

Неинвазивное электрофизиологическое картирование сердца: от разработок к практике

Для корреспонденции:

Максим Валерьевич Яшков,
y.maksim541@gmail.com

Поступила в редакцию 19 ноября 2020 г.

Исправлена 9 декабря 2020 г.

Принята к печати 14 декабря 2020 г.

Цитировать:

Артюхина Е.А., Яшков М.В., Ревшвили А.Ш. Неинвазивное электрофизиологическое картирование сердца: от разработок к практике. *Патология кровообращения и кардиохирургия*. 2020;24(4):33-41. <http://dx.doi.org/10.21688/1681-3472-2020-4-33-41>

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 19-15-00406 «Исследование электрофизиологических механизмов и разработка методов интервенционного лечения жизнеугрожающих желудочковых аритмий на основе неинвазивного картирования сердца»).

ORCID ID

Е.А. Артюхина, <https://orcid.org/0000-0001-7065-0250>

М.В. Яшков, <https://orcid.org/0000-0003-3997-8252>

А.Ш. Ревшвили, <https://orcid.org/0000-0003-1791-9163>

© Е.А. Артюхина, М.В. Яшков,

А.Ш. Ревшвили, 2020

Статья открытого доступа,

распространяется по лицензии

[Creative Commons Attribution 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Е.А. Артюхина, М.В. Яшков, А.Ш. Ревшвили

Федеральное государственное бюджетное учреждение «Национальный медицинский исследовательский центр хирургии имени А.В. Вишневского» Министерства здравоохранения Российской Федерации, Москва, Российская Федерация

В современной интервенционной аритмологии системы инвазивного эндокардиального картирования позволяют устранить аритмии с высокой степенью эффективности. Однако системы инвазивного картирования имеют ряд недостатков, например инвазивность метода, что требует специальной подготовки и имеет ряд ограничений; невозможность одновременного определения электрофизиологических процессов во всем сердце; сложность картирования при расположении очага аритмии в труднодоступных анатомических структурах, локализации очага на эпикардиальной поверхности сердца или эпизодических и трудноиндуцируемых аритмиях во время оперативного вмешательства.

В связи с этим в клинической практике появилась необходимость разработки и внедрения систем поверхностного неинвазивного электрофизиологического картирования. Основное отличие поверхностного неинвазивного электрофизиологического картирования от других методик заключается в том, что после обработки всей информации возможно получить не отдельно зарегистрированные сигналы и сведения от нескольких камер сердца, а целостную картину электрофизиологических процессов в сердце в реальном времени.

В статье рассматривается история разработки и внедрения в практику поверхностного неинвазивного электрофизиологического картирования сердца. Показаны возможности применения данного метода диагностики при лечении пациентов с различными видами аритмии. Описана краткая методика проведения такой диагностики. Представлены направления развития данного метода: разработка и совершенствование системы для визуализации процессов в сердце в реальном времени для улучшения лечения пациентов с нарушениями ритма сердца, внедрение данных неинвазивного картирования в системы инвазивного электроанатомического картирования сердца, интеграция с системами для неинвазивной аблации (γ-излучения).

Система неинвазивного картирования — современный, прогрессивный и постоянно развивающийся метод диагностики, позволяющий визуализировать электрофизиологические процессы в сердце человека неинвазивным путем с высокой точностью и на дооперационном этапе определить тактику лечения, интервенционный подход и выбрать оптимальную технологию для лечения пациентов с различными нарушениями ритма сердца.

Ключевые слова: магнитно-резонансная томография; мультиспиральная компьютерная томография; нарушение ритма сердца; обратная задача электрокардиографии; поверхностное неинвазивное электрофизиологическое картирование сердца

Введение

Основным и самым первым диагностическим методом исследования в клинической аритмологии является электрокардиография (ЭКГ), в основе которой лежит регистрация и исследование электрических полей, образующихся при работе сердца [1]. Принцип метода заключается в регистрации электрической активности сердца и получении электрокардиограмм с поверхности тела. Электрокардиография позволяет выявить нарушение ритма сердца, но в некоторых случаях данный метод имеет ограничения. Например, недостаточная чувствительность низковольтажных электрических сигналов, таких как предсердные волны, или нечеткое формирование некоторых элементов ЭКГ, что затрудняет измерение интервалов и интерпретацию электрокардиограммы.

С течением времени в практике появились и укрепилась методы инвазивного электрофизиологического исследования и картирования сердца, позволяющие в реальном времени строить электроанатомические карты, на которых отображаются зоны ранней и поздней активности, и верифицировать зоны низкоамплитудной активности, которые могут соответствовать зонам фиброза или рубцов. Данные системы позволяют проводить подробное электроанатомическое картирование любой камеры сердца с высокой точностью.

Однако системы инвазивного картирования имеют ряд недостатков, например: инвазивность, что требует специальной подготовки и имеет ограничения; невозможность одновременного определения электрофизиологических процессов во всем сердце; сложность картирования при расположении очага аритмии в труднодоступных анатомических структурах, локализации очага на эпикардиальной поверхности сердца или эпизодических и трудноиндуцируемых аритмиях во время оперативного вмешательства. В связи с этим в клинической практике появилась необходимость разработки и внедрения систем поверхностного неинвазивного электрофизиологического картирования.

Основное отличие поверхностного неинвазивного электрофизиологического картирования от других методик заключается в том, что после обработки всей информации возможно получить не отдельно зарегистрированные сигналы, а целостную

картину электрофизиологических процессов в сердце в реальном времени.

