



РАЗВИТИЕ НЕИНВАЗИВНОЙ ТОПИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ НАРУШЕНИЙ РИТМА СЕРДЦА

**М.С. Хлынин^{1*}, Р.Е. Баталов¹, Н.В. Киселев², И.Ф. Нам^{2,3},
В.В. Силиванов², С.А. Списивцев²**

¹ Научно-исследовательский институт кардиологии, Томский национальный исследовательский медицинский центр Российской академии наук,
634012, Российская Федерация, Томск, ул. Киевская, 111а

² Общество с ограниченной ответственностью «ЛОРГЕ медикал»,
634055, Российская Федерация, Томск, пр. Академический, 10/3, стр. 2

³ Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
634034, Российская Федерация, Томск, пр. Ленина, 30

Аритмии сердца в той или иной степени сопутствуют практически всем кардиологическим заболеваниям. Задача дооперационной топической диагностики различных аритмий на сегодняшний день остается принципиально важной и актуальной, что подтверждается многочисленными алгоритмами, направленными на неинвазивное выявление расположения аритмогенного фокуса, которые все чаще описываются в российской и мировой литературе. Сегодня существует множество различных методов неинвазивной топической диагностики аритмогенного фокуса как при желудочковых, так и предсердных аритмиях. Наиболее современным является неинвазивное вычислительное картирование сердца, основанное на решении обратной задачи электрокардиографии. Точность данного метода достигает 90%, однако и он до сих пор по своим возможностям уступает «эталонному» методу внутрисердечного электрофизиологического исследования. В настоящее время на рынке представлены приборы для инвазивного и неинвазивного электрофизиологического картирования сердца. Однако в условиях операционной необходима интегрированная система неинвазивного электрофизиологического картирования с инвазивным трехмерным электроанатомическим картированием. Создание гибридных систем позволит с очень высокой точностью визуализировать электрофизиологические процессы на эпи- и эндокардиальной поверхности в режиме реального времени и по полученным результатам проводить радиочастотную катетерную абляцию аритмий с одновременным снижением лучевой нагрузки на пациента и медицинский персонал.

Ключевые слова:	аритмии сердца, неинвазивное и инвазивное картирование.
Конфликт интересов:	авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
Прозрачность финансовой деятельности:	никто из авторов не имеет финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.
Для цитирования:	Хлынин М.С., Баталов Р.Е., Киселев Н.В., Нам И.Ф., Силиванов В.В., Списивцев С.А. Развитие неинвазивной топической диагностики нарушений ритма сердца. <i>Сибирский медицинский журнал</i> . 2019;34(2):9–20. https://doi.org/10.29001/2073-8552-2019-34-2-9-20

DEVELOPMENT OF NONINVASIVE TOPICAL DIAGNOSTICS OF CARDIAC ARRHYTHMIAS

Mikhail S. Khlynin^{1*}, Roman E. Batalov¹, Nikolay V. Kiselev², Irina F. Nam^{2,3}, Valery V. Silivanov², Sergey A. Spisivtsev²

¹ Cardiology Research Institute, Tomsk National Research Medical Center, Russian Academy of Sciences, 111a, Kievskaya str., Tomsk, 634012, Russian Federation

² Limited Liability Company “LORGE Medical”, 10/3, Academichesky ave., build. 2, Tomsk, 634055, Russian Federation

³ National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin ave., Tomsk, 634050, Russian Federation

Heart arrhythmias may accompany virtually any cardiac disease. The problem of the preprocedure topical diagnostics of various arrhythmias remains fundamentally important and relevant, which is confirmed by numerous algorithms aimed at non-invasive detection of the arrhythmogenic focus location. Today, many different methods are available for non-invasive topical diagnostics of the arrhythmogenic foci in both ventricular and atrial arrhythmias. A non-invasive imaging of cardiac electrophysiology (NICE), based on the solution of the inverse problem of the electrocardiography, is the most advanced new technology. The accuracy of NICE reaches 90%, however, it is still inferior in its capabilities to the “reference” method of the invasive intracardiac electrophysiological examination. Currently, the market presents devices for both invasive mapping and NICE. However, in the context of surgery, an integrated system of non-invasive electrophysiological mapping with invasive three-dimensional electroanatomic mapping is of high demand. The creation of hybrid systems will allow to visualize electrophysiological processes in the epi- and endocardial surface in the real time with very high accuracy and to carry out the radiofrequency catheter ablation of arrhythmias with the simultaneous reduction of the radiation load on the patient and medical personnel.

