

А.Ш.Ревишвили, В.В.Калинин, О.С.Ляджина, Е.А.Фетисова

ВЕРИФИКАЦИЯ НОВОЙ МЕТОДИКИ НЕИНВАЗИВНОГО ЭЛЕКТРОФИЗИОЛОГИЧЕСКОГО ИССЛЕДОВАНИЯ СЕРДЦА, ОСНОВАННОЙ НА РЕШЕНИИ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ ЭЛЕКТРОКАРДИОГРАФИИ

ИЦССХ им. А.Н.Бакулева РАМН, Москва

С целью верификации точности реконструкции внутрисердечных электрограмм путем их сравнения с чреспищеводными электрограммами и определения локализации аритмогенной зоны по неинвазивно построенным изохронным и изопотенциальным картам у пациентов с имплантированным электрокардиостимулятором обследовано 12 пациентов.

Ключевые слова: обратная задача электрокардиографии, кардиотопография, внутрисердечные электрограммы, чреспищеводные электрограммы, изохронные карты, изопотенциальные карты, компьютерная томография

To verify the accuracy of reconstruction of intracavitary electrograms by comparing the reconstructed intraesophageal electrograms with those recorded during transesophageal pacing and to locate the arrhythmogenic area using isochronous and isopotential non invasively built up maps in patients with implanted pacemaker, 12 patients were examined.

Key words: inverse electrocardiography problem, cardiopotography, intracavitary electrograms, transesophageal electrograms, isochronous maps, isopotential maps, computed tomography.

Нарушения сердечного ритма являются одной из важных причин временной или стойкой утраты трудоспособности, а также внезапной сердечной смерти (ВСС) [7]. Большие перспективы в лечении сердечных аритмий связаны с активным внедрением в клиническую практику новых методов электрофизиологической диагностики и интервенционных методов лечения [3].

Для успешного применения новых технологий необходима точная топическая диагностика аритмогенного очага - определение локализации субстрата для интервенционного или хирургического воздействия в миокарде. В настоящее время основным способом топической диагностики аритмий является инвазивное электрофизиологическое исследование (ЭФИ) сердца. Среди перспективных методов инвазивного ЭФИ сердца следует отметить мультиэлектродные методы с использованием электродов типа «basket» [15, 17], технологии электроанатомического картирования систем типа CARTO [8] и методики бесконтактного эндокардиального картирования на основе систем Ensite [13, 21]. Помимо регистрации комплекса эндокардиальных электрограмм, указанные методики обеспечивают построение изопотенциальных и изохронных карт с привязкой к анатомическим структурам сердца.

В настоящее время рядом научно-исследовательских групп активно развиваются методы неинвазивного электрофизиологического исследования сердца, основанные на решении так называемой обратной задачи электрокардиографии. Принцип данных методов заключается в численной реконструкции электрофизиологических процессов в сердце человека путем математической обработки данных многоканальной регистрации ЭКГ с поверхности тела [16]. Обратная задача электрокардиографии известна в нескольких постановках.

Обратной задачей электрокардиографии в терминах эпикардиальных потенциалов называется задача вычислительной реконструкции потенциала электричес-

кого поля на эпикардиальной поверхности сердца по данным многоканальной регистрации ЭКГ на поверхности грудной клетки [20]. При постановке обратной задачи электрокардиографии используется следующая модель. Грудная клетка представляет собой проводник второго рода с линейной электропроводностью, ограниченный диэлектрической средой - воздухом. Электрическое поле сердца рассматривается в рамках электродинамики стационарных токов. Первичные источники электрического поля в пространстве между поверхностью грудной клетки и эпикардиальной поверхностью сердца отсутствуют. На поверхности грудной клетки из-за наличия границы проводник-воздух нормальная составляющая напряженности электрического поля принимается равной нулю. Показано, что данная модель достаточно точно описывает электрическое поле сердца, ее погрешность сопоставима с погрешностью стандартной электрокардиографической аппаратуры [9].

С математической точки зрения обратная задача электрокардиографии в терминах потенциалов является задачей Коши для уравнения Лапласа в неоднородной среде. Это линейная краевая задача с неограниченным обратным оператором [5]. Доказано, что в рамках рассмотренной модели возможно осуществить гармоническое продолжение потенциала электрического поля сердца от поверхности торса на всю область грудной клетки вплоть до эпикардиальной поверхности сердца. Другими словами, по распределению потенциала электрического поля сердца в заданный момент времени на поверхности грудной клетки можно однозначно вычислить распределение потенциала на эпикарде, т.е. по поверхностной изопотенциальной карте построить изопотенциальную эпикардиальную карту. По реконструированным эпикардиальным картам для множества моментов времени кардиоцикла возможно осуществить реконструкцию монополярных и биполярных эпикардиальных электрограмм в каждой точке

эпикарда и построить изохронные эпикардиальные карты. Таким образом, электрофизиологические методики на основе обратной задачи электрокардиографии позволяют неинвазивным путем получить информацию, по диагностической ценности сопоставимую с результатами инвазивного ЭФИ сердца.