В статье представлен обзор литературы об истории, клиническом применении и перспективах развития поверхностного неинвазивного электрофизиологического исследования сердца.

История разработки поверхностного неинвазивного картирования сердца

При создании системы неинвазивного картирования необходимо было решить прямую и обратную задачи ЭКГ [2]. При решении прямой задачи исследованы формирование ЭКГ и причины ее изменения. С обнаружением связи плотности источников сигнала с функциональным состоянием и патологическими изменениями миокарда получена возможность моделирования ЭКГ при разных отклонениях от нормы. Наиболее важной целью для реализации методики поверхностного картирования было решение обратной задачи — реконструкции электрических потенциалов на миокард сердца по измерениям потенциала на поверхности грудной клетки с учетом индивидуальной геометрии торса и сердца и внутренней неоднородности грудной клетки.

В 1977 г. исследователи R.C. Barr и M.S. Spach экспериментальным путем разработали метод определения коэффициентов переноса, которые связывают распределение потенциала эпикарда и поверхность тела друг с другом [4]. Метод основан на знании расположения каждого электрода и наличия достаточного количества электродов для установления геометрической формы и распределения потенциала с эпикардиальной поверхности и поверхности тела [3–5].

В 2004 г. С. Ramanathan с соавт. представили первые данные успешного применения неинвазивного картирования у пациентов с блокадой правой ножки пучка Гиса, с блокадой левой ножки пучка Гиса, трепетанием предсердий, при стимуляции правого и левого желудочков и у пациента с нормальным синусовым ритмом. На пациентов накладывался специальный жилет с 224 электродами, подключенный к многоканальной системе картирования Body Surface Potentials. Далее выполняли компьютерную томографию сердца. Электрокардиографические сигналы и данные компьютерной томографии обрабатывались с помощью программного обеспечения

CADIS, разработанного с применением вычислительного пакета MATLAB (Mathematical software) [6].

В 2005 г. R.N. Ghanem с соавт. сравнили данные при поверхностном картировании сердца с данными при прямом инвазивном картировании эпикарда во время операции на открытом сердце у 3 пациентов [7]. В результате исследования совпадение неинвазивного и инвазивного картирования составило до 1 см.

A. Intini с соавт. представили первый опыт успешного клинического применения неинвазивной методики визуализации аритмии у спортсмена с фокальной желудочковой тахикардией, возникающей из дивертикула левого желудочка [8]. Данные неинвазивного картирования были сопоставимы с данными активационных карт, построенных при инвазивном картировании.

В 2006 г. Y. Rudy с соавт. применили новый метод поверхностного неинвазивного электрофизиологического картирования у 8 пациентов с имплантированными устройствами для сердечной ресинхронизирующей терапии [9]. Выполняли запись и обработку данных поверхностного картирования во время спонтанного ритма и при различных видах стимуляции (правого и левого желудочков и бивентрикулярной стимуляции). Поверхностное неинвазивное электрофизиологическое картирование показало индивидуальность активации ритма у данных больных как при спонтанном ритме, так и при стимуляции, что может быть связано с вариабельным клиническим ответом на сердечную ресинхронизирующую терапию.

В клиническом случае Y. Wang с соавт. продемонстрировали применение поверхностного неинвазивного электрофизиологического картирования у пациента с атипичным трепетанием предсердий после операции Cox – Maze [10]. Авторы отметили, что при поверхностном картировании создается полная карта активации в течение одного сердечного цикла, что позволяет наблюдать за электрофизиологическим процессом в сердце от сокращения к сокращению, в отличие от инвазивного катетерного картирования, при котором построение активационной карты проводится по точкам и требует данных от многих сердечных сокращений.

Параллельно над неинвазивным картированием в мире работали несколько групп ученых. Так, T. Berger с соавт. применили неинвазивное картиро-

вание для диагностики дополнительных путей при синдроме Вольфа – Паркинсона – Уайта. Отличительной особенностью данной работы было использование магнитно-резонансной томографии (МРТ) сердца и уменьшение количества электродов на поверхности грудной клетки пациентов. В исследовании включили 7 пациентов с синдромом Вольфа – Паркинсона– Уайта. Данные неинвазивного картирования сердца сопоставлены с данными инвазивного картирования с применением системы Carto. В ходе исследования показана точность неинвазивного картирования до $18,7 \pm 5,8$ мм [11].

P.M. van Dam с соавт. описали применение метода поверхностного неинвазивного электрофизиологического картирования на 3 пациентах: с нормальным сердечным ритмом, с синдромом Вольфа – Паркинсона – Уайта, с синдромом Бругады. В каждом случае записана ЭКГ в 64 отведениях, далее выполнена МРТ сердца. На основе полученных данных построены индивидуальные модели сердца, включающие расположение потенциалов как на эпи-, так и на эндокардиальной поверхности сердца [12].

C. Han с соавт., X. Zhang с соавт. и C. Liu с соавт. выполняли работы по оценке точности системы неинвазивного картирования 3D cardiac electrical imaging (3DCEI) [13–15]. Проведены исследования *in vivo* на животных, в ходе которых одновременно измерялись потенциалы с поверхности тела и внутрисердечные биполярные электрические сигналы во время стимуляции из желудочков. Геометрия сердца и туловища животного построены на основе данных предоперационной МРТ. Авторы продемонстрировали, что при применении системы 3DCEI возможно определить источник желудочкового возбуждения и показать последовательность активации сердца с высокой степенью точности.