Keywords:	cardiac arrhythmias, non-invasive and invasive mapping.
Conflict of interest:	the authors do not declare a conflict of interest.
Financial disclosure:	no author has a financial or property interest in any material or method mentioned.
For citation:	Khlynin M.S., Batalov R.E., Kiselev N.V., Nam I.F., Silivanov V.V., Spisivtsev S.A. Development of Non-invasive Topical Diagnostics of Cardiac Arrhythmias. <i>The Siberian Medical Journal</i> . 2019;34(2):9–20. https://doi.org/10.29001/2073-8552-2019-34-2-9-20

Аритмии сердца в той или иной степени сопутствуют практически всем кардиологическим заболеваниям. По данным популяционных исследований, до 35–45% в их структуре занимает фибрилляция (ФП) и трепетание предсердий (ТП), 10–15% желудочковая тахикардия (ЖТ) и фибрилляция. От 5 до 10% пациентов с заболеваниями сердца умирают от внезапно развившейся аритмии. По данным разных авторов, основными этиологическими факторами возникновения аритмий являются ишемическая болезнь сердца и перенесенный инфаркт миокарда (70–80%), дилатационная кардиомиопатия (20–30%), воспалительные заболевания сердца (10–20%). Несмотря на бурное развитие интервенционного и фармакологического лечения аритмий, их количество неуклонно растет, что, в свою очередь, увеличивает кардиологическую смертность, заболеваемость, длительность госпитализации и общие затраты на систему здравоохранения. Современные кардиология и аритмология пока не в состоянии разрешить такие три крупные проблемы, как ФП, желудочковые аритмии в связке с внезапной сердечной смертью, сердечной недостаточностью.

Задача дооперационной топической диагностики различных нарушений ритма сердца (НРС) на сегодняшний день оста-

To a greater or lesser extent, cardiac arrhythmias are associated with virtually all cardiac diseases. According to data of population-based studies, the rates of atrial fibrillation (AF) and atrial flutter (AFL) amount up to 35–45% in the structure of arrhythmias, whereas the rates of ventricular tachycardia (VT) and ventricular fibrillation (VF) are 10–15%. From 5% to 10% of patients with heart diseases die from the sudden arrhythmia. According to data obtained by different authors, the main etiological factors associated with the onset of arrhythmias include coronary artery disease, the history of myocardial infarction (70–80%), dilated cardiomyopathy (20–30%), and the inflammatory heart diseases (10–20%). Despite the rapid development of the interventional and pharmacological methods of arrhythmia treatment, the incidence of heart rhythm disorders is on the rise, which, in turn, increases the cardiac mortality, morbidity, duration of hospital stay, and total costs for the health care system. State-of-the-art cardiology and arrhythmology are still unable to completely solve such major problems as AF and VTs linked to the sudden cardiac death and heart failure.

According to increasing number of reports available in the Russian and world literature, the need for the preoperative topical

ется принципиально важной и актуальной, что подтверждается многочисленными алгоритмами, направленными на неинвазивное выявление расположения фокуса аритмии, которые все чаще описываются в российской и мировой литературе. Это и неудивительно, поскольку от локализации аритмогенного субстрата зачастую зависит как прогноз течения заболевания в целом, так и успешность медикаментозного и катетерного лечения [1, 2].

Началом неинвазивной электрофизиологической диагностики считается 1887 г., когда А. Waller впервые записал кардиограмму человека на капиллярном электрометре. В 1893 г. на заседании Нидерландской медицинской ассоциации W. Einthoven предложил к использованию новый термин – электрокардиограмма (ЭКГ). 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 (ЖЭС) [3]. В 1913 г. W. Einthoven и соавт. опубликовали статью, в которой предложили к использованию три стандартных отведения: от левой руки к правой, от правой руки к ноге и от ноги к левой руке с разностями потенциалов: V₁, V₂ и V₃ соответственно. Такая комбинация составляет электродинамически равносторонний треугольник с центром в источнике тока в сердце. Эта работа положила начало векторкардиографии, получившей развитие в 1920-х годах еще при жизни W. Einthoven.