Понятие обратной задачи электрокардиографии (Inverse Problem in Electrocardiography) было введено видными электрофизиологами R.Plonsey, R.C.Barr, B.Taccardi в конце 60-х - начале 70-х годов 20 века [1, 18]. Первый работоспособный алгоритм решения обратной задачи электрокардиографии в терминах эпикардиальных потенциалов был предложен в 1981 г. В.В.Шапкиным [12]. Большую роль в развитии теории методики сыграли исследования Л.И.Титомира и соавторов [9, 10]. Одно из первых клинических испытаний электрофизиологической методики на основе решения обратной задачи электрокардиографии проводилось в середине 80 годов в НЦ ССХ им. А.Н.Бакулева [2]. К сожалению, несовершенство вычислительной техники того времени, отсутствие возможности использования компьютерно-томографических методик не позволили широко внедрить методику в клиническую практику.

Важным этапом на пути решения обратной задачи электрокардиографии стали результаты многолетних исследований группы Вашингтонского университета (Сент-Луис, США) возглавляемой проф. Y.Rudy. Сотрудниками Y.Rudy была разработана технически совершенная система поверхностной многоканальной регистрации ЭКГ, включающая 240 однополюсных отведений. Для решения обратной задачи электрокардиографии и визуализации результатов исследования использовались реалистичные цифровые трехмерные модели сердца и торса, которые строились по данным рентгенографии грудной клетки в двух проекциях или спиральной компьютерной томографии грудной клетки. Разработанная авторами методика получила название Noninvasive Electrocardiographic Imaging (ECGI). Проведенное на основе данной методики неинвазивное эпикардиальное картирование для небольшой группы пациентов с имплантированным электрокардиостимулятором, манифестирующим синдромом WPW, трепетанием предсердий I типа позволило получить интересные электрофизиологические результаты [19].

Аналогичную методику под названием Noninvasive Imaging of Cardiac Electrophysiology (NICE) представила группа исследователей из медицинского университета Инсбрука (Австрия). Отличия методики от разработки американских коллег заключались в применении магнитно-резонансной томографии для построения трехмерных моделей торса и сердца и использования существенно меньшего числа ЭКГ отведений на поверхности грудной клетки. Методика использовалась для выявления локализации дополнительных путей проведения при синдроме WPW [14].

Несмотря на значительные успехи, достигнутые рядом научно-исследовательских групп, остаются актуальными задачи разработки более эффективных методов решения обратной задачи электрокардиографии и совершенствования методов электрофизиологической диагностики на ее основе.

В 2006 г. в НЦ ССХ им. А.Н.Бакулева разработан современный программно-аппаратный комплекс для неинвазивного электрофизиологического исследования сердца на основе решения обратной задачи электрокардиографии. Возможности комплекса включают реконструкцию монополярных и биполярных электрограмм в интерактивно выбранных точках полости грудной клетки и эпикардиальной поверхности сердца, а также построение изопотенциальных и изохронных карт на эпикардиальной поверхности реалистичных трехмерных моделей сердца [4]. Важными особенностями реализованной методики является учет электрической неоднородности тканей грудной клетки и применение более совершенных математических алгоритмов, позволяющих повысить точность реконструкции электрического поля сердца.

Одной из важных задач, стоящих на пути внедрения разработанной электрофизиологической методики в клиническую практику, является проверка точности вычислительной реконструкции эпикардиальных электрограмм и оценка разрешающей способности методики при определении локализации аритмогенных зон. Прямая проверка точности неинвазивной реконструкции эпикардиальных электрограмм предполагает проведение инвазивного эпикардиального картирования. Однако при картировании на открытом сердце происходит искажение формы эпикардиальных электрограмм из-за возникновения границы раздела «эпикард-воздух», порождающей вторичные источники электрического поля. Наиболее корректная верификация неинвазивного эпикардиального картирования возможна на основе инвазивного эпикардиального электроанатомического картирования с использованием трансперикардиального доступа [6]. Однако техническая сложность такой процедуры достаточно высока. Более простой путь - верификация методики по результатам реконструкции внутрипищеводных электрограмм.

Пищевод непосредственно прилежит к задней стенке левого предсердия и проходит на весьма близком расстоянии от задней поверхности левого желудочка, в связи с чем внутрипищеводные электрограммы незначительно отличаются от эпикардиальных электрограмм, зарегистрированных в ближайших от пищевода точках задней поверхности сердца. Поэтому положительные результаты реконструкции внутрипищеводных электрограмм позволяют с высокой долей вероятности сделать заключение о правильности реконструкции эндокардиальных электрограмм.

Для проверки точности определения локализации аритмогенной зоны по неинвазивно построенным изопотенциальным и изохронным картам в качестве модельного источника удобно выбрать эндокардиальный электрод имплантированного электрокардиостимулятора. Стимуляционный электрод в этом случае надежно фиксирован, и его локализация определяется с точностью, ограниченной лишь разрешающей способностью компьютерного томографа.