Несмотря на то что над разработкой неинвазивного поверхностного картирования сердца трудились несколько групп, только Y. Rudy с соавт. удалось создать систему для практического применения — ECVUE (Cardio Insight Technologies, США). Однако у системы ECVUE есть недостатки: для получения геометрии торса и сердца используются данные компьютерной томографии, а построение электрофизиологических карт возможно только на эпикардиальной поверхности сердца.

В 2006 г. в России в отделении лечения тахикардий НМИЦ ССХ им. А.Н. Бакулева разработали

программный комплекс неинвазивного поверхностного электрофизиологического исследования сердца, идея которого предложена А.Ш. Ревিশвили и группой ученых Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.

Параллельно с разработкой поверхностного неинвазивного электрофизиологического картирования А.М. Denisov с соавт. работали над решением обратной задачи электрокардиографии [16–18].

Для оценки достоверности системы в 2008 г. А.Ш. Ревিশвили с соавт. провели верификацию точности реконструкции внутрисердечных электрограмм путем сравнения реконструированных внутрисердечных электрограмм с зарегистрированными экспериментально в процессе чреспищеводного электрофизиологического исследования, а также определения локализации аритмогенной зоны по неинвазивно построенным изохронным изопотенциальным картам у пациентов с имплантированным электрокардиостимулятором [19].

В 2015 г. А.Ш. Ревিশвили с соавт. провели мультицентровое исследование по оценке достоверности неинвазивного эпи- и эндокардиального картирования. В первой группе пациентов с имплантированными устройствами водителя ритма и ресинхронизирующими устройствами во время записи многоканальной поверхностной ЭКГ выполняли стимуляцию с предсердного или желудочкового электрода кардиостимулятора с частотой 80 уд./мин. Далее пациентам осуществляли компьютерную томографию или МРТ сердца с поверхностно расположенными электродами. Модель сердца и точку стимуляции, полученные при использовании программного комплекса для неинвазивного картирования, сравнивали с истинным анатомическим расположением электродов кардиостимулятора. В ходе исследования по оценке точности локализации точки стимуляции получены данные: правое предсердие 10,8 + 5,4 мм, правый желудочек 7,7 + 5,8 мм, левый желудочек 7,9 + 5,7 мм. Во второй группе 5 пациентам во время интервенционного лечения фибрилляции предсердий с использованием системы нефлюороскопической электроанатомической трехмерной навигации на синусовом ритме выполняли стимуляцию сердца в разных точках. Далее сравнивали зоны инвазивной стимуляции и зоны ранней активности при неинвазивном поверх-

ностном картировании. При оценке данных получены результаты: правое предсердие 7,4 + 2,7 мм, левое предсердие 6,9 + 2,3 мм, правый желудочек 6,5 + 2,1 мм, левый желудочек 6,4 + 2,2 мм [20].

Поверхностное картирование в настоящее время

Поверхностное неинвазивное картирование сердца — рутинный метод исследования во всем мире. Так, ряд исследований демонстрирует возможность применения поверхностного неинвазивного электрофизиологического картирования в выборе позиции имплантации левожелудочкового электрода для ресинхронизирующей терапии у пациентов с блокадой левой ножки пучка Гиса. U. Nguyen с соавт. и S. Zubarev с соавт. показали, что с опорой на данные поверхностного неинвазивного электрофизиологического картирования у пациентов с блокадой левой ножки пучка Гиса можно выбрать оптимальную точку имплантации левожелудочкового электрода для повышения клинической эффективности ресинхронизирующей терапии [21; 22].

G. Cheniti с соавт. применяли поверхностное неинвазивное электрофизиологическое картирование для понимания механизма и дальнейшего лечения пациентов с желудочковыми нарушениями ритма [23]. L. Parreira с соавт. показали высокую точность определения источника желудочкового нарушения ритма методом поверхностного неинвазивного электрофизиологического картирования с последующей успешной радиочастотной аблацией [24].

O. Gharbia с соавт. описали визуализацию зоны постинфарктного рубца и ее влияние на поддержание желудочковой тахикардии при помощи поверхностного неинвазивного электрофизиологического картирования [25].

Поверхностное неинвазивное электрофизиологическое картирование позволило совершить большой шаг в понимании механизмов, лежащих в основе синдрома Бругады, ассоциированного с высоким риском внезапной сердечной смерти [26–28].

Y. Rudy с соавт. продемонстрировали возможность поверхностного неинвазивного электрофизиологического картирования в диагностике предсердных аритмий [29].

Так, S. Yamashita с соавт. описали клинический случай устранения левопредсердной фокусной тахикардии, опираясь на данные неинвазивного

