

ISSN 2311-4495
ISSN 2410-5155 (Online)
УДК 616.12-008.313

НЕИНВАЗИВНОЕ
ЭЛЕКТРОФИЗИОЛОГИЧЕСКОЕ
КАРТИРОВАНИЕ В ДИАГНОСТИКЕ
ЖЕЛУДОЧКОВЫХ АРИТМИЙ:
ОТ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
К КЛИНИЧЕСКОЙ ПРАКТИКЕ

М. П. Чмелевский, С. В. Зубарев, М. А. Буданова

ФГБУ «Северо-западный федеральный медицинский
исследовательский центр им. В. А. Алмазова»
Минздрава России, Санкт-Петербург, Россия

Контактная информация:

Чмелевский Михаил Петрович,
ФГБУ «СЗФМИЦ им. В. А. Алмазова»
Минздрава России, ул. Аккуратова, д. 2,
Санкт-Петербург, Россия, 197341.
E-mail: boxmch@almazovcentre.ru

*Статья поступила в редакцию 19.08.15
и принята к печати 05.09.15.*

Резюме

В статье рассматривается история неинвазивного электрофизиологического картирования сердца, дана сравнительная характеристика современных методов топической диагностики желудочковых аритмий, проводится анализ подходов к их электрофизиологической диагностике. Показано актуальное состояние технологии неинвазивного ЭКГ-имиджинга в топической диагностике желудочковых аритмий. Описываются возможные дальнейшие направления развития и совершенствования неинвазивной диагностики нарушений ритма сердца.

Ключевые слова: неинвазивное электрофизиологическое картирование, желудочковые аритмии, обратная задача электрокардиографии, мультиспиральная компьютерная томография, магнитно-резонансная томография.

Для цитирования: Чмелевский М. П., Зубарев С. В., Буданова М. А. Неинвазивное электрофизиологическое картирование в диагностике желудочковых аритмий: от научных исследований к клинической практике. 2015;2(5):91–103.

NON-INVASIVE ELECTROCARDIOGRAPHIC IMAGING OF VENTRICULAR ARRHYTHMIAS: FROM SCIENTIFIC RESEARCH TO CLINICAL PRACTICE

M. P. Chmelevsky, S. V. Zubarev, M. A. Budanova

Federal Almazov North-West Medical Research Centre,
Saint-Petersburg, Russia

Corresponding author:

Mikhail P. Chmelevsky,
Federal Almazov North-West Medical
Research Centre, 2 Akkuratova street,
St Petersburg, Russia, 197341.
E-mail: boxmch@almazovcentre.ru

Received 19 August 2015;
accepted 05 September 2015.

Abstract

The article deals with the history of noninvasive electrophysiological mapping of the heart. The comparative characteristic of modern methods of topical diagnosis of ventricular arrhythmias and different electrophysiological approaches are analyzed. The current state of non-invasive imaging (ECGI) technology for the topical diagnosis of ventricular arrhythmias are demonstrated. The possible future directions of development and improvement of non-invasive diagnosis of heart rhythm disorders are described.

Key words: noninvasive electrocardiographic imaging, ventricular arrhythmias, inverse electrocardiography problem, computed tomography, magnetic resonance imaging.

For citation: Chmelevsky MP, Zubarev SV, Budanova MA. Noninvasive electrocardiographic imaging of ventricular arrhythmias: from scientific research to clinical practice. Translational Medicine. 2015;2(5):91–103.

Введение

История электрофизиологической диагностики желудочковых аритмий (ЖА) неразрывно связана с историей развития и совершенствования электрокардиологии — науки, изучающей фундаментально-теоретические аспекты биоэлектрических процессов в сердце и прикладные аспекты электрокардиофизиологических методов исследования. Развитие электрокардиологии происходило своеобразными «скачками», соответствующими определенным этапам научно-технического прогресса в области биомедицинских технологий вообще и в области развития технологий регистрации биопотенциалов сердца и визуализации его анатомии — в частности. Примечательно, что прогресс в этих областях согласуется с общими принципами развития биомедицинской науки — вначале многочисленные фундаменталь-

ные исследования, а затем постепенное внедрение полученных разработок и технологий в клиническую практику.

Неинвазивное электрофизиологическое картирование — высокотехнологичный метод, включающий этап многоканальной регистрации биопотенциалов сердца, визуализационные томографические методики и сложные математические алгоритмы для обработки получаемых данных. Его возникновение, с одной стороны, говорит о том, что дальнейшее развитие новых технологий, по всей видимости, будет происходить на так называемых «перекрестках наук», а с другой стороны, показывает общую тенденцию совершенствования диагностических методов исследования — от инвазивных к неинвазивным.

История развития электрофизиологических методов диагностики желудочковых нарушений ритма сердца

В 1908 г. F. Kraus и G. F. Nicolai впервые с помощью электрокардиографа, созданного в 1903 г. W. Einthoven на основе струнного гальванометра, зарегистрировали желудочковые экстрасистолы (ЖЭ) [1], а в 1921 г. G. Robinson и G. Hergmann впервые опубликовали электрокардиограмму (ЭКГ) желудочковой тахикардии (ЖТ) у пациента, перенесшего инфаркт миокарда [2]. С тех пор вопрос о топической диагностике — возможности определения места возникновения желудочковых аритмий (ЖА) по форме комплексов QRS — привлекал к себе значительное внимание ученых и исследователей. С момента создания W. Einthoven в 1913 г. системы из трех стандартных отведений [3] и до 1944 г., когда F. Wilson предложил использовать 6 прекардиальных отведений от левой половины грудной клетки [4], топическая диагностика ЖА сводилась только к определению электрической оси регистрируемых ЖЭ и способам связать эти изменения с их локализацией в правом (ПЖ) или левом желудочках (ЛЖ) сердца. Одну из первых попыток по определению места возникновения ЖЭ по ЭКГ в 12 отведениях предпринял M. B. Rosenbaum в 1969 г. [5]. Он связал электрическую ось ЖЭ во фронтальной плоскости, ширину комплекса QRS и его форму по типу блокады правой (ПНПГ) или левой ножек пучка Гиса (ЛНПГ) в прекардиальных отведениях аксиальной плоскости с данными экспериментальных исследований и фактически разработал первую топографическую классификацию ЖЭ, основанную на векторном анализе комплексов QRS. Основное правило, разработанное M. B. Rosenbaum, говорит о том, что результирующий вектор комплекса QRS ЖЭ направлен в сторону противоположного желудочка. Также он выделил 4 класса экстрасистол в каждом желудочке: из передней/задней стенок, верхушки и базальных отделов.

С 1960-х годов — начала «современной эры» электрокардиологии (согласно J. P. Boineau [6]) — активно развиваются как инвазивные, так и неинвазивные методики, что приводит к значительному увеличению научных работ, посвященных экспериментальной и клинической электрофизиологии сердца. Этот процесс в значительной степени отразился также и на проблеме изучения топической диагностики ЖА.

В связи с развитием векторкардиографии (ВКГ) — метода, основанного на измерении потенциалов на поверхности торса при помощи системы из трех отведений и отображении их в виде вектора суммарного дипольного момента

электрического генератора сердца — некоторые исследователи пробовали использовать его для топической диагностики ЖА [7]. Более того, появились многочисленные отечественные и зарубежные подробные руководства по ВКГ [8–14]. Однако вследствие недостаточной точности и слишком большой сложности ВКГ не получила широкого распространения в повседневной клинической практике. Одной из причин исчезновения интереса к ВКГ стали работы нескольких исследователей на неоднородных физических моделях грудной клетки [15,16], которые показали, что значительные различия в размерах грудной клетки, легких, разные электропроводности тканей тела и другие индивидуальные физические особенности оказывают значительное влияние на конкретные значения параметров любых отведений, в т. ч. используемых при ВКГ. Таким образом, индивидуальные анатомические особенности пациентов, случайные погрешности в расположении электродов, фаза дыхания, поза испытуемого и другие условия исследования оказывают большое влияние на регистрируемую ВКГ при использовании любой системы отведений. Таким образом, интерес к методу постепенно стал снижаться, в том числе вследствие появления новых инвазивных методов электрофизиологического исследования (ЭФИ) сердца.

