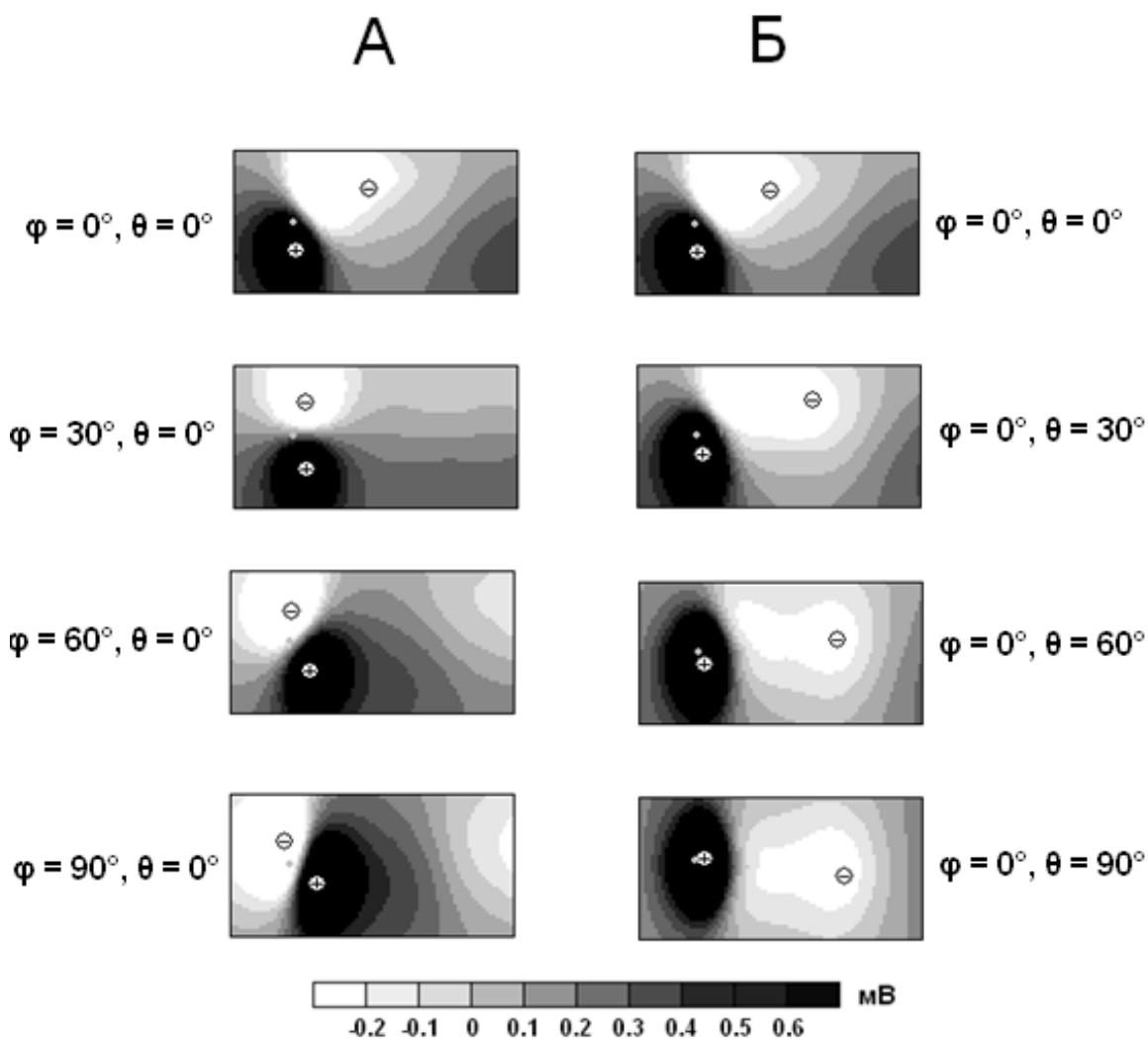


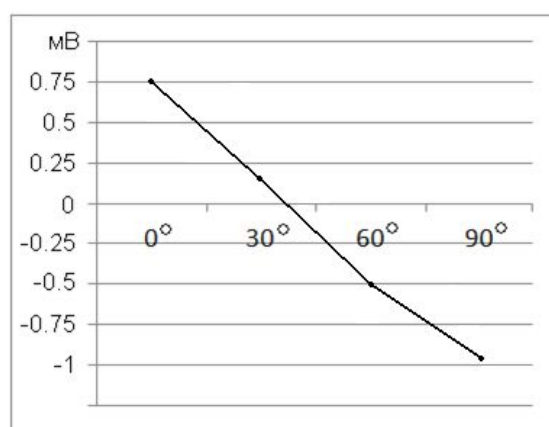
Рис. 2. Распределение потенциала на поверхности торса в момент пика Т-волны,

смоделированное при разном наклоне продольной оси сердца во фронтальной (А) и сагиттальной (Б) плоскостях

Левая половина карт соответствует вентральной, правая – дорсальной поверхности торса. На картах в виде точки обозначено положение отведения V1, а также экстремумов потенциала (знаками "+" и "-"). Шкала потенциалов показана в нижней части рисунка. φ и θ – углы наклона продольной оси сердца во фронтальной и сагиттальной плоскостях, соответственно.

Поворот продольной оси сердца в сагиттальной плоскости. Поворот сердца в сагиттальной плоскости (в результате которого верхушка сердца приближалась к поверхности грудной клетки, а основание сердца отклонялось назад) существенно увеличивало амплитуду Т-волны на вентральной поверхности грудной клетки (Рис. 3, Б). Так, изменение наклона продольной оси сердца от 0° до 30° увеличивало амплитуду Т-волны в отведении, соответствующем прекардиальному отведению V1 у человека, более чем в два раза. При дальнейшем повороте сердца в сагиттальной плоскости (от 30° до 90°) амплитуда Т-волны продолжала увеличиваться, но уже в меньшей степени.

А



Б

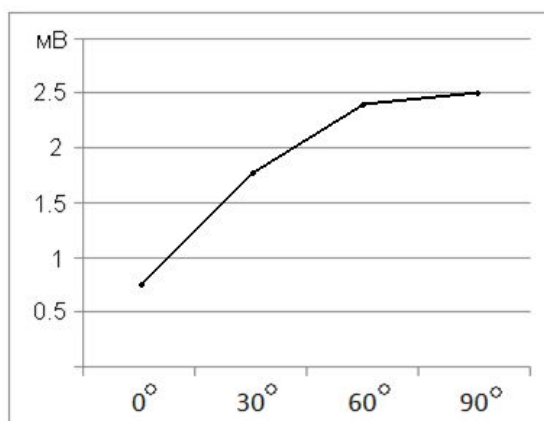