Таким образом целями настоящего исследования явились верификация точности реконструкции внутриполостных электрограмм путем сравнения реконструированных внутрипищеводных электрограмм с элект-

рограммами, зарегистрированными экспериментально в процессе чреспищеводного электрофизиологического исследования и проверка точности определения локализации аритмогенной зоны по неинвазивно построенным изохронным и изопотенциальным картам у пациентов с имплантированным электрокардиостимулятором.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Обследовано 12 пациентов (7 мужчин, 5 женщин в возрасте от 17 до 52 лет), госпитализировавшихся в период с января 2007 по июнь 2007 года в отделение хирургического лечения тахиаритмий НЦ ССХ им. АН.Бакулева. У 5 пациентов отмечалась пароксизмальная атриовентрикулярная тахикардия, для дифференциальной диагностики которой проводилось чреспищеводное ЭФИ. Из них у 4 был выявлен скрытый синдром WPW с пароксизмами ортодромной тахикардии. Семь пациентов поступили для плановой проверки электрокардиостимулятора, имплантированного по поводу синдрома слабости синусового узла (2 случая) и атриовентрикулярной блокады (5 случаев).

Чреспищеводное ЭФИ проводилось по стандартному протоколу с использованием комплекса для электрофизиологических исследований Polysystem-EP/L («КардиоЭФИ»), производства ЗАО «Медитек» («Астрокорд»). Всем пациентам проводилась неинвазивная реконструкция электрического поля сердца, включавшая построение комплекса эпикардиальных электрограмм, изопотенциальных и изохронных карт на эпикардиальной поверхности сердца. У 5 пациентов, которым проводилось чреспищеводное ЭФИ, дополнительно проводилась реконструкция внутрипищеводных электрограмм в точках локализации внутрипищеводных электродов.

Неинвазивная реконструкция электрического поля сердца осуществлялась по следующей методике (рис. 1). Всем пациентам проводилось многоканальная регистрация ЭКГ в 80 однополюсных отведениях с поверхности грудной клетки с использованием системы картирования «Cardiag 128.1» (Чехия). Для картирования использовались одноразовые хлор-серебряные электроды «Nessler Medizintechnik», применяемые в системах суточного мониторинга ЭКГ. Четырем пациентам поверхностное картирование проводи-

лось одновременно с регистрацией внутрипищеводных электрограмм.

После регистрации комплекса поверхностных ЭКГ пациентам с наложенными поверхностными электродами и введенным пищеводным зондом проводилась спиральная компьютерная томография грудной клетки (сканер «Imatron Evolution C-150») с внутривенным контрастированием. Использовался шаг спирали 7 мм для сканирования всей грудной клетки и шаг спирали 3 мм для сканирования области сердца. По данным компьютерной томографии определялись трехмерные координаты центра каждого электрода для поверхностного картирования. У пациентов с пищеводным зондом определялись координаты внутрипищеводных электродов, у пациентов с имплантированным электрокардиостимулятором определялись координаты стимуляционного электрода (рис. 2).

На поперечных томографических сечениях выделялись контуры грудной клетки, эпикардиальной поверхности сердца. По выделенным контурам с использованием системы трехмерного моделирования «Rhino3.12» строились реалистичные сплайновые 3D модели торса,

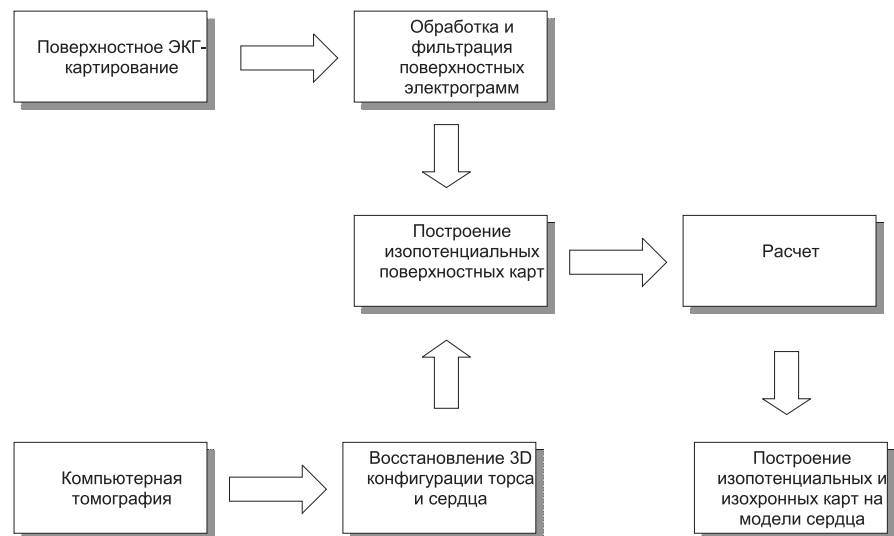


Рис. 1. Схема методики исследования.