В 1969 г. M.B. Rosenbaum впервые предложил алгоритм топической диагностики ЖЭС, основываясь на ЭКГ в 12 отведениях, суть которого заключалась в оценке электрической оси, ширины комплекса QRS и его формы, напоминающей морфологию блокады правой (ПНПГ) или левой ножек пучка Гиса (ЛНПГ). По результатам данного анализа автор разработал правило, которое гласит, что результирующий вектор комплекса QRS при ЖЭС направлен в сторону противоположного желудочка [4]. Предложенная методика позволяла топически разделить все ЖЭС как в правом (ПЖ), так и левом желудочках (ЛЖ) на 4 локализации: переднюю или заднюю стенки, верхушечные или базальные отделы.

Сегодня существует множество различных методов неинвазивной топической диагностики аритмогенного фокуса как при желудочковых, так и предсердных НРС, включающих в себя определение расположения очага аритмии по данным ЭКГ в 12 отведениях; поверхностную магнитокардиографию, где используется феномен магнитной индукции, возникающей при работе миокарда как электрически активной ткани; тканевое допплеровское сканирование как метод ультразвуковой диагностики; метод визуализации эктопического очага по средствам равновесной томовентрикулографии с меченными эритроцитами. Однако каждый из предлагаемых вариантов имеет как положительные стороны, так и недостатки, и именно с этим связана непрекращающаяся работа в данном направлении. Основным вопросом неинвазивного картирования до сих пор остается разная диагностическая точность, колеблющаяся в среднем от 52 до 88% [5–12].

К настоящему времени предложено несколько алгоритмов топической диагностики ЖЭС по стандартной ЭКГ в 12 отведениях. В большинстве своем они основаны на соотношении зубцов R/S в разных отведениях и отклонении электрической оси сердца во время эктопического сокращения [13, 14]. Остановимся на некоторых из них. В 1998 г. S. Kamakura и соавт. при сопоставлении результатов радиочастотной аблации с ЭКГ в 12 отведениях и поверхностным изопотенциальным картированием выявили ряд паттернов, характерных для ЖЭС и ЖТ из того или иного отдела ПЖ или ЛЖ, при которых диагностическая точность составляла 66–86% [15]. В 1999 г. Y. Yoshida и соавт. провели исследование

diagnostics of various arrhythmias currently remains essential and relevant as confirmed by numerous algorithms aimed at a non-invasive localization of arrhythmogenic focus. It is no surprise considering that both the prognosis of the disease in general and the success of drug and catheter-based treatment often depend on the localization of the arrhythmogenic focus [1, 2].

The year of 1887 is considered the beginning of the non-invasive electrophysiological diagnostics when Augustus D. Waller recorded human the cardiogram with a capillary electrometer for the first time. At a meeting of the Dutch Medical Association in 1893, Willem Einthoven proposed to use the novel term of electrocardiogram (ECG). In 1908, for the first time, Friedrich Kraus and Georg F. Nicolai registered premature ventricular contractions (PVC) using the electrocardiograph created by W. Einthoven in 1903 based on a string galvanometer [3]. In 1913, W. Einthoven with colleagues published the article proposing to use three standard leads from the left arm to the right arm, from the right arm to the foot, and from the foot to the left arm with the corresponding differences of potentials: V₁, V₂, and V₃, respectively. This combination makes the equilateral electrodynamic triangle with the center at the current source in the heart. This work laid the foundation for the vectorcardiography that gained momentum in 1920s when W. Einthoven was still alive.

In 1969, Mauricio B. Rosenbaum proposed an algorithm for the topical diagnosis of PVC based on 12-lead ECG for the first time. The essence of this approach consists in the assessment of the electrical axis, QRS complex width, and its shape reminiscent of the morphology of the right or left bundle branch block (RBBB and LBBB, respectively). Based on the results of this analysis, the author developed the rule stating that the resultant vector of the QRS complex in PVC is directed towards the opposite ventricle [4]. This method allowed to topically divide all PVC both in the right and the left ventricles (RV and LV, respectively) into four localizations: anterior or posterior walls and apical or basal segments.