Рис. 3. Амплитуда Т-волны у собаки (в отведении, аналогичном прекардиальному отведению VI у человека), смоделированная при разном угле наклона продольной оси сердца в сагиттальной (А) и фронтальной (Б) плоскостях

При повороте сердца в сагиттальной плоскости, в отличие от поворота во фронтальной плоскости, распределение потенциала на поверхности туловища изменялось незначительно (Рис. 2, Б). Положительный экстремум оставался примерно на том же самом месте, а отрицательный смещался ближе к середине дорсальной поверхности.

Обсуждение

Преимущество модельного подхода к изучению влияния ориентации сердца на формирование кардиоэлектрического поля на поверхности туловища очевидно: в эксперименте крайне затруднительно изменить ориентацию сердца в грудной клетке, и тем более невозможно последовательно, с равным интервалом изменять угол наклона сердца в отдельных анатомических плоскостях, сохраняя при этом исходные физиологические условия; в то же время моделирование предоставляет практически неограниченные возможности для исследования.

Данная работа является продолжением нашего предыдущего исследования [2]. В предыдущей работе при изучении влияния формы торса и положения сердца в грудной клетке на формирование кардиоэлектрического поля мы ограничились двумя вариантами ориентации сердца и формы торса. Нами было показано, что ориентация сердца в существенно большей степени влияет на формирование кардиоэлектрического поля, нежели форма торса, однако данный вывод имел достаточно обобщенный характер.