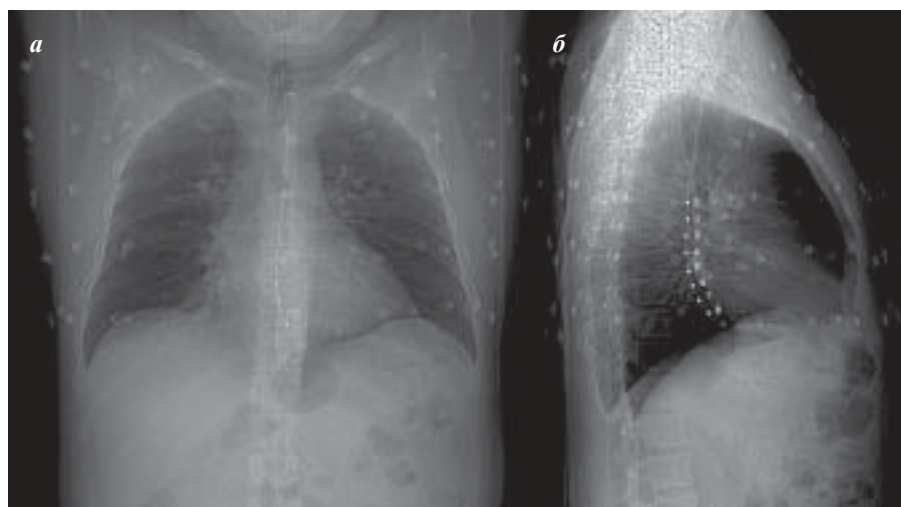


Рис. 2. Компьютерная томография грудной клетки с введенным пищеводным зондом и электродами для поверхностного картирования, реконструкция передней (а) и левой боковой (б) рентгенологических проекций; цифрами указаны номера внутрипищеводных отведений.

сердца и межжелудочковой перегородки (рис. 3). Дальнейшая обработка информации осуществлялась с использованием специализированного программного пакета (авторы - А.В.Калинин, А.А.Вдовиченко, А.А.Усепехов).

Программный пакет имел следующую структуру.

1. Препроцессор, осуществляющий построение в автоматическом режиме конечно-элементной и гранично-элементной адаптивной сетки расчетных областей.
2. Вычислительный процессор, осуществляющий реконструкцию потенциала электрического поля сердца.
3. Постпроцессор, осуществляющий построение изопотенциальных и изохронных карт на трехмерных моделях торса и сердца, а также реконструкцию ЭКГ и электрограмм в интерактивно выбираемых точках эпикардиальной и эндокардиальной поверхностей сердца и стенки пищевода.

Для вычислительной реконструкции эпикардиальных потенциалов использовался новый итерационный алгоритм решения обратной задачи электрокардиографии. Алгоритм основывался на последовательном решении переопределенных смешанных краевых задач для уравнения Лапласа [5]. Решение данных задач осуществлялось на основе техники граничных элементов. В качестве методов регуляризации применялся стабилизирующий функционал А.Н.Тихонова I порядка и ограничение числа итераций. Параметры регуляризации определялись на основе принципа обобщенной невязки [11].

Реконструированные внутрипищеводные электрограммы сравнивались с электрограммами, зарегистрированными при чреспищеводном ЭФИ. Рассчитывалось максимальное и среднеквадратичное отклонение реконструированных сигналов от экспериментальных. У пациентов с имплантированным ЭКС по полученным изопотенциальным и изохронным картам на трехмерных моделях сердца определялись области ранней активации, соответствующие локализации источника стимуляционной эктопии. Выявленная локализация модельного эктопического источника сравнивалась с координатами точки имплантации эндокардиального электрода, определенными по данным компьютерной томографии грудной клетки.

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Сопоставление реконструированных и снятых в процессе чреспищеводного ЭФИ внутрипищеводных электрограмм показало их хорошее совпадение (рис. 4). Среднеквадратичная погрешность реконструкции составила 6,2-7,1. Реконструированные

электрограммы, при сохранении их формы, отличались несколько меньшей амплитудой. Максимальное отклонение реконструированного сигнала от экспериментального по амплитуде составило 1,4-1,7 мВ (8,8-11,3%) и наблюдалось в вершинах зубцов Р и R. Такое уменьшение амплитуды может быть связано с наличием воздуха (диэлектрика) в полости пищевода, что не учитывалось в модели для численной реконструкции, а также сглаживающим эффектом регуляризации Тихонова в вычислительном алгоритме.

Необходимо отметить, что и экспериментально зарегистрированные внутрипищеводные электрограммы также содержали определенную шумовую составляющую. Уровень «наводок» экспериментальных электрограмм, определенный как отклонение сигнала от нуля на интервале P-Q, составлял около 0,5 мВ (3,1% от максимальной амплитуды сигнала). Таким образом, численная реконструкция позволяет получить достаточно точные внутрипищеводные электрокардиографические сигналы, сопоставимые с погрешностью реальных измерений.