Начиная с 1940-х годов в электрофизиологии сердца начали развиваться экспериментальные инвазивные методы исследования. Это произошло благодаря созданию специальных катетеров, которые вводились в полость сердца и позволяли записывать в разных точках электрограммы (ЭГ). С 1970-х годов началось активное внедрение в клинику инвазивного ЭФИ, особенно после создания метода программированной эндокардиальной стимуляции и стандартизации методики ЭФИ сердца. Со временем стало понятно, что кроме классического стандартного ЭФИ сердца, у пациентов с ЖА возможно проводить картирование — исследование, направленное на определение локализации очага эктопии в желудочках сердца. Для проведения картирования обычно устанавливают электрод в область с устойчивыми характеристиками (ушко предсердия, коронарный синус), которая считается референтной точкой. Относительно него специальным картирующим электродом по определенной схеме измеряют время прихода возбуждения в различные отделы сердца и сравнивают полученные значения между собой и с поверхностной ЭКГ в нескольких отведениях. Регистрация ЭГ самой ранней пресистолической желудочковой активности позволяет установить локализацию источника аритмии. Позицию катетера также подтверждают

с помощью флюороскопических снимков, выполняемых в нескольких проекциях. В результате такого подхода появилась возможность картировать большое число ЖА с высокой точностью, а после создания метода радиочастотной катетерной абляции (РЧА) — устранять очаги аритмии. Однако иногда такое инвазивное картирование было невозможно. Так, одним из самых распространенных случаев было отсутствие ЖА во время операции или их нестабильный характер. Для решения этой проблемы было предложено стимуляционное картирование. Оно включало в себя стимуляцию электродом разных областей в желудочках сердца с одновременной записью 12 стандартных отведений ЭКГ и сравнение формы получаемого желудочкового стимуляционного комплекса с формой ЖА, записанных ранее. Таким образом также можно обнаружить очаг ЖА, однако в ряде случаев при использовании данного подхода могут возникать ошибки, связанные с разным положением тела пациента при регистрации ЭКГ, неодинаковым расположением грудных электродов и другими факторами. Кроме стимуляционного картирования, был разработан и другой подход для топической диагностики ЖА, связанный с анализом записываемых эндокардиальных ЭГ и поиском низкоамплитудных или фрагментированных ЭГ, которые характерны для аритмогенных анатомических областей желудочков сердца.

Возникновение инвазивного ЭФИ сердца и развитие методик картирования дало возможность по новому взглянуть на обычную 12-канальную ЭКГ. Стало понятно, что с их помощью можно эмпирическим способом выявить формы QRS комплекса при ЖА, характерные для конкретных анатомических областей. Так, в 1978–1982 гг. М. Josephson и L. Horowitz обнаружили, что у пациентов, перенесших инфаркт миокарда, ЖА с комплексами QRS в виде блокады ЛНПГ локализовались не только в ПЖ, но и в ЛЖ. С того времени было разработано большое количество ЭКГ критериев для топической диагностики ЖА с большей или меньшей точностью [17–24]. Все эти критерии и алгоритмы объединяет подход, основанный на подробном анализе формы QRS комплекса ЖА в 12 поверхностных отведениях ЭКГ. Многие авторы используют также анализ амплитуды QRS комплекса или отдельных его зубцов, а также различные соотношения между ними, в т. ч. анализ электрической оси желудочкового эктопического комплекса и переходной зоны в грудных отведениях. Эти критерии в настоящее время позволяют с достаточно высокой точностью, вплоть до 1–1,5 см локализовать эктопические очаги аритмии в ПЖ и ЛЖ сердца. Однако

большинство данных алгоритмов разработано для идиопатических ЖА, т. е. для пациентов без структурных изменений сердца. Безусловно, рядом авторов разрабатывались критерии для топической диагностики ЖА у пациентов разных клинических групп, например, с рубцовыми изменениями [25], но точность таких алгоритмов намного ниже. В этом играет определенную роль тот факт, что изменение проведения фронта волны возбуждения в миокарде при наличии рубцов оказывает значительное влияние на форму QRS комплекса. Кроме того, большинство алгоритмов были разработаны на основании эмпирического подхода сопоставления зон стимуляции и изменений комплекса QRS на 12-канальной поверхностной ЭКГ.

Описанная выше методика инвазивного электрофизиологического последовательного картирования от точки к точке с помощью специальных катетеров занимала достаточно много времени. Дальнейшее развитие компьютерных технологий способствовало появлению новых систем на основе электромагнитной навигации, позволяющих осуществлять электроанатомическое картирование сердца. Данные системы позволяют с точностью до 1 мм определять и локализовывать положение кончика катетера в пространстве, в то время как с помощью самого катетера регистрируются уни- и биполярные ЭГ. В результате в реальном времени генерируется электроанатомическая карта, на которой с помощью цветовой шкалы отображаются зоны более ранней (красный цвет) и поздней (синий цвет) активации. Одна из наиболее широко используемых систем — «Carto» (Biosense Webster Inc., USA). Использование этой системы позволяет проводить подробное электроанатомическое картирование в разных областях миокарда с высокой точностью [26, 27]. Одним из важных преимуществ таких систем явилось значительное уменьшение времени флюороскопии, определение электрофизиологических параметров в реальном времени и их точная привязка к анатомическим структурам. Вместе с тем данные системы имеют и некоторые недостатки, связанные с большой трудностью картирования полиморфных ЖА, а также невозможностью картировать аperiodические электрофизиологические процессы (редкие и полиморфные ЖА, фибрилляцию желудочков и предсердий). В связи с этим были разработаны нефлюороскопические системы многоканального трехмерного электроанатомического картирования. Так, система Ensite NavX (St. Jude Medical) позволяет использовать специальные корзинчатые (basket) электроды с 64 контактами, которые при введении в камеру сердца прижимаются к эндокардиальной поверхности. При этом производится расчет ЭГ

в 3000 точек, на основе которых строятся точные активационные карты [28, 29]. В данном направлении в настоящее время активно ведутся работы ведущими научно-исследовательскими центрами в мире. Также предлагаются новые подходы для улучшения визуализации анатомии сердца, например, система «Carto» с программным модулем Merge, позволяющим использовать данные мультиспиральной компьютерной томографии (МСКТ) или магнитно-резонансной томографии (МРТ) [30, 31].

Вместе с тем, все эти системы имеют ряд недостатков: невозможность картирования электрофизиологических процессов одновременно в 4 камерах сердца, невозможность одновременного картирования эпи- и эндокардиальной поверхности, значительная сложность картирования аperiодических процессов и трудно индуцируемых во время оперативного лечения нарушений ритма. В связи с этим исследователи вновь обратились к возможностям неинвазивной диагностики ЖА с помощью использования многоэлектродных систем отведений, которые могут обеспечивать сбор фактически всей информации о распределении электрического потенциала на поверхности тела. Такие системы легли в основу одного из направлений электрокардиологии, получившего название кардиотопографии.

Впервые электрокардиотопографию применил еще А. Waller в 1889 г., до создания W. Einthoven первого электрокардиографа, записывая с помощью ртутного капиллярметра 19–20 электрокардиограмм с поверхности тела и представляя графически максимальные амплитуды записей на диаграмме, изображающей грудную клетку человека [32]. Исследования по изучению распределения электрического потенциала на обширных участках грудной клетки проводились многими исследователями [33–37]. В 1961 г. Р.З. Амиров получил при помощи электронно-лучевой трубки изображения изменяющихся потенциалов в 50 точках на поверхности грудной клетки [38–40], а в 1963 г. В. Taccardi проводил регистрацию ЭКГ уже от 400 однополюсных отведений по Wilson и описал последовательность распределения поверхностного потенциала в соотношении с процессом деполяризации желудочков у 15 здоровых людей [41]. Начиная с 1970–80-х годов, с развитием электронно-вычислительных машин (ЭВМ), продолжалось активное изучение карт распределения потенциалов на поверхности грудной клетки.