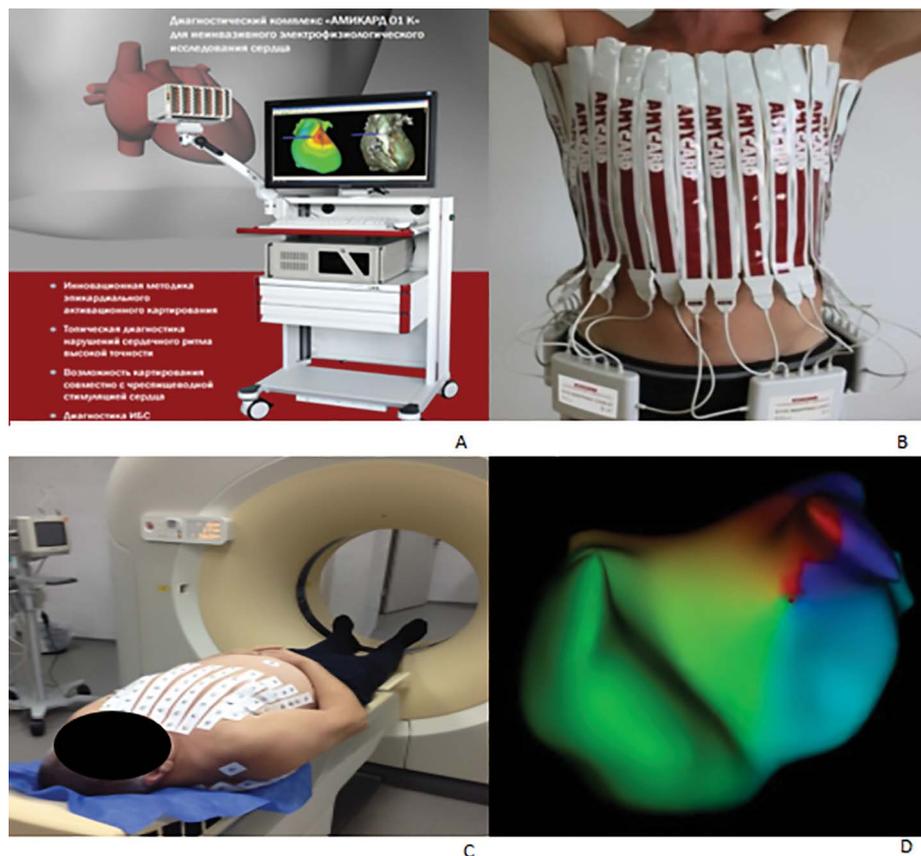
Рис. 1. Этапы проведения неинвазивного электрофизиологического картирования сердца:

комплекс для многоканальной поверхностной регистрации электрокардиографии (А);

поверхностное электрокардиографические картирование (В);

компьютерно-томографическое исследование с поверхностными электродами (С);

реконструированная 3D-модель сердца с построенной изопотенциальной картой (D)



и высокоплотного инвазивного картирования [30]. В ходе работы авторы показали совпадение очага аритмии при сравнении поверхностных и инвазивных карт.

Для определения механизма одной из распространенных аритмий — фибрилляции предсердий — выполнен ряд работ. Так, Р.М. Voyle с соавт. продемонстрировали возможности комбинированной диагностики поверхностного неинвазивного электрофизиологического картирования и МРТ с гадолинием для выявления механизма фибрилляции предсердий и дальнейшего лечения пациентов [31].

Все описанные работы демонстрируют, что данные поверхностного неинвазивного электрофизиологического картирования способны дать точное представление о процессах в сердце, определить тактику лечения и вид оперативного вмешательства.

Однако система имеет ряд недостатков и ограничений: в связи с недостаточной визуализацией индивидуальной анатомии сердца выполнить точное

картирование очага аритмии бывает достаточно сложно, что может повлиять на результат исследования. Некоторые аритмии, например фибрилляция предсердий, не поддаются картированию, однако в этом направлении проводятся исследования.

Поверхностное неинвазивное электрофизиологическое картирование сердца происходит в несколько этапов. На первом этапе выполняется поверхностная многоканальная регистрация ЭКГ с выбором участков записи для анализа. Для этого одноразовые полоски с 8 электродами ЭКГ накладываются вертикально по всей окружности грудной клетки, с которых синхронно регистрируют ЭКГ в 224 однополюсных отведениях, 6 стандартных отведениях от конечностей и 6 грудных отведениях. На втором этапе выполняется компьютерная томография с контрастным усилением или МРТ с гадолинием для анатомической разметки электродов и получения топографоанатомического положения сердца (рис. 1).