Изохронные карты и динамика деполяризации миокарда, когда источником стимуляционной эктопии является эндокардиальный электрод имплантированного электрокардиостимулятора, представлены на рис 5. Область ранней активации, определенная по реконструированным эпикардиальным картам, весьма точно соответствовала месту фиксации эндокардиального электрода. Расстояние между точкой проекции на эндокард стимуляционного электрода и точкой ранней активации составляло в исследуемой группе от 1,8 до 3,2 мм (в среднем $2,1 \pm 0,8$ мм). Реконструированные изопотенциальные карты позволяли получить информацию о локализации эктопического источника по отношению к эпикарду и эндокарду. Когда деполяризация миокарда

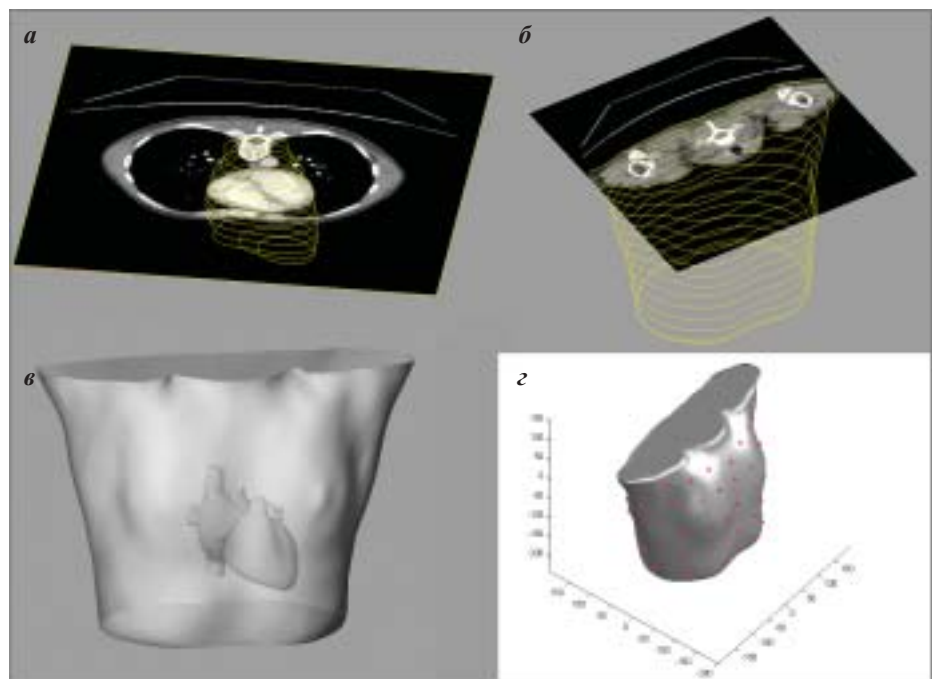


Рис. 3. Этапы построения 3D моделей: а, б - выделение контуров поперечных сечений сердца и торса по данным компьютерной томографии, в - построение реалистичных 3D моделей торса и сердца, г - привязка точек наложения поверхностных электродов.

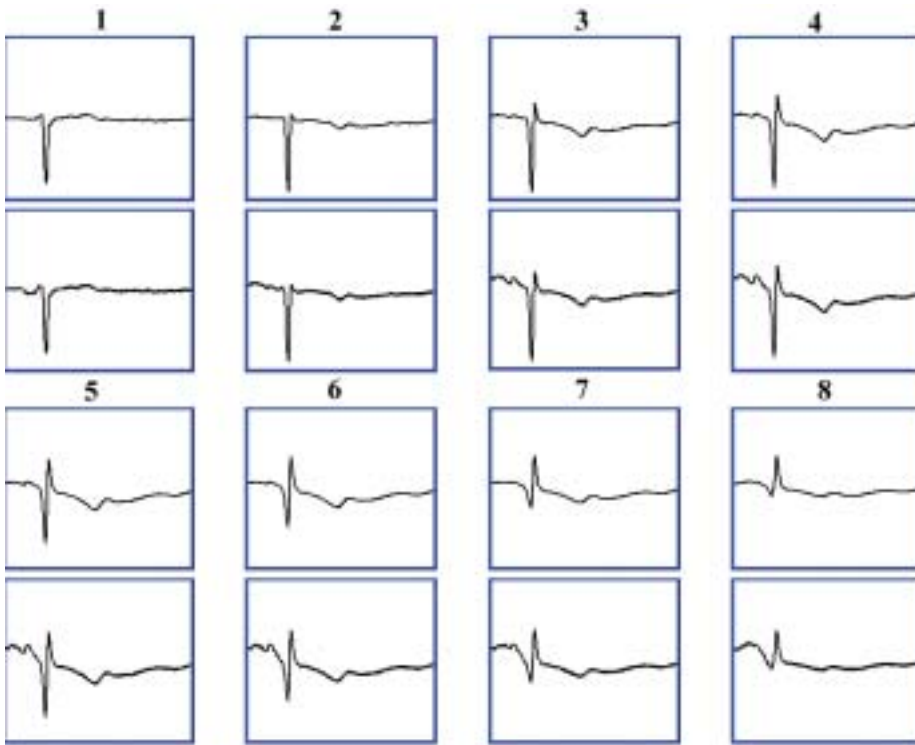


Рис. 4. Реконструированные (первый и третий ряд) и экспериментально зарегистрированные (второй и четвертый ряд) внутрипищеводные электрограммы пациента Б.