В настоящее время под поверхностным ЭКГ-картированием понимают изучение временной последовательности распределения потенциалов, регистрируемых с поверхности грудной клетки в течение одного или нескольких кардиоциклов.

Принципиальным отличием от других методик электрокардиологии является то, что в результате многоканального ЭКГ-картирования и последующей соответствующей математической обработки данных вместо нескольких отдельно зарегистрированных сигналов получают характеристику электрического поля сердца, непрерывно изменяющуюся в пространстве и времени. Таким образом, понятие «поверхностное ЭКГ-картирование» включает многоканальное синхронное измерение электрического поля сердца, его адекватное графическое представление и диагностическую интерпретацию на основе непосредственного анализа формы и количественных параметров распределения соответствующих характеристик [42–45].

Неинвазивное электрофизиологическое картирование сердца (Non-invasive ElectroCardioGraphic Imaging)

Со времен исследований в области ортогональной ВКГ и ЭКГ, а также работ В. Taccardi и Р.З. Амирова в области поверхностного ЭКГ-картирования стало понятно, что дальнейший прогресс электрокардиологии, по всей видимости, связан с представлением данных поверхностных ЭКГ-измерений на реальной анатомической структуре сердца. Решение такой задачи значительно облегчило бы визуальный анализ данных поверхностного ЭКГ-картирования и позволило бы поднять неинвазивную электрофизиологию сердца на принципиально новый качественный уровень. В результате многочисленных экспериментальных исследований стало известно, что эпикардиальные потенциалы по сравнению с потенциалами на поверхности торса более подробно выявляют структуру биоэлектрических источников в сердце [46–50]. Это объясняется экспериментально подтвержденным явлением сглаживания пространственных изменений распределения потенциала при удалении области измерения от электрического генератора [43–44]. Достаточно сложная картина распределения потенциала на эпикарде показывает принципиальную возможность извлечения из него дополнительных, более подробных сведений об электрических процессах в сердце.

Для решения этих проблем необходимы были новые исследования в области прямой и обратной задач электрокардиологии. Прямая задача — это вычисление распределения электрических потенциалов на поверхности тела, исходя из описания электрической активности сердца. Однако для практического применения наиболее важна обратная задача — вычисление характеристик электрической активности сердца по распределению

электрических потенциалов на поверхности тела. Прямая и обратная задачи электрокардиологии тесно связаны между собой, т. к. методы решения обратной задачи должны основываться на решении или формальной постановке прямой.

Несмотря на то, что теоретическое решение обратной задачи электрокардиологии впервые было предложено В. Taccardi, R. Barr, R. Plonsey еще в 1970-е годы, работа над возможностью его практического применения велась в дальнейшем более 30 лет. Основными факторами, ограничивающими возможности исследователей, были необходимость получения информации о реальной индивидуальной анатомии сердца и наличие достаточно мощных ЭВМ для расчета большого числа получаемых данных, а также для адекватного интерактивного графического отображения получаемых результатов. Работа над решением обратной задачи электрокардиологии велась в США в «Nora Eccles Harrison Cardiovascular Research and Training Institute» штата Юта (R. S. MacLeod), «Communication & Digital Signal Processing Center» в Бостоне (D. H. Brooks) и под руководством проф. Y. Rudy в «Cardiac Bioelectricity and Arrhythmia Center Washington University in St. Louis» штата Миссури [51–53]. В СССР один из первых практических алгоритмов был разработан в Вычислительном Центре РАН в 1981 г. В. В. Шакиным [54]. Первые клинические испытания неинвазивной электрофизиологической методики, основанной на решении обратной задачи ЭКГ проводились в 1985–87 гг. в НЦССХ им. А. Н. Бакулева (Л. А. Бокерия, В. В. Шакин, Г. В. Мирский, А. Ш. Ревитшвили, И. П. Полякова) [55]. Однако впервые реализовать методику неинвазивного эпикардимального картирования удалось только в 2000 г. после появления новых компьютерных технологий и внедрения в клиническую практику новых методов визуализации — МСКТ и МРТ. В 2004 г. в журнале «Nature medicine» была опубликована работа под руководством проф. Y. Rudy, посвященная описанию этой методики, которую авторы называли «неинвазивный ЭКГ-имиджинг» (Noninvasive ElectroCardioGraphic Imaging — ECGI) [56]. Авторы регистрировали ЭКГ в 224 униполярных отведениях грудной клетки, после этого пациенту выполнялась МСКТ торса вместе с электродами на грудной клетке, затем сканирование сердца с внутривенным контрастированием. Далее данные ЭКГ-картирования вместе с данными МСКТ импортировались в специальное программное обеспечение (CADIS), с помощью которого производились привязка каждой зарегистрированной ЭКГ к конкретной точке на торсе, обработка данных МСКТ сердца для построения реалистичных

трехмерных эпикардимальных моделей желудочков сердца и решение обратной задачи — реконструкция эпикардимальных ЭГ. Авторы убедительно показали, что электрические процессы в сердце человека можно неинвазивно визуализировать с помощью новой методики. Также она может быть полезна для диагностики нарушений ритма и дальнейшего выбора методов лечения пациентов, для определения оптимальной тактики проведения инвазивных электрофизиологических процедур и для изучения механизмов аритмий. Однако авторы отметили, что использование МСКТ ограничивает возможность широкого клинического применения методики вследствие увеличения лучевой нагрузки на пациента.

Группа проф. Y. Rudy провела значительную работу по верификации алгоритмов и самой методики неинвазивного ЭКГ-имиджинга и определению ее точности, в т. ч. при реконструкции ЭГ. В ряде экспериментов на животных, а также на моделях торса и сердца авторы показали, что точность методики колеблется от 5 до 18 мм в зависимости от разных факторов, в т. ч. локализации зоны эктопии в миокарде. Сопоставление неинвазивного ЭКГ-имиджинга с данными интраоперационного картирования на пациентах также показало точность от 5 до 10 мм [57].

На основе предложенной методики неинвазивного ЭКГ-имиджинга был создан комплекс для практического использования в клинической практике — система «ECVUE» (Cardioinsight technologies inc., USA). В данной системе для регистрации ЭКГ используется специальный жилет с 224 электродами, импортируются данные МСКТ и производится расчет эпикардимальных ЭГ на трехмерных объемных моделях желудочков и предсердий сердца. Схема исследования представлена на рис. 1.

В 2011–2015 гг. система ECVU была использована несколькими группами исследователей для топической диагностики ЖА [58–61]. Их результатом стало подтверждение высокой точности технологии неинвазивного ЭКГ-имиджинга: в 86–91 % случаев методика позволяла точно выявлять локализацию ЖА.

Параллельно с Y. Rudy несколько научных групп вели исследования в области решения обратной задачи электрокардиологии. Из них необходимо отметить 2 группы — проф. T. Berger [62–64] и проф. Bin He [65–67]. Однако им не удалось создать систему для широкого практического использования в клинике.