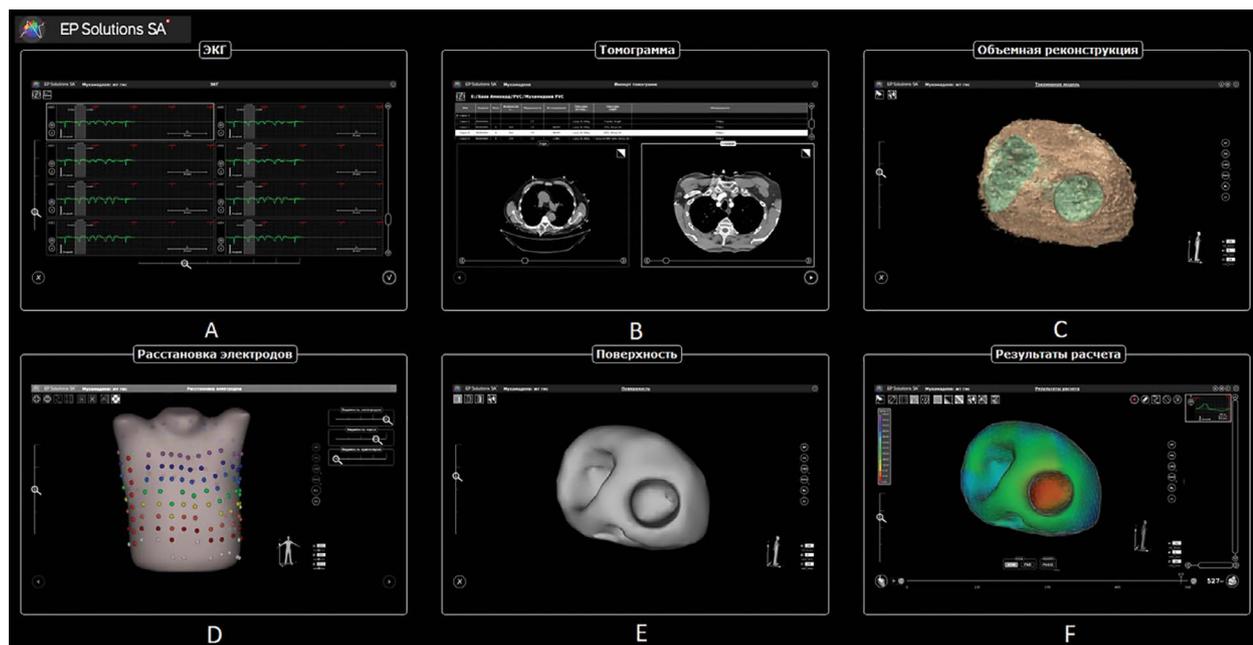


Рис. 2. Этапы обработки данных на программном комплексе для неинвазивного картирования: выбор участка электрокардиографии (А); выбор серии томограмм для дальнейшей 3D-обработки (В); 3D-реконструкция камер сердца (С); расстановка электродов на поверхности тела с привязкой к электрокардиографии (D); оценка 3D-реконструированной камеры сердца (E); построение изопотенциальных и изохронных карт (F)

На третьем этапе проводится обработка ЭКГ и данных компьютерной томографии или МРТ на программном комплексе «Амикард 01С». Каждый сигнал ЭКГ привязывается к соответствующему электроду на реконструированной поверхности тела. Далее выполняется построение эпи- и эндокардиальной 3D-моделей интересующей камеры сердца или всего сердца целиком, на которых строятся изопотенциальные и изохронные карты (рис. 2).

Изопотенциальные карты отображают распределения потенциала электрического сигнала в сердце в каждый момент времени сердечного сокращения, с опорой на цветовую схему дают информацию о механизме и очаге аритмии.

Изохронные карты дают представление о последовательном возбуждении миокарда на протяжении одного сердечного сокращения предсердий и желудочков.

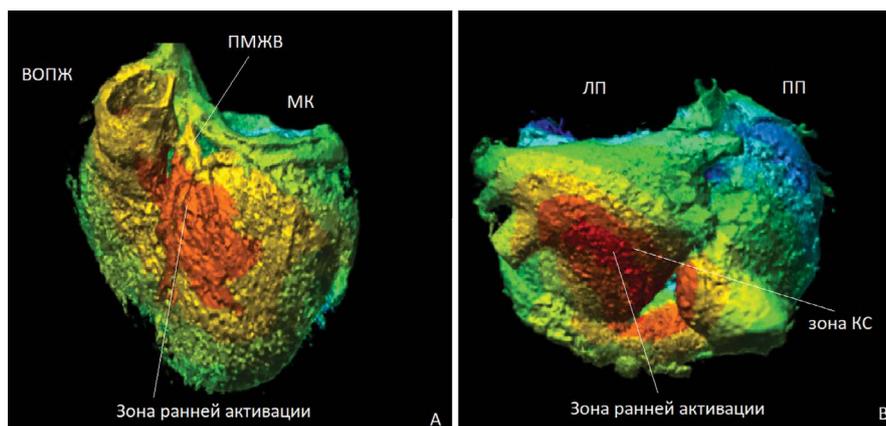
В Национальном медицинском исследовательском центре хирургии имени А.В. Вишневского с использованием поверхностного неинвазивного

электрофизиологического картирования постоянно проходят обследование и успешно оперируются с помощью интервенционных методов пациенты с наджелудочковыми и желудочковыми нарушениями ритма сердца типичной и атипичной локализаций (рис. 3).

В настоящее время выполняется ряд клинических перспективных исследований с применением поверхностного неинвазивного электрофизиологического картирования для изучения механизмов жизнеугрожающих желудочковых нарушений ритма, используются протоколы верификации точности поверхностного неинвазивного электрофизиологического картирования и происходит постоянное усовершенствование методики картирования. Разработан и внедрен в практику метод интеграции активационных карт, полученных неинвазивным картированием в систему инвазивной электроанатомической трехмерной навигации, что позволило уменьшить время картирования и повысить эффективность устранения сложных нарушений ритма сердца.

Рис. 3. Картирование эктопической желудочковой активности: изопотенциальная карта эктопической желудочковой из передней межжелудочковой ветви (А); изопотенциальная карта эктопической наджелудочковой активности из зоны коронарного синуса (В)

Примечание. ВОПЖ — выводной отдел правого желудочка; МК — митральный клапан; ПМЖВ — передняя межжелудочковая ветвь; ЛП — левое предсердие; ПП — правое предсердие; КС — коронарный синус.



Перспективы поверхностного неинвазивного электрофизиологического картирования

Развитие методики имеет следующие направления:

- разработка и усовершенствование системы для визуализации процессов в сердце в реальном времени для улучшения лечения пациентов с нарушением ритма сердца;
- внедрение новых технологий для визуализации структур сердца — электроимпедансной томографии [32];
- внедрение данных неинвазивного картирования в системы инвазивного электроанатомического картирования сердца;
- интеграция с системами для неинвазивной абляции (γ -излучения); исследования показали возможность использования технологии CyberHeart для неинвазивной изоляции устьев легочных вен [33].

Заключение

По данным мировой литературы и согласно нашему опыту, поверхностное неинвазивное электрофизиологическое картирование в клинической практике неинвазивного картирования — современный прогрессивный и постоянно развивающийся метод диагностики, позволяющий неинвазивным путем с высокой точностью визуализировать электрофизиологические процессы в сердце человека и на дооперационном этапе определить тактику лечения, интервенционный подход и выбрать оптимальную технологию для лечения нарушений ритма сердца.