вызывалась импульсом с эндокардиального электрода электрокардиостимулятора, на изопотенциальных эпикардиальных картах область ранней активации выглядела как область положительного потенциала. Это соответствовало движению фронта волны деполяризации миокарда от эндокарда к эпикарду и, следовательно, свидетельствовало об эндокардиальной локализации эктопического источника.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Результаты проверки неинвазивной электрофизиологической методики на основе решения обратной задачи электрокардиографии показали ее достаточно высокую точность при реконструкции внутрипищеводных электрограмм и определении локализации модельного эктопического источника. Реконструкция внутрипищеводных электрограмм была сопоставима с погрешностями экспериментальной регистрации при чреспищеводном ЭФИ. Погрешность определения точки локализации эктопического источника была меньше диаметра зоны аблационного воздействия (обычно 3-5мм). Точность представленной электрофизиологической методики, в силу некорректности обратной задачи электрокардиографии, в первую очередь определяется применяемым математическим алгоритмом реконструкции электрического поля сердца. Для повышения точности методики перспективным является использование априорной информации о характере эпикардиального потенциала.

Помимо вычислительно-математических аспектов, важными источниками погрешности электрофизиологической методики являются:

1. Дрейф изолинии и наличие «наводок» при поверхностном ЭКГ-картировании.
2. Смещение электродов при компьютерной томографии по отношению их позиции при поверхностном ЭКГ-картировании.
3. Дыхательные движения грудной клетки, вследствие которых позиция сердца по отношению к грудной клетке различается при компьютерной томографии и поверхностном ЭКГ-картировании.

Определенным ограничением рассматриваемой методики является возможность осуществления лишь эпикардиального картирования, тогда как большинство инвазив-

ных электрофизиологических методик ориентированы на проведение эндокардиального картирования. Однако полученные результаты показали достаточно высокую точность определения по эпикардиальным картам локализации эндокардиально расположенного модельного эктопического источника.

Отметим также, что до 30% субстратов патологической желудочковой активности (болезнь Чагаса, постинфарктные желудочковые тахикардии) располагается субэпикардиально или интрамурально. В таких случаях возможна ситуация, когда эндокардиальное картирование выявляет область широкой активации, не соответствующей критериям аритмогенной зоны, и только эпикардиальное картирование позволяет успешно локализовать аритмогенный источник [6]. В указан-

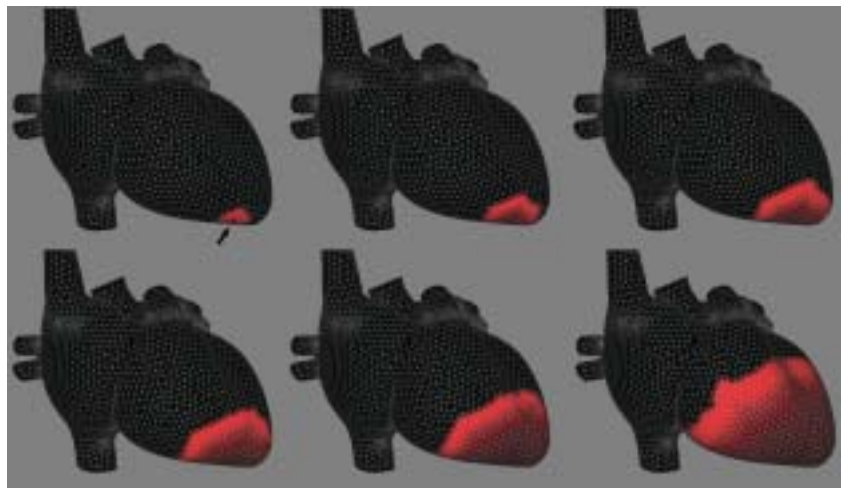


Рис. 5. Реконструированная динамика деполяризации желудочков, вызываемая стимулом электрокардиостимулятора; стрелкой указана проекция области имплантации электрода.

ных случаях применение неинвазивного эпикардального картирования представляется весьма перспективным.

В целом результаты испытания методики свидетельствуют о ее высокой диагностической ценности и перспективности применения в предоперационном обследовании. Предварительно проведенная топическая диагностика аритмогенного субстрата позволит сократить время инвазивного поиска эктопического очага, правильно выбрать параметры аблационного воздействия, сократить время интраоперационной флюороскопии.