В 2006 году на базе отделения хирургического лечения тахикардий «НЦ ССХ им. А. Н. Бакулева» (Москва) был разработан современный

Рисунок 1. Методика «non-invasive ElectroCardioGraphic Imaging» — ECGI. Цит. по: <http://rudylab.wustl.edu>

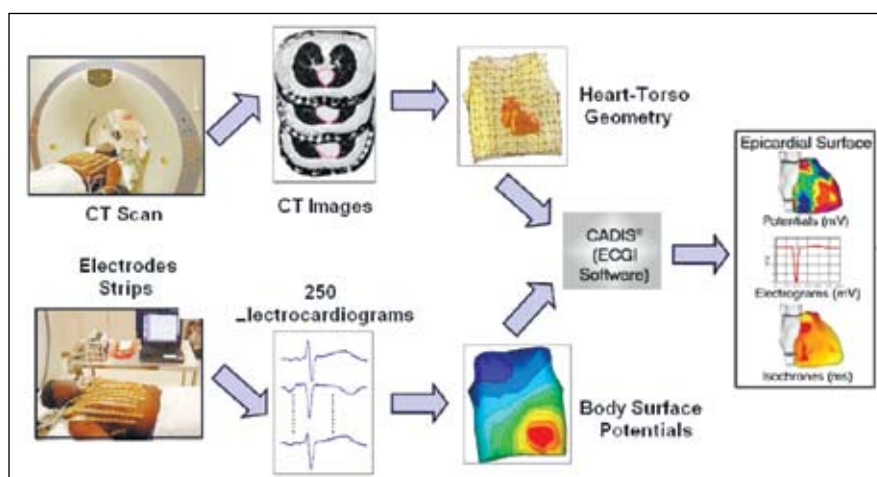
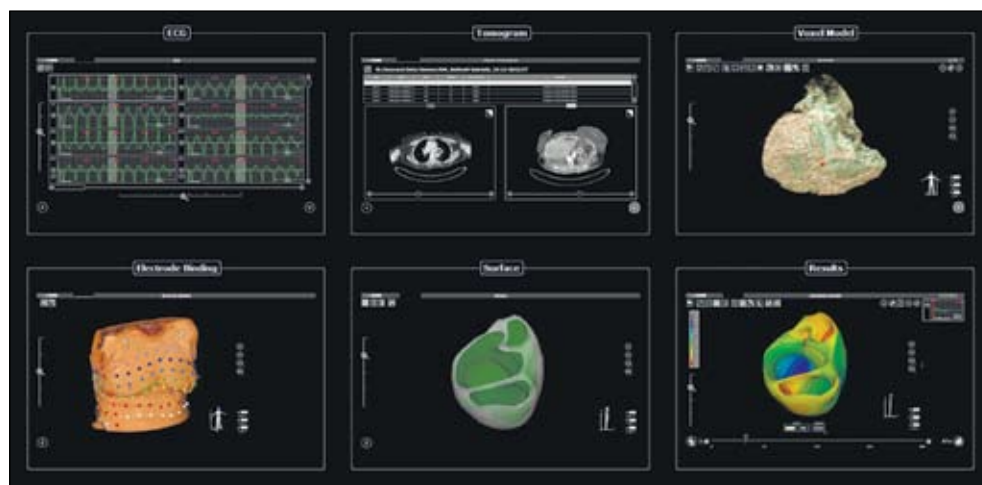


Рисунок 2. Схема неинвазивного электрофизиологического картирования сердца с использованием комплекса «Amucard 01C EP Lab»



Рисунок 3. Пример обработки данных неинвазивного электрофизиологического картирования сердца на программном обеспечении комплекса «Amucard 01C EP Lab»



программно-аппаратный комплекс для неинвазивного электрофизиологического картирования сердца — «Amucard 01C EP Lab» («Амикард 01 К») [68–69]. При создании комплекса были проведены исследования в области алгоритмов решения обратной задачи, точности реконструкции ЭГ, а также по возможности вычислительной реконструкции ЭГ на эндокардиальной поверхности сердца. Одновременно велась работа по изучению алгоритмов обработки данных МСКТ, их объемной реконструкции и качества построения триангуляционных сеток эпи- и эндокардиальной поверхностей миокарда (meshing) [70–79].

В комплексе Amucard 01C EP Lab для регистрации ЭКГ используются специальные 8-контактные электродные полосы, общее число униполярных отведений — 240 в исходной и 224 в настоящей версии. Также синхронно регистрируются 12 стандартных отведений ЭКГ. После записи многоканальной ЭКГ пациенту проводится МСКТ в 2 серии — торса с захватом всех поверхностных электродов и сердца с внутривенным контрастированием и ЭКГ синхронизацией. Схема исследования представлена на Рис. 2.

Вычислительная обработка данных многоканальной регистрации ЭКГ и МСКТ включает следующие этапы: объемная реконструкция данных томографии торса и определение пространственных координат электродов поверхностного картирования, построение полигональных эпи- и эндокардиальных моделей сердца на основе данных объемной реконструкции, расчет эпи- и эндокардиальных ЭГ для выбранного отрезка ЭКГ и построение различных активационных (изопотенциальных, изохронных, в режиме распространяющегося фронта) карт. Пример обработки данных представлен на Рис. 3.

Первые исследования в «НЦ ССХ им. А. Н. Бакулева» по использованию комплекса в клинической практике для диагностики ЖА показали хорошие результаты [80–83]. Было обследовано 62 пациента с некоронарогенной ЖА различной локализации. Совпадение результатов с данными инвазивного ЭФИ и электроанатомического картирования было зарегистрировано в 89 % (55 случаев), из них 95 % (21) — в выводном отделе ПЖ, 87 % (7) — в приточном отделе ПЖ, 85 % (22) — в выводном отделе ЛЖ и 83 % (5) — в приточном отделе ЛЖ. Похожие результаты были получены в 2013 г. другой научной группой в ФГБУ «НИИ кардиологии» СО РАМН (Томск) в исследовании на 81 пациенте с ЖА различной этиологии и локализации [84, 85]. Совпадение результатов было получено в 90 % (73 пациента), из них 98 % (51) — в выводном от-

деле ПЖ, 71 % (5) — в приточном отделе ПЖ, 92 % (11) — в выводном отделе ЛЖ и 60 % (6) — в приточном отделе ЛЖ или папиллярных мышцах.

В связи с развитием методики и усовершенствованием расчетных алгоритмов в 2014 г. было проведено валидационное исследование точности неинвазивного электрофизиологического картирования на базе «Asklepios Clinic St. Georg» (Hamburg, Germany), ФГБУ «СЗФМИЦ им. В. А. Алмазова» (Санкт-Петербург, Россия) и «НЦ ССХ им. А. Н. Бакулева» (Москва, Россия) [86]. Исследование проводилось в 2 фазы: определение зон стимуляционной эктопии для изучения точности неинвазивного картирования у пациентов с имплантированными электрокардиостимуляторами (ЭКС) и определение сайтов стимуляционной эктопии в сравнении с инвазивным электроанатомическим картированием. На первой фазе было обследовано 29 пациентов с имплантированными ЭКС, в т. ч. системами для сердечной ресинхронизирующей терапии (СРТ), с помощью которых проводилась стимуляция камер ПЖ и ЛЖ. Неинвазивно определенные зоны стимуляционной эктопии сравнивались с установленными по данным МСКТ локализациями стимулирующих полюсов электродов. В ЛЖ из 23 точек стимуляции ошибка локализации составила $7,9 \pm 5,7$ мм, в ПЖ из 29 точек стимуляции — $7,7 \pm 5,8$ мм. На второй фазе у 5 пациентов во время инвазивного электрофизиологического исследования с использованием системы нефлюороскопической трехмерной анатомической навигации «Carto 3» проводилась стимуляция камер сердца в различных точках. Неинвазивно определенная локализация зон стимуляционной эктопии сравнивалась с точками стимуляции по данным системы электроанатомического картирования «Carto 3». При этом с помощью специального программного обеспечения осуществлялось прямое сопоставление (слияние) трехмерных анатомических моделей, полученных на системе Carto 3 и Amucard 01C EP Lab. При анализе результатов оказалось, что в ЛЖ из 15 точек стимуляции ошибка локализации составила $6,4 \pm 2,2$ мм, в ПЖ из 10 точек стимуляции — $6,5 \pm 2,1$ мм. Это исследование впервые показало, что точность неинвазивного электрофизиологического картирования сердца в желудочках сердца в принципе сопоставима с точностью систем инвазивного электроанатомического картирования и значительно превышает по точности и наглядности другие методы неинвазивной топической диагностики ЖА. Примечательно, что первая фаза исследования у пациентов с установленными СРТ-устройствами показала, что неинвазивное электрофизиологическое картирование также позволяет различать эпи- и эндокардиальную локализацию

источников аритмии. Из недостатков исследования можно указать небольшое число обследованных пациентов и отсутствие сравнения инвазивных и неинвазивных активационных карт. Также осталась неподтвержденной точность неинвазивного электрофизиологического картирования в области межжелудочковой перегородки сердца, что, вероятно, будет выполнено в будущих исследованиях.