Currently, a variety of different methods is available for the non-invasive topical diagnostics of the arrhythmogenic focus both in the ventricular and atrial arrhythmias. These methods comprise 12-lead ECG-based arrhythmogenic focus localization; surface magnetocardiography using the phenomenon of magnetic induction occurring when the heart is working as an electrically active tissue; tissue Doppler imaging as a medical ultrasound technology; and ectopic focus visualization via the tomographic-equilibrium radionuclide ventriculography with labelled erythrocytes. However, each of the proposed technologies has both advantages and disadvantages providing rationale for continuous work in this area. The varied accuracy ranging from 52 to 88% remains the main challenge of the non-invasive mapping [5–12]. To date, several 12-lead ECG-based algorithms for topical PVC diagnosis have been proposed. In the majority of cases, these algorithms assess the ratios of R/S waves in different leads as well as deviation of the electrical axis of the heart during ectopic contractions [13, 14]. Let us delve into some of the algorithms. In 1998, Shiro Kamakura with coauthors matched the results of the radiofrequency ablation with 12-lead ECG and surface isopotential mapping, which allowed to identify the patterns characteristic of PVC and VT from one or another area of the right or left ventricle with the diagnostic accuracy of 66–86% [15]. In 1999, Yukihiko Yoshida with coauthors investigated data obtained from the stimulation mapping of VT arising from the right ventricular outflow tract (RVOT) using Basket-catheter and results of surface 12-lead ECG. They identified the ORS complex patterns characteristic of particular arrhythmogenic focus localizations. In the years that followed, Russian scientists

вание данных, полученных при стимуляционном картировании ЖТ из выводного отдела правого желудочка (ВОПЖ) с помощью Basket-катетера, и результатов поверхностных 12-канальных ЭКГ, определили характерные паттерны QRS для той или иной локализации очага аритмии. В 2002 г. F. Ouyang предложил алгоритм диагностики фокуса ЖТ из ВОПЖ и выводного отдела левого желудочка (ВОЛЖ) по 12-канальной ЭКГ [16]. В 1998 г. S. Kamakura при сопоставлении результатов радиочастотной абляции с ЭКГ в 12 отведений выявил ряд паттернов, характерных для ЖТ и/или ЖЭС из различных отделов ВОПЖ или ВОЛЖ, при которых диагностическая точность составляла 66–86% [15]. В дальнейшем российские исследователи, обследовав более 100 человек с помощью данной методики, пришли к выводу, что точность диагностики составляет 63,27%, чувствительность и специфичность 60,87 и 65,38% соответственно [8]. В 2002 г. F. Ouyang предложил алгоритм диагностики фокуса ЖТ из ВОПЖ и ВОЛЖ по поверхностной 12-канальной ЭКГ и показал, что в зависимости от паттерна ЭКГ чувствительность метода может варьировать от 53 до 95% [16]. Среди российских исследований наиболее интересным представляется алгоритм топической диагностики желудочковых НРС на основе 12-канальной ЭКГ, разработанный в Центре сердечно-сосудистой хирургии им. А.Н. Бакулева под руководством академика РАМН А.Ш. Ревишвили. При сравнительном анализе данных ЭКГ и локализаций фокусов аритмий были выявлены характерные паттерны, которые легли в основу алгоритма определения местоположения аритмогенного фокуса [17]. В 2004 г. группа исследователей из Санкт-Петербурга опубликовала свой алгоритм топической диагностики некоронарогенных желудочковых НРС, основанный также на 12-канальной записи ЭКГ, и показала, что указанная методика позволяла предположить верную локализацию аритмогенного фокуса в 88,1% случаев [18]. По аналогии с определением локализации желудочковых аритмий по данным 12-канальной ЭКГ разработаны алгоритмы топической диагностики предсердных НРС, которые также широко используются в реальной клинической практике.

Другими методами выявления локализации фокуса желудочковой и реже предсердной аритмии является поверхностная магнитокардиография, где используется феномен магнитной индукции, возникающей при работе миокарда как электрически активной ткани [19]. Тканевое допплеровское сканирование как метод ультразвуковой диагностики основано на измерении амплитуды движения стенок сердца в каждой конкретной области во время систолы. Аритмогенным фокусом при данном исследовании считается участок миокарда, где появляется наиболее ранний закодированный в цвете сигнал в начале систолы [20, 21]. За последнее десятилетие все чаще стали применяться радионуклидные методы диагностики. С целью визуализации эктопического очага было предложено использовать равновесную томовентрикулографию с меченными эритроцитами. Однако, согласно опубликованной литературе, диагностическая точность предлагаемого метода не высока и составляет 53–63%, а чувствительность и специфичность колеблются в диапазонах 53–74 и 43–66% соответственно [6, 8].