В настоящей работе мы более детально исследовали влияние ориентации сердца на формирование кардиоэлектрического поля. Наклон продольной оси сердца пошагово изменяли в широком диапазоне во фронтальной и сагиттальной плоскостях, поскольку именно в этих направлениях наблюдается отклонение продольной оси сердца как у человека, так и у таких экспериментальных животных, как кошка, собака, кролик. Моделирование показало, что наклон сердца в разных анатомических плоскостях по-разному изменяет кардиоэлектрическое поле: наклон в сагиттальной плоскости изменяет в основном амплитуды потенциалов, а наклон сердца во фронтальной плоскости изменяет как амплитуды потенциалов, так и их распределение на поверхности туловища.

Полученные результаты способствуют лучшему пониманию механизмов формирования кардиоэлектрического поля. В частности, они объясняют сходство кардиоэлектрического поля, формирующегося в ST-T период на поверхности туловища собаки, кролика и кошки, несмотря на существенные различия в последовательности

реполяризации эпикардиальной поверхности желудочков сердца у этих животных [1]. Согласно результатам моделирования, этот феномен обусловлен различиями в ориентации сердца: у кролика и кошки ориентация сердца во фронтальной плоскости близка к вертикальной, а у собаки наклон сердца во фронтальной плоскости составляет около 30°; в результате этого по-другому направленный суммарный вектор реполяризации у собаки генерирует кардиоэлектрическое поле, похожее на поле у кошки и кролика.

Несмотря на то, что представленные результаты получены в рамках модели собаки, они достаточно универсальны и могут быть использованы при анализе кардиоэлектрического поля как у других видов животных, так и у человека.

Заключение

Моделирование показало, что наклон сердца в сагиттальной плоскости существенно изменяет амплитуды кардиоэлектрических потенциалов, а наклон сердца во фронтальной плоскости изменяет как амплитуды потенциалов, так и их распределение на поверхности туловища.

Список литературы

1. Азаров Я.Э. Гетерогенность реполяризации желудочков сердца животных: дис. ... д-ра биол. наук. – Сыктывкар, 2009. – 279 с.
2. Артеева Н.В., Рощевская И.М., Витязев В.А., Шмаков Д.Н., Рощевский М.П. Влияние формы торса и положения сердца в грудной клетке на формирование кардиоэлектрических потенциалов на поверхности туловища собаки // Бюл. эксперим. биол. мед. – 2005. – Т. 140, № 8. – С. 130-132.
3. Ахметзянова С.В., Киблер Н.А., Нужный В.П., Артеева Н.В., Шмаков Д.Н. Влияние антиортостатической гипокинезии на последовательность деполяризации, реполяризации миокарда и гемодинамические показатели сердца собаки. // Известия КНЦ. – 2014. – № 1(17). – С. 43-50.
4. Витязев В.А., Шмаков Д.Н., Антонова Н.А., Азаров Я.Э., Артеева Н.В., Харин С.Н., Нужный В.П. Корреляция во времени процесса интрамуральной деполяризации желудочков сердца и распределения потенциалов кардиоэлектрического поля собаки *Canis Familiaris* // Журн. эвол. биохим. физиол. – 2007. – Т. 43, № 4. – С. 362-365.
5. Титомир Л.И. Электрический генератор сердца. – М.: Наука, 1980. – С. 371.
6. Arteyeva N.V., Azarov J.E., Vityazev V.A. et al. Action potential duration gradients in the heart ventricles and the cardiac electric field during ventricular repolarization (a model study) // J Electrocardiol. – 2015. – V. 48, № 4. – P. 678-685.

7. Nguyen U.C., Potse M., Regoli F. et al. An in-silico analysis of the effect of heart position and orientation on the ECG morphology and vectorcardiogram parameters in patients with heart failure and intraventricular conduction defects // J Electrocardiol. – 2015. – V. 48, № 4. – P. 617-625.
8. Sathananthan G., Aggarwal G., Zahid S. et al. Computed tomography-guided in vivo cardiac orientation and correlation with ECG in individuals without structural heart disease and in age-matched obese and older individuals // Clin Anat. – 2015. – V. 28, № 4. – P. 487-493.