Дальнейшее совершенствование существующих алгоритмов визуализации электрофизиологических процессов для неинвазивного картирования привело к созданию новых типов активационных карт, предназначенных для анализа аритмий по механизму re-entry.

Параллельно шло совершенствование самой методики неинвазивного картирования и изучение новых возможностей ее применения в клинической практике. Так, в 2013 г. нами было изучена возможность использования метода в электрофизиологической диагностике полиморфных ЖА [87, 88], а также ЖА у пациентов детского возраста [89]. Также в 2013 г. на базе ФГБУ «СЗФМИЦ им. В. А. Алмазова» (НИО интервенционной аритмологии — зав. д. м. н., проф. Д. С. Лебедев и НИЛ электрокардиологии — зав. к. м. н., доцент Т. В. Трешкур) нами впервые была реализована возможность использования МРТ сердца в области неинвазивного ЭКГ-имиджинга, а также создан первый практический алгоритм для этого [90]. Использование МРТ для неинвазивного картирования имеет ряд неоспоримых преимуществ перед МСКТ: отсутствие лучевой нагрузки на пациента, значительно меньший риск аллергических проявлений и возможность визуализации анатомии сердца, в т. ч. его внутренних структур без введения контрастных препаратов. В 2014 г. нами также было показано, что методика позволяет картировать ЖА в труднодоступных анатомических областях, таких как аневризмы коронарного синуса [91]. Кроме этого, была изучена возможность визуализации ЖА, возникающих по механизму re-entry [92].

Перспективы развития

Дальнейшее развитие методики неинвазивного электрофизиологического картирования сердца, по всей видимости, будет происходить в следующих направлениях:

- совершенствование точности вычислительной реконструкции эпи- и эндокардиальных ЭГ;
- внедрение новых технологий визуализации анатомии сердца — ультразвуковые методы, электроимпедансная томография [93, 94];
- определение подходов к полному решению обратной задачи электрокардиологии — вычисли-

тельной реконструкции потенциалов действия, что позволит более точно распознавать определенные механизмы различных нарушений ритма сердца [95, 96].

Кроме того, возможна интеграция неинвазивного электрофизиологического картирования с инвазивным трехмерным электроанатомическим картированием и создание гибридных систем, которые позволят с очень высокой точностью визуализировать электрофизиологические процессы на эпи- и эндокардиальной поверхности в режиме реального времени и проводить по полученным результатам РЧА аритмий.

Также одним из принципиально новых практических приложений неинвазивного электрофизиологического картирования может стать его интеграция с технологиями неинвазивной аблации. Первые исследования показали принципиальную возможность использования γ -излучения с помощью специальных устройств «CyberKnife» (Accuray inc., USA) для неинвазивной изоляции устьев легочных вен [97, 98]. При этом многие исследователи отмечают, что для использования данной технологии необходимо точное неинвазивное картирование, что позволит внедрить их в широкую клиническую практику.

Заключение

Неинвазивное электрофизиологическое картирование сердца — современная методика, позволяющая с достаточно высокой точностью визуализировать эпи- и эндокардиальные электрограммы, а также строить различные типы активационных карт. Она впервые позволила неинвазивным путем визуализировать электрофизиологические процессы сердца. В определенной степени это — осуществление мечты русского физиолога и основоположника отечественной электрофизиологии сердца А. Ф. Самойлова, который писал: «Если бы возбуждение, бегущее по сердцу, сопровождалось каким-либо световым эффектом... то мы могли бы следить за тем, как бежит возбуждение от синуса через предсердия по проводящей системе вплоть до желудочков» [99].

Наиболее важными преимуществами данного метода является его неинвазивный характер, возможность одновременного картирования эпи- и эндокардиальной поверхности всех четырех камер сердца за один сердечный цикл, использование точных методов визуализации анатомии сердца и огромные перспективы развития как в области изучения электрофизиологических механизмов аритмий, так и в диагностике сложных нарушений ритма в повседневной клинической практике.

Конфликт интересов / Conflict of interest

Авторы заявили об отсутствии конфликта интересов. / The authors declare no conflict of interest.