Методы, основанные на вычислительной реконструкции электрофизиологических процессов сердца, в частности, на решении обратной задачи электрокардиографии, открывают новые возможности диагностики сердечных аритмий. Под прямой задачей электрокардиографии понимается 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 по-

examined over 100 individuals by using this approach and concluded that its diagnostic accuracy, sensitivity, and specificity were 63.27%, 60.87%, and 65.38%, respectively [8]. In 2002, Feifan Ouyang proposed an algorithm to diagnose the focus of VT from RVOT and the left ventricular outflow tract (LVOT) based on 12-lead ECG showing that the sensitivity of the method may range from 53% to 95% depending on the ECG pattern [16]. Among the Russian studies, the 12-lead ECG-based algorithm for topical diagnosis of ventricular arrhythmias that was developed in the Bakulev Scientific Center of Cardiovascular Surgery under the supervision of Professor Amiran Sh. Revishvili seems the most interesting. Based on comparative analysis of ECG data and arrhythmia foci, the characteristic patterns were identified providing the basis for the algorithm of determination of the arrhythmogenic focus localization [17]. In 2004, a research team from Saint-Petersburg published the original algorithm for the topical diagnostics of the non-coronarogenic ventricular arrhythmias, which was also based on 12-lead ECG recordings. They demonstrated that the method allowed to accurately predict the arrhythmogenic focus localization in 88.1% of cases [18]. Similarly to the detection of the ventricular arrhythmia localizations based on 12-lead ECG, the algorithms for topical diagnostics of atrial arrhythmias have been developed and are broadly used in a real life clinical practice.

Surface magnetocardiography is the other method for the detection of ventricular and, less often, atrial arrhythmias where the magnetic induction phenomenon due to the myocardium functioning as an electrically active tissue is used [19]. Tissue Doppler imaging as a method of the ultrasound diagnostics is based on the measurements of the amplitudes of cardiac wall motion in every particular region during a systole. An arrhythmogenic focus in this technique is considered the myocardial area where the earliest color-coded signal appears in the beginning of a systole [20, 21]. During recent decade, the radionuclide methods of diagnostics became increasingly common. Tomographic-equilibrium radionuclide ventriculography with labeled erythrocytes was proposed for the ectopic focus visualization. However, according to published literature, the diagnostic accuracy of the proposed method is not high (53–63%) whereas the sensitivity and specificity rates range in the diapasons of 53–74% and 43–66%, respectively [6, 8].

The methods based on a computational reconstruction of the electrophysiological processes in the heart, in particular, on solving the inverse problem of electrocardiography open up new opportunities for the diagnostics of cardiac arrhythmias. The direct problem of electrocardiography is understood as a computation of the electrical potentials on body surface according to the spread of the electrical activity of the heart. However, for the practical implementation, solving the inverse problem via a computation of the characteristics of cardiac electrical activity according to the body surface distribution of electrical potentials is most important. Direct and inverse problems of electrocardiography are closely associated with each other as the methods for solving the inverse problem must be based on a solution or a formal formulation of the direct problem [22].

Definition of the inverse problem of electrocardiography was introduced by an outstanding electrophysiologists, Robert Plonsey, Roger C. Barr, and Bruno Taccardi, in the late 1960s and early '70s [23]. Solving this problem allows to build, based on a surface isopotential map, the epicardial and endocardial maps and, then, isochronous and propagation maps. Therefore, the electrophysiological methods, based on the inverse problem of electrocardiography, provide an opportunity for NICE to obtain

верхности тела. Прямая и обратная задачи электрокардиологии тесно связаны между собой, так как методы решения обратной задачи должны основываться на решении или формальной постановке прямой задачи [22]. Понятие обратной задачи электроэндоэлектрофизиографии (*Inverse Problem in Electrocardiography*) было введено видными электрофизиологами R. Plonsey, R.C. Barr, B. Taccardi в конце 60-х – начале 70-х годов XX века [23]. Решение данной задачи позволяет по поверхности изопотенциальной карте построить изопотенциальную эпикардиальную и эндокардиальную карту и в дальнейшем изохронные карты и карты распространения волн возбуждения. Таким образом, электрофизиологические методики на основе обратной задачи электроэндоэлектрофизиографии дают возможность неинвазивным путем получить информацию о диагностической ценности, сопоставимую с результатами инвазивного электроэндоэлектрофизиологического исследования (ЭФИ) сердца [24].