Список литературы / References

1. Орлов В.Н. *Руководство по электрокардиографии*. М.: Московское медицинское агентство; 1997. [Orlov V.N. *Guide to electrocardiography*. Moscow: Moscow Medical Agency; 1997. (In Russ.)]
2. Шакин В.В. *Вычислительная электрокардиография*. М.: Наука; 1981. [Shakin V.V. *Computational electrocardiography*. Moscow: The science; 1981. (In Russ.)]
3. Plonsey R. *Bioelectric Phenomena*. 1th ed. New York: McGraw-Hill Inc.; 1969.
4. Barr R.C., Spach M.S. *Inverse solutions directly in terms of potentials*. In: Nelson C.V., Geselowitz D.B. editors. *The Theoretical Basis of Electrocardiography*. Oxford: Clarendon Press; 1976. pp. 294-304.
5. Franzone P.C., Taccardi B., Viganotti C. An approach to inverse calculation of epicardial potentials from body surface maps. *Adv Cardiol*. 1978;21:50-54. PMID: 619568. <https://doi.org/10.1159/000400421>
6. Ramanathan C., Ghanem R.N., Jia P., Ryu K., Rudy Y. Noninvasive electrocardiographic imaging for cardiac electrophysiology and arrhythmia. *Nat Med*. 2004;10(4):422-428. PMID: 15034569, PMCID: PMC1950745. <https://doi.org/10.1038/nm1011>
7. Ghanem R.N., Jia P., Ramanathan C., Ryu K., Markowitz A., Rudy Y. Noninvasive Electrocardiographic Imaging (ECGI): Comparison to intraoperative mapping in patients. *Heart Rhythm*. 2005;2(4):339-354. PMID: 15851333, PMCID: PMC1949041. <https://doi.org/10.1016/j.hrthm.2004.12.022>
8. Intini A., Goldstein R.N., Jia P., Ramanathan C., Ryu K., Giannattasio B., Gilkeson R., Stambler B.S., Brugada P., Stevenson W.G., Rudy Y., Waldo A.L. Electrocardiographic imaging (ECGI), a novel diagnostic modality used for mapping of focal left ventricular tachycardia in a young athlete. *Heart Rhythm*. 2005;2(11):1250-1252. PMID: 16253916, PMCID: PMC2000800. <https://doi.org/10.1016/j.hrthm.2005.08.019>
9. Rudy Y. Noninvasive electrocardiographic imaging of cardiac resynchronization therapy in patients with heart failure. *J Electrocardiol*. 2006;39(4):S28-S30. PMID: 16950331, PMCID: PMC1959340. <https://doi.org/10.1016/j.jelectrocard.2006.03.012>
10. Wang Y., Cuculich P.S., Woodard P.K., Lindsay B.D., Rudy Y. Focal atrial tachycardia after pulmonary vein isolation: noninvasive mapping with electrocardiographic imaging (ECGI). *Heart Rhythm*. 2007;4(8):1081-1084. PMID: 17675084, PMCID: PMC2078529. <https://doi.org/10.1016/j.hrthm.2007.04.014>