Список литературы/References

- Kraus F, Nicolai GF. Ueber des Elektrokardiogramm unter normalen und pathologischen Verhältnissen. Berl.klin.Wchnschr. 1908;34(I).
- Robinson G, Herrmann G. Paroxysmal tachycardia of ventricular origin and its relation to coronary occlusion. Heart. 1921;8:59.
- Einthoven W, Fahr G, de Waart A. Über die Richtung und die manifeste Grösse der Potentialschwankungen im menschlichen Herzen und über den Einfluss der Herzlage auf die Form des Elektrokardiogramms. Archiv für die gesammte Physiologie des Menschen und der Thiere. 50:275–315.
- Wilson FN, Johnston FD, Rosenbaum FF, Erlanger H, Kossmann CE, Hecht H, Cotrim N, Menezes de Oliveira R, Scarsi R, Barker PS. The precordial electrocardiogram. Am. Heart J. 1944;27:19–85.
- Rosenbaum MB. Classification of ventricular extrasystoles according to form. J. electrocardiol. 1969;2(3):289.
- Boineau JP. Electrocardiology: a 30 year perspective. Ah Serendipity, fulsome friend. J. Electrocardiol. 1988; supl. P: S1.
- Su N, Wei TX, Zhang YR. Localization of the origin of ventricular arrhythmia by means of Frank's vectorcardiogram. Zhonghua Xin Xue Guan Bing Za Zhi. 1989;17 (3):143–145.190.
- Гасилин В.С. Векторкардиография. Куйбышев; 1963. 114 с. [Gasilin VS. Vectorcardiography. Kuibyshev; 1963. 114 p. In Russian].
- Кечкер М.И. Основы векторкардиографии. М.; 1970. 51 с. [Kechker MI. The foundation of vectorcardiography. Moscow; 1970. 51 p. In Russian].
- Бала Ю.М., Хорошев В.Ф., Гусев А.И. Количественная пространственная векторэлектрокардиография. Воронеж; 1968. 133 с. [Bala YuM, Khoroshev VF, Gusev AI. Quantitative spatial vectorcardiography. Voronezh; 1968. 133 p. In Russian].
- Тартаковский М.Б. Основы клинической векторкардиографии. Л.; 1964. 235 с. [Tartakovskiy MB. The foundation of clinical vectorcardiography. Leningrad; 1964. 235 p. In Russian].
- Duchosal PW, Sulzer R. La Vectorcardiographie, Basel. N.Y; 1949.
- Cooksey JD, Dunn M. Clinical Vectorcardiography and Electrocardiography Hardcover. 1977.
- McFarlane P. W. 12 lead vectorcardiography. 1995. 160 p.
- Титомир Л.И. Экспериментальное определение параметров векторкардиографических систем отведений с учетом неоднородности электрических свойств тела. Биофизика. 1967;12:573. [Titomir LI. Experimental determination of the parameters vectorcardiographic lead systems taking into account the heterogeneity of the electrical properties of the body. Biophysics. 1967;12:573. In Russian].
- Grayzel J, Lizzi F. The performance of VCG leads in homogenous and heterogeneous torsos. J. Electrocardiol. 1969;2:17.
- Вайнштейн А.Б., Яшин С.М., Думпис Я.Ю., Шубик Ю.В. Электрокардиографическая топическая диагностика некоронарогенных правожелудочковых аритмий. Вестник аритмологии. 2003;34:11–17. [Vanshtein AB, Yashin SM, Dumpis YaYu, Shubik YuV. Electrocardiographic topical diagnosis of noncoronary right ventricular arrhythmias. Vestnic arrhythmologii. 2003;34:11–17. In Russian].
- Ревিশвили А.Ш., Носкова М.В., Рзаев Ф.Г., Артюхина Е.А. Неинвазивная топическая диагностика некоронарогенных желудочковых аритмий. Вестник аритмологии. 2004;35:5–15. [Revishvili AS, Noskova MV, Rzaev FG, Artyukhina EA. Non-invasive topical diagnosis of noncoronary ventricular arrhythmias. Vestnic arrhythmologii. 2004;35:5–15. In Russian].
- Miller JM, Marchlinski FE, Buxton AE, Josephson ME. Relationship between the 12-lead electrocardiogram during ventricular tachycardia and endocardial site of origin in patients with coronary artery disease. Circulation. 1988;77:759–766.
- Ito S, Tada H, Naito S, Kurosaki K, Ueda M, Hoshizaki H, Miyamori I, Oshima S., Taniguchi K., Nogami A. Development and validation of an ECG algorithm for identifying the optimal ablation site for idiopathic ventricular outflow tract tachycardia. Journal of Cardiovascular Electrophysiology. 2003;14(12):1280–1286.
- Segal OR, Chow AW, Wong T, Trevisi N, Lowe MD, Davies DW, Della Bella P, Packer DL, Peters NS. A novel algorithm for determining endocardial VT exit site from 12-lead surface ECG characteristics in human, infarct-related ventricular tachycardia. Journal of Cardiovascular Electrophysiology. 2007;18 (2):161–168.
- Zhang F, Chen M, Yang B, Ju W, Chen H et al. Electrocardiographic algorithm to identify the optimal target ablation site for idiopathic right ventricular outflow tract ventricular premature contraction. Europace. 2009;11:1214–1220.
- Betensky BP, Park RE, Marchlinski FE et al. The V (2) transition ratio: a new electrocardiographic criterion for distinguishing left from right ventricular outflow tract tachycardia origin. J. Am. Coll. Cardiol. 2011;57:2255–2262.
- Park KM, Kim YH, Marchlinski FE. Using the surface electrocardiogram to localize the origin of idiopathic ventricular tachycardia. Pacing and Clinical Electrophysiology. 2012;35 (12):1516–1527.
- Kuchar DL, Ruskin JN, Garan H. Electrocardiographic localization of the site of origin of ventricular tachycardia in patients with prior myocardial infarction. Journal of American College of Cardiology. 1989;13(4):893–903.
- Ben-Haim SA, Osadchy D, Schuster I et al. Nonfluoroscopic, in vivo navigation and mapping technology. Nat. Med;1996 (2):1393–1395.
- Stevenson WG, Delacretaz E, Freidman PL et al. Identification and ablation of macroreentrant ventricular tachycardia with the CARTO electroanatomical mapping system. Pacing Clin. Electrophysiol. 1998;21:1448–1456.
- Schilling RJ, Peters NS, Davies DW. A non-contact catheter for simultaneous endocardial mapping in the human left ventricle: comparison of contact and reconstructed electrograms during sinus rhythm. Circulation. 1998;98:887–898.
- Schilling RJ, Peters NS, Davies DW. Feasibility of a noncontact catheter for endocardial mapping of human ventricular tachycardia. Circulation. 1999;99:2543–2552.
- Kistler PM, Earley MJ, Harris S et al. Validation of three dimensional cardiac image integration: use of integrated CT image into electroanatomic mapping system to perform catheter ablation of atrial fibrillation. J. Cardiovasc. Electrophysiol. 2006;17:341–348.
- Pflaumer A, Deisenhofer I, Hausleiter J et al. Mapping and ablation of atypical flutter in congenital heart disease with a novel three-dimensional mapping system (Carto Merge). Europace. 2006; 8:138–139.
- Waller AD. On the electromotive changes connected with the beat of the mammalian heart and of the human heart in particular. Phil. Trans. R. Soc. 1889;180:169–194.
- Groedel FM, Koch E. Potentialmaxima auf den vorderen Brustwand. Z. Kreislaufforsch. 1933;23:794.