Впервые реализовать методику неинвазивного эпикардиального картирования удалось научному коллективу, возглавляемому проф. Y. Rudy (США), предложившему в 2004 г. вариант методики, названный авторами Noninvasive Electrocardiographic Imaging, который предусматривает, помимо поверхностного ЭКГ-картирования, проведение мультиспиральной компьютерной томографии (МСКТ) грудной клетки и сердца [11, 25].

Y. Wang, Y. Rudy и соавт. в своей работе обследовали 26 пациентов с желудочковыми аритмиями. Неинвазивная диагностика проводилась на картирующем комплексе «BioSemi» (США) с построением только эпикардиальных (изопотенциальных, изохронных) карт. Согласно полученным результатам, точность топической диагностики составила 91 и 92% для НРС из ПЖ и ЛЖ соответственно [11].

На основе данного метода был создан программно-аппаратный комплекс для практического использования в клинической практике система «ECVUE» (Cardioinsight Technologies Inc., USA), в которой для регистрации ЭКГ используется специальный жилет с 224 электродами. Аналогичную методику под названием Noninvasive Imaging of Cardiac Electrophysiology представила группа исследователей из медицинского университета Инсбрука (Австрия). Ее отличия от разработки американских коллег заключались в применении магнитно-резонансной томографии (МРТ) для построения трехмерных моделей торса и сердца и использования существенно меньшего числа ЭКГ отведений на поверхности грудной клетки [22, 24, 26]. Еще две группы под руководством профессоров T. Berger и Bin He вели изыскания в области решения обратной задачи электроэндоэлектрофизиологии, однако им не удалось создать систему для широкого практического использования в клинике [27–32].

В 2006–2008 гг. в Центре сердечно-сосудистой хирургии им. А.Н. Бакулева был разработан российский программно-аппаратный комплекс «Амикард» для неинвазивного ЭФИ сердца, который позволяет проводить реконструкцию потенциала электрического поля сердца не только на эпикардиальной поверхности сердца, но и на эндокардиальной поверхности предсердий и желудочков [7].

В целом неинвазивное ЭФИ сердца включает в себя следующие этапы:

- Многоканальная регистрация ЭКГ в 216–252 однополюсных отведениях с поверхности грудной клетки.
- Проведение МСКТ или МРТ грудной клетки и сердца пациентам с уже наложенными поверхностными электродами.
- Совмещение данных многоканальной регистрации ЭКГ и трехмерной реконструкции сердца, полученной по результатам МСКТ или МРТ.
- Создание эпикардиальных и/или эндокардиальных изопотенциальных и изохронных карт на трехмерных моделях

information of the diagnostic value comparable with the results of invasive electrophysiology study (EPS) of the heart [24].

For the first time, the method of the non-invasive epicardial mapping was developed by a research team supervised by Professor Yoram Rudy (USA) who proposed the variant of the method named a non-invasive electrocardiographic imaging. Along with surface ECG mapping, this approach requires multispiral spiral computed tomography (MSCT) of the chest and the heart [11, 25].

In their work, Yong Wang with colleagues examined 26 patients with ventricular arrhythmias. Non-invasive diagnostics was performed with BioSemi mapping system (USA) building only epicardial (isopotential and isochronous) maps. According to obtained results, topical diagnostic accuracy rates were 91% and 92% for arrhythmias originating from RV and LV, respectively [11]. Based on the method, the hardware-software system ECVUE (Cardioinsight Technologies Inc., USA) with a special 224-lead mapping vest for the ECG registration was created for the practical application. Similar method named non-invasive imaging of cardiac electrophysiology was presented by a research team from the Medical University of Innsbruck (Austria). The difference of their method compared with the system designed by the American colleagues consisted in the use of magnetic resonance imaging (MRI) for building three-dimensional models of the trunk and the heart as well as a significantly less number of ECG leads on the surface of the chest [22, 24, 26]. Two other groups headed by Professors Thomas Berger and Bin He conducted studies on solving the inverse problem of electrocardiography, but they were unable to create a system for broad clinical application [27–32].