11. Berger T., Fischer G., Pfeifer B., Modre R., Hanser F., Trieb T., Roithinger F.X., Stuehlinger M., Pachinger O., Tilg B., Hintringer F. Single-beat noninvasive imaging of cardiac electrophysiology of ventricular pre-excitation. *J Am Coll Cardiol.* 2006;48(10):2045-2052. PMID: 17112994. <https://doi.org/10.1016/j.jacc.2006.08.019>
12. van Dam P.M., Oostendorp T.F., Linnenbank A.C., van Oosterom A. Non-invasive imaging of cardiac activation and recovery. *Ann Biomed Eng.* 2009;37(9):1739-1756. PMID: 19562487, PMCID: PMC2721141. <https://doi.org/10.1007/s10439-009-9747-5>
13. Han C., Liu Z., Zhang X., Pogwizd S., He B. Noninvasive three-dimensional cardiac activation imaging from body surface potential maps: a computational and experimental study on a rabbit model. *IEEE Trans Med Imaging.* 2008;27(11):1622-1630. PMID: 18955177, PMCID: PMC2701977. <https://doi.org/10.1109/TMI.2008.929094>
14. Zhang X., Ramachandra I., Liu Z., Muneer B., Pogwizd S.M., He B. Noninvasive three-dimensional electrocardiographic imaging of ventricular activation sequence. *Am J Physiol Heart Circ Physiol.* 2005;289(6):H2724-H2732. PMID: 16085677. <https://doi.org/10.1152/ajpheart.00639.2005>
15. Liu C., Skadsberg N.D., Ahlberg S.E., Swingen C.M., laizzo P.A., He B. Estimation of global ventricular activation sequences by noninvasive three-dimensional electrical imaging: validation studies in a swine model during pacing. *J Cardiovasc Electrophysiol.* 2008;19(5):535-540. PMID: 18179521, PMCID: PMC2424247. <https://doi.org/10.1111/j.1540-8167.2007.01066.x>
16. Denisov A.M., Zakharov E.V., Kalinin A.V., Kalinin V.V. Numerical solution of the inverse electrocardiography problem with the use of the Tikhonov regularization method. *Moscow University Computational Mathematics and Cybernetics.* 2008;(32):61-68. <https://doi.org/10.3103/S0278641908020015>
17. Denisov A.M., Zakharov E.V., Kalinin A.V., Kalinin V.V. Numerical solution of an inverse electrocardiography problem for a medium with piecewise constant electrical conductivity. *Computational Mathematics and Mathematical Physics.* 2010;(50):1172-1177. <https://doi.org/10.1134/s0965542510070067>
18. Denisov A.M., Zakharov E.V., Kalinin A.V., Kalinin V.V. Numerical method for solving an inverse electrocardiography problem for a quasi stationary case. *Journal of Inverse and Ill-Posed Problems.* 2012;20(4):501-512. <https://doi.org/10.1515/jip-2012-0041>
19. Ревишвили А.Ш., Калинин В.В., Ляджина О.С., Фетисова Е.А. Верификация новой методики неинвазивного электрофизиологического исследования сердца, основанной на решении обратной задачи электрокардиографии. *Вестник аритмологии.* 2008;(51):7-13. [Revishvili A.Sh., Kalinin V.V., Lyadzina O.S., Fetisova E.A. Verification of a novel technique of non invasive electrophysiological study based on the inverse electrocardiography problem. *Journal of Arrhythmology.* 2008;(51):7-13. (In Russ.)]
20. Revishvili A.S., Wissner E., Lebedev D.S., Lemes C., Deiss S., Metzner A., Kalinin V.V., Sopov O.V., Labartkava E.Z., Kalinin A.V., Chmelevsky M., Zubarev S.V., Chaykovskaya M.K., Tsiklauri M.G., Kuck K.-H. Validation of the mapping accuracy of a novel non-invasive epicardial and endocardial electrophysiology system. *Europace.* 2015;17(8):1282-1288. PMID: 25643987, PMCID: PMC4535554. <https://doi.org/10.1093/europace/euu339>
21. Nguyễn U.C., Cluitmans M.J.M., Strik M., Luermans J.G., Gommers S., Wildberger J.E., Bekkers S.C.A.M., Volders P.G.A., Muhl C., Prinzen F.W., Vernooy K. Integration of cardiac magnetic resonance imaging, electrocardiographic imaging, and coronary venous computed tomography angiography for guidance of left ventricular lead positioning. *Europace.* 2019;21(4):626-635. PMID: 30590434. <https://doi.org/10.1093/europace/euy292>
22. Zubarev S., Chmelevsky M., Potyagaylo D., Budanova M., Trukshina M., Rud S., Ryzhkov A., Lebedev D. Noninvasive electrocardiographic imaging with magnetic resonance tomography in candidates for cardiac resynchronization therapy. In: 2019 Computing in Cardiology. 2019 September 8–11, Singapore. *IEEE.* 2020, p. 1–4. <https://doi.org/10.23919/CinC49843.2019.9005803>
23. Cheniti G., Puyo S., Martin C.A., Frontera A., Vlachos K., Takigawa M., Bourier F., Kitamura T., Lam A., Dumas-Pommier C., Pillois X., Pambrun T., Duchateau J., Klotz N., Denis A., Derval N., Cochet H., Sacher F., Dubois R., Jais P., Hocini M., Haissaguerre M. Noninvasive mapping and electrocardiographic imaging in atrial and ventricular arrhythmias (CardioInsight). *Card Electrophysiol Clin.* 2019;11(3):459-471. PMID: 31400870. <https://doi.org/10.1016/j.jcep.2019.05.004>
24. Parreira L., Carmo P., Adragão P., Pinho J., Budanova M., Zubarev S., Cavaco D., Marinheiro R., Carmo J., Costa F., Marques H., Goncalves P. Non-invasive electrocardiographic imaging in patients with idiopathic premature ventricular contractions from the right ventricular outflow tract: New insights into arrhythmia substrate. *J Electrocardiol.* 2019;57:69-76. PMID: 31514015. <https://doi.org/10.1016/j.jelectrocard.2019.08.046>
25. Gharbia O.A., Tao S., Lardo A.C., Halperin H., Wang L. Noninvasive electrocardiographic imaging of scar-related ventricular tachycardia: association with magnetic resonance scar imaging. In: 2018 Computing in Cardiology Conference. 2018 September 23–26, New York, USA. *IEEE.* 2018. p. 1–4. <https://doi.org/10.22489/CinC.2018.303>
26. Leong K.M.W., Ng F.S., Yao C., Yates S., Taraborrelli P., Linton N.W., Whinnett Z., LeFroy D., Davies D.W., Lim P.B., Peters N.S., Harding S.E., Kanagaratnam P., Varnava A. 146 contribution of conduction and repolarisation abnormalities to the type I Brugada pattern: a study using non-invasive electrocardiographic imaging. *Heart.* 2016;102(Suppl 6):A105-A106. <http://dx.doi.org/10.1136/heartjnl-2016-309890.146>
27. Rudic B., Chaykovskaya M., Tsyganov A., Kalinin V., Tülümen E., Papavassiliu T., Dösch C., Liebe V., Kuschyk J., Röger S., El-Battrawy I., Akin I., Yakovleva M., Zaklyazminskaya E., Shestak A., Kim S., Chmelevsky M., Borggreffe M. Simultaneous non-invasive epicardial and endocardial mapping in patients with Brugada syndrome: New insights into arrhythmia mechanisms. *J Am Heart Assoc.* 2016;5(11):e004095. PMID: 27930354, PMCID: PMC5210320. <https://doi.org/10.1161/JAHA.116.004095>
28. Chaykovskaya M., Chmelevsky M., Rudic B., Tueluemen E., Kalinin V. Noninvasive electrocardiographic imaging diagnosis of Brugada syndrome. In: 2019 Computing in Cardiology. 2019 September 8–11, Singapore. *IEEE.* 2020, p. 1–4. <https://doi.org/10.23919/CinC49843.2019.9005949>
29. Rudy Y., Cuculich P.S., Vijayakumar R. Advances in Non-invasive Electrocardiographic Imaging: Examples of Atrial Arrhythmias. In: Shenasa M., Hindricks G., Borggreffe M., Breithardt G., Josephson M.E. *Cardiac Mapping*, 4th ed. Hoboken: Blackwell Publishing Ltd; 2013. pp. 712-721. <https://doi.org/10.1002/9781118481585.ch65>
30. Yamashita S., Hooks D.A., Cheniti G., Jais P. High-density contact and noninvasive mapping of focal atrial tachycardia: Evidence of dual endocardial exits from an epicardial focus. *Pacing Clin Electrophysiol.* 2018;41(6):666-668. PMID: 29318634. <https://doi.org/10.1111/pace.13278>