34. Hill A. Analysis of the normal QRS deflection. *Lancet*. 1938;2:1110–1113.
35. Bohning A, Katz LN, Langedorf R. The distribution of surface potential on the chest in intraventricular block. *Am. Heart J.* 1941;22:778–793.
36. Burger R, Wuhrmann F. Über das elektrische Feld des Herzens. *Cardiologia*. 1939;3(56):139.
37. Lepeschkin E. The history of electrocardiographic thoracic mapping. *Adv. Cardiol.* 1974;10:2–10.
38. Амиров Р.З. Кардиотопоскопия. *Кардиология*. 1961;1(2):55–61. [Amirov RZ. Cardiotoposcopy. *Kardiologiya*. 1961;1(2):55–61. In Russian].
39. Амиров Р.З. Электрокардиотопография. М.: 1965. 144 с. [Amirov RZ. Electrocardiotoposcopy. Moscow;1965. 144 p. In Russian].
40. Амиров Р.З. Интегральные топограммы потенциалов сердца. М.: 1973. 109 с. [Amirov RZ. Integral topogram of heart potential. Moscow; 1973. 109 p. In Russian].
41. Taccardi B. Distribution of heart potential on the thoracic surface of normal human subjects. *Circulation Res.* 1963;12:341–352.
42. Титомир Л.И., Кнеппо П. Математическое моделирование биоэлектрического генератора сердца. М.: Наука; 1999. 448 с. [Titomir LI, Kneppo P. Mathematical modeling of the heart bioelectric generator. Moscow: Nauka; 1999. 448 p. In Russian].
43. Титомир Л.И., Руткай-Недзкий И., Бахарова Л. Комплексный анализ электрокардиограммы в ортогональных отведениях. М.: Наука; 2001. 238 с. [Titomir LI, Rutkay-Nedezkiy I, Bakharova L. The complex analysis of the electrocardiogram in orthogonal leads. Nauka, 2001: 238 p. In Russian].
44. Титомир Л.И., Кнеппо П., Трунов В., Айду Э.А. Биофизические основы электрокардиотопографических методов. М.: Физматлит; 2009. 224 с. [Titomir LI, Kneppo P, Trunov V, Aidu EA. Biophysical basics electrocardiotopographic methods. M.: Physmatlit; 2009. 224 p. In Russian].
45. Титомир Л.И., Трунов В., Айду Э.А. Неинвазивная электрокардиотопография. М.: Наука; 2003. 200 с. [Titomir LI, Trunov V, Aidu EA. Noninvasive electrocardiotopographic. M.: Nauka; 2003. 200 p. In Russian].
46. Scher AM, Young AC, Meridith WM. Factor analysis of the electrocardiogram. Test of electrocardiographic theory: normal hearts. *Circulation Res.* 1960;8:519–526.
47. Arthur RM, Geselowitz DB, Briller SA, Trost RF. Quadropole components of the human surface electrocardiogram. *Am. Heart J.* 1972;83:663–677.
48. Barr RC, Spach MS, Hermann-Giddens GS. Selection of the number and positions of measuring locations for electrocardiography. *IEEE Trans. Bio-Med Engng. (Inst.elect.electron.Engrs)*. BME. 1971;18:125–138.
49. Kornreich F. Quantitative evaluation of body surface information. *Adv. Cardiol.* 1974;10:156–160.
50. Taccardi B, de Ambroggi L, Viganotti C. Characteristic features of surface potential maps during the QRS and S-T intervals. *Adv. Cardiol.* 1974;10:248–256.
51. MacLeod RS, Brooks DH. Recent progress in inverse problems in electrocardiology. *IEEE Engineering in Medicine and Biology Magazine*. 1998;17(1):73–83.
52. Rudy Y, Messinger-Rapport BJ. The inverse problem in electrocardiology: solutions in terms of epicardial potentials. *Critical Reviews in Biomedical Engineering*. 1988;16(3):215–268.
53. Rudy Y, Burnes JE. Non-invasive Electrocardiographic Imaging. *Annals of Noninvasive Electrocardiology*. 1999;4(3):340–359.
54. Шакин В.В. Вычислительная электрокардиография. — Москва: Наука; 1981. 167 с. [Shakin VV. Computational electrocardiology. Moscow: Nauka; 1981. 167 p. In Russian].
55. Бокерия Л.А., Шакин В.В., Мирский Г.В., Полякова И.П. Численные методы электрофизиологической оценки состояния сердца. — М.: Вычислительный центр АН СССР; 1987. [Bokeria LA, Shakin VV, Mirskii GV, Polyakova IP. Numerical methods for electrophysiology assessment of heart. Moscow: Computing Center of the USSR Scientific Academy; 1987. In Russian].
56. Ramanathan C, Ghanem RN, Jia P, Ryu K, Rudy Y. Non-invasive electrocardiographic imaging for cardiac electrophysiology and arrhythmia. *Nature Medicine*. 2004;10(4):422–428.
57. Ghanem RN, Jia P, Ramanathan C, Ryu K, Markowitz A, Rudy Y. Non-invasive Electrocardiographic Imaging (ECGI): Comparison to intraoperative mapping in patients. *Heart Rhythm*. 2005;2(4):339–354.
58. Wang Y, Cuculich PS, Zhang J. et al. Non-invasive electroanatomic mapping of human ventricular arrhythmias with electrocardiographic imaging. *Sci. Transl. Med.* 2011;3:98–84.
59. Cakulev I, Sahadevan J, Arruda M. et al. Confirmation of novel noninvasive high-density electrocardiographic mapping with electrophysiology study: implications for therapy. *Circ. Arrhythm. Electrophysiol.* 2013;6:68–75.
60. Jamil-Copley S, Bokan R, Kojodjojo P. et al. Noninvasive electrocardiographic mapping to guide ablation of outflow tract ventricular arrhythmias. *Heart Rhythm*. 2014;11:587–594.
61. Erkapic D, Greiss H, Pajitnev D et al. Clinical impact of a novel three-dimensional electrocardiographic imaging for non-invasive mapping of ventricular arrhythmias: a prospective randomized trial. *Europace*. 2015;17(4):591–597.
62. Berger T, Fisher G, Pfeifer B et al. Single-Beat Noninvasive Imaging of Cardiac Electrophysiology of Ventricular Pre-Excitation. *J. Am. Coll. Cardiol.* 2006;48:2045–2052.
63. Berger T, Hintringer F, Fischer G, Non-invasive Imaging of Cardiac Electrophysiology. *Indian Pacing Electrophysiol. J.* 2007;7(3):160–165.
64. Berger T, Pfeifer B, Hanser FF, Hintringer F, Fischer G, Netzer M, Trieb T, Stuehlinger M, Dichtl W, Baumgartner C, Pachinger O, Seger M. Single-beat non-invasive imaging of ventricular endocardial and epicardial activation in patients undergoing CRT. *PLoS One*. 2011. 27:6(1); e16255.
65. Liu C, Skadsberg ND, Ahlberg SE, Swingen CM, Iaizzo PA, He B. Estimation of global ventricular activation sequences by noninvasive 3-dimensional electrical imaging: validation studies in a swine model during pacing. *J. Cardiovasc. Electrophysiol.* 2008; 19(5):535–540.
66. Han C, Pogwizd CM, Killingsworth CR, He B. Non-invasive Imaging of Three-dimensional Cardiac Activation Sequence during Pacing and Ventricular Tachycardia. *Heart Rhythm*. 2011;8(8):1266–1272.
67. Han C, Liu Z, Zhang X, Pogwizd S, He B. Non-invasive 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.
68. Калинин В.В. Способ неинвазивного электрофизиологического исследования сердца. Калинин В.В., Ревিশвили А.Ш., Калинин. А.В. Патент на изобретение. URL: <http://www.findpatent.ru/patent/241/2417051.html>. [Kalinin VV. The method of Noninvasive Imaging of Cardiac Electrophysiology. Kalinin VV, Revishvili AS, Kalinin AV. The patent for invention. URL: <http://www.findpatent.ru/patent/241/2417051.html>. In Russian].
69. Бокерия Л.А., Ревিশвили А.С., Калинин А.В., Калинин В.В., Ляджина О.А., Фетисова Е.А. Hardware-software system for noninvasive electrocardiographic heart examination based on inverse problem of electrocardiology. *Biomedical engineering*. 2008;42(6):273–279.