In 2006–2008, in the Bakulev Scientific Center of Cardiovascular Surgery, the Russian-made hardware-software system ‘Amicard’ was developed for NICE allowing the reconstruction of the potential of the cardiac electrical field not only on the epicardial surface of the heart, but also on the endocardial surface of the atria and the ventricles [7].

Overall, NICE involves the following stages:

- Multichannel ECG registration in 216–252 unipolar leads from the surface of the chest.
- Multispiral computed tomography or MRI of the chest and the heart in patients with the surface leads placed.
- Superposition of data of the multichannel ECG and three-dimensional reconstruction of the heart based on MSCT or MRI data.
- Creation of the epicardial and/or endocardial isopotential and isochronous maps on three-dimensional models of the heart with the determination of the area of the earliest activation corresponding to the projection of the arrhythmogenic focus.
- According to the available literature, the accuracy of the topical diagnostics with the hardware-software system ‘Amicard’ in patients with ventricular arrhythmias is 88.3% and may reach 94% in case of the arrhythmogenic focus localization in RVOT or LVOT (Fig. 1, 2).

Comparison of data obtained by Y. Wang and Y. Rudy with the results of NICE performed with the domestic system suggests that the accuracy of epi- and endocardial mapping of the right ventricular arrhythmias with hardware-software system ‘Amicard’ is higher than that demonstrated by the American colleagues: 94 and 91%, respectively, whereas the accuracy of mapping the left

серда с определением области наиболее ранней активации, соответствующей проекции аритмогенного фокуса.

- Согласно опубликованным данным, точность топической диагностики с использованием программно-аппаратного комплекса «Амикард» у больных с желудочковыми НРС в целом составляет 88,3% и может достигать 94% при локализации аритмогенного фокуса в ВОПЖ или ВОЛЖ (рис. 1, 2).

Сравнивая данные, полученные Y. Wang и Y. Rudy, с результатами неинвазивного ЭФИ с использованием отечественного комплекса, можно утверждать, что точность эпи-эндокардиаль-

ventricular arrhythmias is lower: 75 and 92%, respectively. In our opinion, this observation may be explained by the fact that the patients enrolled in the trial studying the domestic system differed from the patients examined by the American researchers in regard to the localization of the arrhythmogenic focus. However, if these two methods are compared in patients with similar localizations of the arrhythmogenic focus, then the diagnostic values will be approximately the same [1, 2, 5, 11, 33–38]. The application of NICE in patients with chronic heart failure before the implantation of the device for cardiac resynchronization therapy also demonstrated the advantages as it allowed visualization of the area with a

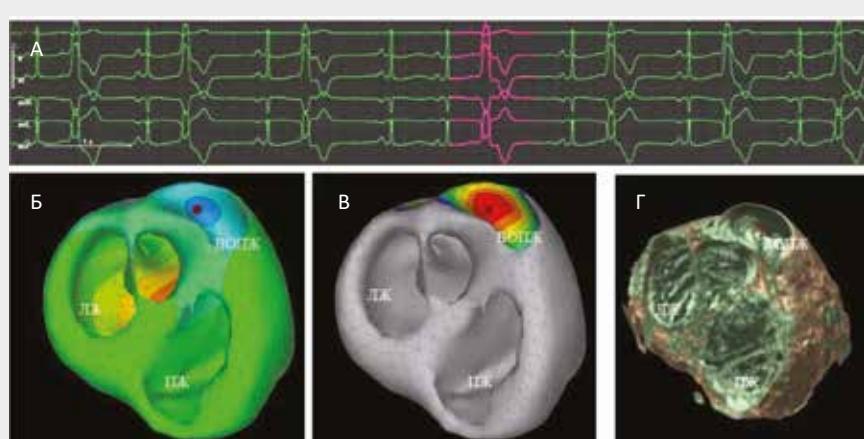


Рис. 1. Неинвазивная топическая диагностика ЖЭС из ВОПЖ

Примечание: А – стандартные отведения ЭКГ; Б – изопотенциальная карта; В – изохронная карта; Г – 3D реконструкция сердца, полученная при МСКТ.