ВЫВОДЫ

1. Электрофизиологическая методика на основе решения обратной задачи электрокардиографии позволяет неинвазивным путем с высокой точностью реконструировать электрограммы в отведениях, требующих инвазивного доступа.

2. Построенные на основе данной методики изопотенциальные и изохронные карты на эпикардальной поверхности сердца позволяют с достаточно высокой степенью точности выявлять зоны ранней активации и локализацию эктопического очага.

Благодарности. Выражаем искреннюю благодарность руководителю отделения компьютерной и магниторезонансной томографии НЦ ССХ им. А.Н.Бакулева д.м.н. В.Н.Макаренко и сотруднику отделения компьютерной и магниторезонансной томографии НЦ ССХ им. А.Н.Бакулева к.м.н. С.А.Александровой за помощь в организации и проведении компьютерно-томографических исследований.

ЛИТЕРАТУРА

1. Барр Р., Спек М. Решения обратной задачи, выраженные непосредственно в форме потенциала. В кн.: Теоретические основы электрокардиологии. Пер. с англ. М.: Медицина 1979.
2. Бокерия Л.А., Шакин В.В., Мирский Г.В., Полякова И.П. Численные методы электрофизиологической оценки состояния сердца. М.: Вычислительный центр АН СССР 1987.
3. Бокерия Л.А. Тахикардии: Диагностика и хирургическое лечение. М: Медицина 1989.
4. Калинин В.В., Калинин А.В., Ревешвили А.Ш. Программный комплекс для исследования обратной задачи электрокардиологии. Материалы международного конгресса «Кардиостим» 2006.
5. Калинин А.В., Калинин В.В. Вычислительная реконструкция эпикардальных потенциалов на основе итерационного альтернирующего алгоритма. Материалы международного конгресса «Тихонов и современная математика». М.: 2006.
6. Покушалов Е.А., Туров А.Н., Шугаев П.Л., Артеменко С.Л. Радиочастотная абляция желудочковой тахикардии трансперикардальным доступом. Вестник аритмологии. 2006;44:58–62.
7. Ревешвили А.Ш. Катетерная абляция тахикардий: современное состояние проблемы и перспективы развития. Вестник аритмологии 1998; 8: 70.
8. Ревешвили А.Ш., Рзаев Ф.Г., Джетыбаева С.К. Электрофизиологическая диагностика и интервенционное лечение сложных форм нарушения ритма сердца с использованием системы трехмерного электроанатомического картирования. Вестник аритмологии 2004;34:32-37.
9. Титомир Л.И., Кнеппо П. Математическое моделирование биоэлектрического генератора сердца. М.: Наука. Физматлит 1999.
10. Титомир Л.И., Трунов В.Г., Айду Э.А.И. Неинвазивная электрокардиотопография. М.: Наука 2003.
11. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач. М.: Наука 1986.
12. Шакин В.В. Вычислительная электрокардиография. М.: Наука 1981.
13. Asirvatham S, Packer DL. Validation of non-contact mapping to localize the site of simulated pulmonary vein ectopic foci. *Circulation*. 2000;102:441.
14. Berger T., Fisher G., Pfeifer B. et al. Single-Beat Non-invasive Imaging of Cardiac Electrophysiology of Ventricular Pre-Excitation. *J. Am. Coll. Cardiol.*, 2006; 48:2045-2052.
15. Barbaro V., Bartolini P., Calcagnini G. et al. Mapping the organization of atrial fibrillation with basket catheters part I: Validation of a real-time algorithm. *Pace-Pacing and Clinical Electrophysiology*. 2001; 24:1082-1088.
16. MacLeod R.S., Brooks D.H. Recent progress in inverse problem in electrocardiology. *IEEE Eng. in Med. Bio. Mag.* 1998; 17:1:pp.78-83.
17. Michelucci A, Bartolini P, Calcagnini G. et al. Mapping the organization of atrial fibrillation with basket catheters part II: Regional patterns in chronic patients. *Pace-Pacing and Clinical Electrophysiology*. 2001;24:1089-1096.
18. Plonsey R. *Bioelectric phenomena*. New York, 1969.
19. Ramanathan, C., R.N. Ghanem, R.N., Jia P., Ryu K., Rudy Y. Electrocardiographic Imaging (ECGI): A Noninvasive Imaging Modality for Cardiac Electrophysiology and Arrhythmia. *Nature Medicine* 2004; 10:422-428.
20. Rudy Y., Messinger-Rapport B.J. The inverse problem in electrocardiography: Solutions in terms of epicardial potentials. *CRC Crit. Rev. Biomed. Eng.* 1988; 16: 216-268.
21. Schilling R.J., Kadish A.H., Peters N.S. et al. Endocardial mapping of atrial fibrillation in the human right atrium using a non-contact catheter. *European Heart Journal*. 2000; 21: 550-564.