31. Boyle P.M., Hakim J.B., Zahid S., Franceschi W.H., Murphy M.J., Vigmond E.J., Dubois R., Haissaguerre M., Hocini M., Jais P., Trayanova N.A., Cochet H. Comparing reentrant drivers predicted by image-based computational modeling and mapped by electrocardiographic imaging in persistent atrial fibrillation. *Front Physiol.* 2018;9:414. PMID: 29725307, PMCID: PMC5917348. <https://doi.org/10.3389/fphys.2018.00414>
32. Xu G., Wang R., Zhang S., Yang S., Justin G.A., Sun M., Yan W. A 128-electrode three dimensional electrical impedance tomography system. In: 2007 29th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. 2007 August 22–26, Lyon, France. *IEEE.* 2007, p. 4386–4389. <https://doi.org/10.1109/IEMBS.2007.4353310>
33. Sharma A., Wong D., Weidlich G., Fogarty T., Jack A., Sumanaweera T., Maguire P. Noninvasive stereotactic radiosurgery (CyberHeart) for creation of ablation lesions in the atrium. *Heart Rhythm.* 2010;7(6):802-810. PMID: 20156591. <https://doi.org/10.1016/j.hrthm.2010.02.010>

Non-invasive electrophysiological cardiac mapping from development to practice

Elena A. Artyukhina, Maksim V. Yashkov, Amiran Sh. Revishvili

A.V. Vishnevsky National Medical Research Center of Surgery, Moscow, Russian Federation

Corresponding author. Maksim V. Yashkov, y.maksim541@gmail.com

In modern interventional arrhythmology, invasive endocardial mapping systems can eliminate arrhythmias with a high degree of efficiency. However, invasive mapping systems have several disadvantages, such as: the invasiveness of the method, which requires some preparation and has a number of limitations; the impossibility of simultaneous determination of electrophysiological processes occurring throughout the heart; the complexity of mapping when the arrhythmia focus is located in hard-to-reach anatomical structures; localization of the focus on the epicardial surface of the heart and occasional and difficult-to-induce arrhythmias during surgery.

In clinical practice, it became necessary to develop and implement systems for superficial non-invasive electrophysiological mapping of the heart. The main difference between superficial non-invasive electrophysiological mapping of the heart and other techniques is that after processing all the information, it is possible to receive a holistic picture of electrophysiological processes occurring throughout the heart in real time instead of receiving separately recorded signals and information from several chambers of the heart.

In this article, we describe the history of the development and implementation of superficial non-invasive electrophysiological cardiac mapping and the potential use of the diagnostic method in treating the various types of arrhythmias. A brief technique of carrying out this diagnostic method is described. Further directions regarding the development and improvement of this research method are also discussed, such as developing and improving the system for visualizing heart processes occurring in real time, improving the treatment of patients with cardiac arrhythmias, introducing non-invasive mapping of heart data into the systems used for invasive electroanatomical mapping of the heart and integrating the method with systems for non-invasive ablation.

The non-invasive mapping system of the heart is a modern progressive and constantly evolving diagnostic method that enables visualizing the electrophysiological processes occurring in the human heart with high accuracy in a non-invasive manner. To determine tactics of treatment, decide on an interventional approach and select the optimal technology at the preoperative stage for treating patients with various rhythm disturbances in their hearts.

Keywords: cardiac arrhythmias; computed tomography; inverse problem of electrocardiography; magnetic resonance imaging; non-invasive electrophysiological mapping of the heart

Received 19 November 2020 r. Revised 9 December 2020 r. Accepted 14 December 2020 r.

Funding: The work is supported by a grant of the Russian Science Foundation (project No. 19-15-00406).

Conflict of interest: Authors declare no conflict of interest.

ORCID ID

E.A. Artyukhina, <https://orcid.org/0000-0001-7065-0250>

M.V. Yashkov, <https://orcid.org/0000-0003-3997-8252>

A.Sh. Revishvili, <https://orcid.org/0000-0003-1791-9163>

Copyright: © 2020 Artyukhina et al. This is an open access article distributed under the terms of the [Creative Commons Attribution 4.0 License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

How to cite: Artyukhina E.A., Yashkov M.V., Revishvili A.Sh. Non-invasive electrophysiological cardiac mapping from development to practice. *Patologiya krovoobrashcheniya i kardiokhirurgiya = Circulation Pathology and Cardiac Surgery.* 2020;24(4):33-41. (In Russ.) <http://dx.doi.org/10.21688/1681-3472-2020-4-33-41>