70. Denisov AM, Zakharov EV, Kalinin AV, Kalinin VV. Numerical solution of the inverse electrocardiography problem with the use of the Tikhonov regularization method. *Moscow University Computational Mathematics and Cybernetics*. 2008;32(2):61–68.
71. Denisov AM, Zakharov EV, Kalinin AV, Kalinin VV. Numerical methods for some inverse problems of heart electrophysiology. *Differential Equations*. 2009;45(7):1034–1043.
72. Zakharov EV, Kalinin AV. Algorithms and numerical analysis of dc fields in a piecewise-homogeneous medium by the boundary integral equation method. *Computational Mathematics and Modeling*. 2009;20(3):247–257.
73. Zakharov EV, Kalinin AV. Method of boundary integral equations as applied to the numerical solution of the three-dimensional Dirichlet problem for the laplace equation in a piecewise homogeneous medium. *Computational Mathematics and Mathematical Physics*. 2009;49(7):1141–1150.
74. Denisov AM, Zakharov EV, Kalinin AV, Kalinin VV. Numerical solution of an inverse electrocardiography problem for a medium with piecewise constant electrical conductivity. *Computational Mathematics and Mathematical Physics*. 2010;50(7):1172–1177.
75. Kalinin AV. Iterative algorithm for the inverse problem of electrocardiography in a medium with piecewise-constant electrical conductivity. *Computational Mathematics and Modeling*. 2011;22(1):30–34.
76. Denisov AM, Zakharov EV, Kalinin AV, Kalinin VV. Numerical method for solving an inverse electrocardiography problem for a quasi-stationary case. *J. Inverse Ill-Posed Probl*. 2012;20(4):501–512.
77. Zakharov EV, Kalinin AV. A Method To Compute The Electric Field Vector On the Surface Of The Cardiac Muscle. *Computational Mathematics and Modeling*. 2012;23(2):125–132.
78. Denisov AM, Zakharov EV, Kalinin AV. Method for Determining the Projection of an Arrhythmogenic Focus on the Heart Surface, Based on Solving the Inverse Electrocardiography Problem. *Mathematical Models and Computer Simulations*. 2012;4(6):535–540.
79. Zakharov EV, Kalinin AV. Numerical solution of the three-dimensional Dirichlet problem for inhomogeneous media by the method of integral equations. *Differential Equations*. 2013;49(9):1160–1167.
80. Ревিশвили А. Ш., Калинин В. В., Калинин А. В., Лабарткава Е. З., Александрова С. А., Спиридонова Е. И., Сопов О. В. Неинвазивная диагностика и результаты интервенционного лечения аритмий сердца с использованием новой системы неинвазивного поверхностного картирования «АМИ-КАРД01К». *Анналы аритмологии*. 2012;9(3):39–47. [Revishvili AS, Kalinin VV, Kalinin AV, Labartkava EZ, Aleksandrova SA, Siridonova EI, Sopov OV. Non-invasive diagnosis and results of interventional treatment of cardiac arrhythmias by the new system of non-invasive surface mapping «AMCARD 01K». *Annals of arrhythmology*. 2012;9(3):39–47. In Russian].
81. Бокерия Л. А., Ревিশвили А. Ш., Калинин В. В., Ляджина О. С., Фетисова Е. А., Симонян Г. Ю. Неинвазивное эндокардиальное картирование желудочков сердца на основе решения обратной задачи электрокардиографии. *Вестник аритмологии*. 2009;57:24–28. [Bokeria LA, Revishvili AS, Kalinin VV, Lyadzhina OS, Fetisova EA, Simonyan GY. Non-invasive endocardial mapping of the ventricular-based solution of the inverse problem of electrocardiography. *Vestnic arrhythmologii*. 2009;57:24–28. In Russian].
82. Ревিশвили 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 AS, Kalinin VV, Lyadzhina OS, Fetisova EA. Verification of a new method of Non-invasive Imaging of Cardiac Electrophysiology based on the solution of the inverse problem of electrocardiography. *Vestnic arrhythmologii*. 2008;51:7–13. In Russian].
83. Ляджина О. С., Калинин В. В., Фетисова Е. А., Симонян Г. Ю., Ревিশвили А. Ш. Топическая диагностика некоронарогенной желудочковой экстрасистолии на основе неинвазивного активационного картирования. *Вестник аритмологии*. 2009;57:47–51. [Lyadzhina OS, Kalinin VV, Fetisova EA, Simonyan GY, Revishvili AS. Noncoronary topical diagnosis of ventricular arrhythmia on the basis of noninvasive activation mapping. *Vestnic arrhythmologii*. 2009;57:47–51. In Russian].
84. Хлынин М. С., Баталов Р. Е., Попов С. В., Криволапов С. Н. Неинвазивное электрокардиографическое картирование желудочковых нарушений ритма сердца. *Сибирский медицинский журнал*. 2013;28(2):28–31. [Khlynin MS, Batalov RE, Popov SV, Krivolapov SN. Noninvasive electrocardiographic mapping of the ventricular cardiac arrhythmias. *Siberian Journal of Medicine*. 2013;28(2):28–31. In Russian].
85. Хлынин М. С. Баталов Р. Е., Попов С. В., Криволапов С. Н. Неинвазивная топическая диагностика желудочковых нарушений ритма сердца. *Вестник аритмологии*. 2013;73:49–53. [Khlynin MS Batalov RE, Popov SV, Krivolapov SN. Noninvasive topical diagnosis of ventricular cardiac arrhythmias. *Vestnic arrhythmologii*. 2013;73:49–53. In Russian].
86. Revishvili AS, Wissner E, Lebedev DS, Lemes C, Deiss S, Metzner A et al. Validation of the mapping accuracy of a novel non-invasive epicardial and endocardial electrophysiology system. *Europace*. 2015; Feb 2. doi:10.1093/europace/euu339.
87. Чмелевский М. П., Лебедев Д. С., Трешкур Т. В., Татарский Р. Б., Зубарев С. В. Топическая диагностика полиморфных желудочковых аритмий с помощью неинвазивного электрофизиологического картирования сердца. *Анналы аритмологии*. Материалы V Всероссийского Съезда Аритмологов. Москва. 13–15 июня 2013. — № 2 (приложение). — С. 52. [Chmelevsky MP, Lebedev DS, Treshkur TV, Tatarsky RB, Zubarev S. V. Topical diagnosis of polymorphic ventricular arrhythmias by means of noninvasive electrophysiological mapping of the heart. *Annals arrhythmology*. Proceedings of the V All-Russian Congress of arrhythmology. Moscow. 2013. June 13–15;2 (annex):52. In Russian].
88. Chmelevsky MP, Zubarev SV, Treshkur TV, Lebedev DS. Topical diagnosis of polymorphic ventricular arrhythmias by noninvasive electrocardiographic imaging. *Journal of Electrocardiology*. 2013;46 (Is. 4): e.29.
89. Чмелевский М. П., Лебедев Д. С., Васичкина Е. С., Трешкур Т. В., Зубарев С. В. Первый опыт проведения неинвазивного электрофизиологического картирования у пациентов детского и юношеского возраста. *Анналы аритмологии*. Материалы V Всероссийского Съезда Аритмологов. Москва. — 13–15 июня 2013. — № 2. — (приложение). — С. 52. [Chmelevsky MP, Lebedev DS, Vasichkina ES, Treshkur TV, Zubarev SV. First experience of noninvasive electrophysiological mapping in children and youth. *Annals arrhythmology*. Proceedings of the V Russian Congress of arrhythmology. Moscow. 2013. June 13–15;2 (annex):52. In Russian].
90. Чмелевский М. П., Лебедев Д. С., Пахомов А. В., Рыжков А. В., Зубарев С. В. Первый опыт использования магнитно-резонансной томографии для неинвазивного электрофизиологического картирования предсердных и желудочковых аритмий. *Анналы аритмологии*. Материалы V Всероссийского Съезда Аритмологов. — Москва. 13–15 июня 2013. № 2 (приложение). С. 55. [Chmelevsky MP, Lebedev DS, Pakhomov AV, Ryzhkov AV, Zubarev SV. The first experience of using magnetic resonance imaging for non-invasive electrophysiological mapping

of atrial and ventricular arrhythmias. *Annals arrhythmology. Materials. V All arrhythmology Congress. Moscow. 2013. June 13–15;2 (annex):55. In Russian*].

91. Namdar M, Chmelevsky M, Gentil-Baron P, Burri H, Shah D. Idiopathic VT in a coronary sinus aneurysm localized with a novel body surface mapping system. *International congress EHRA Cardiotim. June 18–21, 2014. Nice, France. <http://www.cardiotim.com>.*

92. Tsyganov A, Kalinin V, Chmelevsky M, Yakovleva M. Noninvasive panoramic mapping of human ventricular fibrillation. *XVI international symposium on progress in clinical pacing. December 2–5, 2014. Book of abstract. Rome, Italy. P. 73.*

93. Xu G, Wang R, Zhang S, Yang S, Justin GA, Sun M, Yan W. A 128-electrode three dimensional electrical impedance tomography system. *Conf. Proc. IEEE Eng. Med. Biol. Soc. 2007:4386–4389.*

94. Wu H, Xu G, Yu H, Zhang S, Li Y, Yang S, Yan W. Three dimensional electrical impedance tomography in thorax complete model. *Conf. Proc. IEEE Eng. Med. Biol. Soc. 2008:466–469.*

95. van Dam PM, Oostendorp TF, Linnenbank AC, van Oosterom A. Non-Invasive Imaging of Cardiac Activation and Recovery. *Ann. Biomed. Eng. 2009;37(9):1739–1756.*

96. Oostendorp TF, van Oosterom A. ECGSIM: an interactive tool for studying the genesis of QRST waveforms. *Heart. 2004;90(2):165–168.*

97. Sharma A, Wong D, Weidlich G, Fogarty T, Jack A, Sumanaweera T, Maguire P. Non-invasive stereotactic radiosurgery (CyberHeart) for creation of ablation lesions in the atrium. *Heart Rhythm. 2010;7(6):802–810.*

98. Bode F, Blanck O, Gebhard M, Hunold P, Grossherr M, Brandt S et al. Pulmonary vein isolation by radiosurgery: implications for non-invasive treatment of atrial fibrillation. *Europace. 2015; Mar 3. DOI: [dx.doi.org/10.1093/europace/euu406](https://doi.org/10.1093/europace/euu406).*

99. Самойлов А. Ф. Избранные статьи и речи. М.-Л.: Изд-во АН СССР; 1946. 313 с. [Samoilov AF. Selected articles and speeches. Moscow-Leningrad: Publishing House of the USSR Academy of Sciences; 1946. 313 p. In Russian].

Информация об авторах:

Чмелевский Михаил Петрович — старший научный сотрудник НИЛ электрокардиологии ФГБУ «СЗФМИЦ им. В. А. Алмазова» Минздрава России;

Зубарев Степан Владимирович — врач-кардиолог ФГБУ «СЗФМИЦ им. В. А. Алмазова» Минздрава России;

Буданова Маргарита Александровна — младший научный сотрудник НИЛ электрокардиологии ФГБУ «СЗФМИЦ им. В. А. Алмазова» Минздрава России.

Author information:

Mikhail P. Chmelevsky, Senior Researcher of Electrocadiology Research Laboratory, Federal Almazov North-West Medical Research Centre;

Stepan V. Zubarev, Cardiologist, Federal Almazov North-West Medical Research Centre;

Margarita A. Budanova, Junior Researcher of Electrocadiology Research Laboratory, Federal Almazov North-West Medical Research Centre.