ВЕРИФИКАЦИЯ НОВОЙ МЕТОДИКИ НЕИНВАЗИВНОГО ЭЛЕКТРОФИЗИОЛОГИЧЕСКОГО
ИССЛЕДОВАНИЯ СЕРДЦА, ОСНОВАННОЙ НА РЕШЕНИИ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ
ЭЛЕКТРОКАРДИОГРАФИИ

А.Ш.Ревшвили, В.В.Калинин, О.С.Ляджина, Е.А.Фетисова

С целью верификации точности реконструкции внутриполостных электрограмм (Эг) путем сравнения реконструированных внутрипищеводных Эг с Эг, зарегистрированными экспериментально в процессе чреспищеводного (ЧП) электрофизиологического исследования (ЭФИ) и проверки точности определения локализации аритмогенной зоны по неинвазивно построенным изохронным и изопотенциальным картам у пациентов с имплантированным электрокардиостимулятором (ЭКС) обследовано 12 пациентов (7 мужчин, 5 женщин в возрасте от 17 до 52 лет), госпитализировавшихся в период с января 2007 по июнь 2007 года в отделение хирургического лечения тахикардий НЦ ССХ им. АН.Бакулева. У 5 пациентов отмечалась пароксизмальная атриовентрикулярная тахикардия, для дифференциальной диагностики которой проводилось ЧП ЭФИ. Из них у 4 был выявлен скрытый синдром WPW с пароксизмами ортодромной тахикардии. Семь пациентов поступили для плановой проверки ЭКС. Всем пациентам проводилась неинвазивная реконструкция электрического поля сердца, включавшая построение комплекса эпикардальных Эг, изопотенциальных и изохронных карт на эпикардальной поверхности сердца. Выполнялась многоканальная регистрация ЭКГ в 80 однополюсных отведениях с поверхности грудной клетки с использованием системы картирования «Cardiag 128.1» (Чехия) и спиральная компьютерная томография грудной клетки (сканер «Imatron Evolution C-150») с внутривенным контрастированием. Сопоставление реконструированных и реальных ЧП Эг показало их хорошее совпадение. Среднеквадратичная погрешность реконструкции составила 6,2-7,1. Область ранней активации, определенная по реконструированным эпикардальным картам, весьма точно соответствовала месту фиксации эндокардиального электрода ЭКС. Расстояние между точкой проекции на эндокард стимуляционного электрода и точкой ранней активации составляло в исследуемой группе от 1,8 до 3,2 мм (в среднем $2,1 \pm 0,8$ мм). Таким образом электрофизиологическая методика на основе решения обратной задачи электрокардиографии позволяет неинвазивным путем с высокой точностью реконструировать электрограммы в отведениях, требующих инвазивного доступа; построенные на основе данной методики изопотенциальные и изохронные карты на эпикардальной поверхности сердца позволяют с достаточно высокой степенью точности выявлять зоны ранней активации и локализацию эктопического очага.

VERIFICATION OF A NOVEL TECHNIQUE OF NON INVASIVE ELECTROPHYSIOLOGICAL STUDY BASED
ON THE INVERSE ELECTROCARDIOGRAPHY PROBLEM

A.Sh. Revishvili, V.V. Kalinin, O.S. Lyadzhina, E.A. Fetisova

To verify the accuracy of reconstruction of intracavitary electrograms (EG) by comparing reconstructed intraesophageal EGs with those recorded in the study during the transesophageal pacing and of location of arrhythmogenic area using isochronous and isopotential non invasively built up maps in patients with implanted pacemaker, 12 patients (7 men and 5 women aged 17 52 years) admitted from January 2007 to June 2007 to the Department of Surgery of Tachyarrhythmias of Bakulev Scientific Center for Cardiovascular Surgery were examined. Five patients had paroxysmal atrio ventricular tachycardia, for its differential diagnosis, transesophageal pacing was performed; in four ones of them, the latent WPW syndrome with paroxysms of orthodromic tachycardia was revealed. Seven patients were admitted to the hospital for the scheduled check up of pacemakers. In all patients, the non invasive reconstruction was performed of the cardiac electric field including construction of a complex of epicardial electrograms, isopotential and isochronous maps in the epicardial surface. The multichannel ECG recording from 80 surface thoracic unipolar leads, using the mapping system “Cardiag 128.1” (Czech Republic), and the chest spiral computer tomography using the scanner “Imatron Evolution C 150” with intravenous contrasting were carried out. The comparison of reconstructed and real transesophageal electrograms showed their close correlation. The mean square error of the reconstruction was 6.2 7.1. The area of early activation determined according to the reconstructed epicardial maps rather closely corresponded to the site of fixation of the pacemaker endocardial electrode. The distance between the point of projection of the pacing electrode to the endocardium and the point of early activation in the study group was 1.8 3.2 mm (mean 2.1 ± 0.8 mm). Thus, the electrophysiological technique grounded on the solution of the inverse electrocardiography problem permits one to reconstruct the electrograms, non invasively with a high accuracy, from the leads requiring non invasive access. Isopotential and isochronous maps plotted using the technique suggested allow one to reveal areas of early activation and location of ectopic focus with rather high accuracy.