Fig. 1. Noninvasive imaging-based topical diagnosis of premature ventricular contractions from the right ventricular outflow tract

Note: А – electrocardiogram; Б – isopotential map; В – isochronous map; Г – multispiral computed tomography-based 3D reconstruction of the heart.

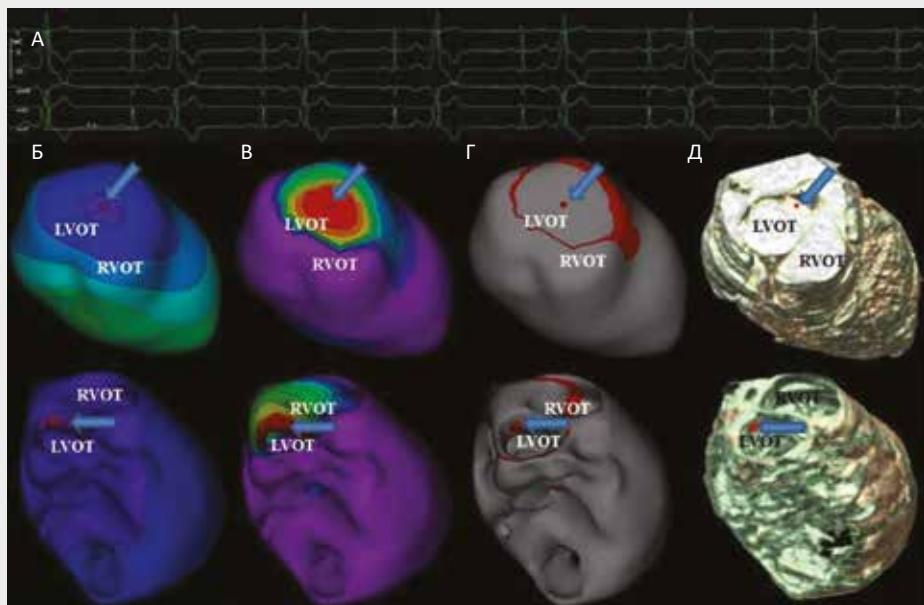


Рис. 2. Неинвазивная топическая диагностика ЖЭС из проекции левого синуса Вальсальвы

Примечание: А – ЭКГ в 12 отведениях; Б – изопотенциальные карты; В – изохронные карты; Г – карты распространения волн возбуждения; Д – 3D реконструкции сердца, полученные при МСКТ.

Fig. 2. Non-invasive imaging-based topical diagnosis of premature ventricular contractions from the left sinus of Valsalva

Note: А – electrocardiogram; Б – isopotential map; В – isochronous map; Г – propagation map; Д – multispiral computed tomography-based 3D reconstruction of the heart.

ного картирования правожелудочных аритмий с помощью программно-аппаратного комплекса «Амикард» выше, чем у американских коллег – 94 и 91% соответственно, а левожелудочных НРС ниже – 75 и 92% соответственно. Данный факт, на наш взгляд, можно объяснить тем, что пациенты, включенные в исследование с использованием отечественной системы, по локализации аритмогенного фокуса отличались от таковых, обследованных американскими учеными. Если же попытаться сопоставить эти две методики по одинаковым локализациям, то диагностическая ценность будет приблизительно одинаковой [1, 2, 5, 11, 33–38].

Использование методики неинвазивного картирования у пациентов с хронической сердечной недостаточностью перед имплантацией ресинхронизирующего устройства также продемонстрировало свои преимущества: исследование визуализирует зону поздней активации при блокаде ЛНПГ, «эпицентр» которой может являться местом оптимальной имплантации левожелудочкового электрода [39].

Неинвазивное ЭФИ сердца активно используется и у больных с предсердными тахиаритмиями. Первые результаты были получены группой исследователей во главе с академиком РАН А.Ш. Ревишвили в 2012 г. Авторы, обследовав 7 пациентов с очаговыми предсердными аритмиями, показали, что результаты неинвазивного ЭФИ с использованием комплекса «Амикард» во всех случаях совпадали с данными внутрисердечного картирования как при правопредсердной, так и левопредсердной экстрасистолии [33]. В дальнейшем ими же было проведено валидационное исследование у 4 больных с ТП I типа, в котором было продемонстрировано, что неинвазивное фазовое картирование позволяет правильно определить последовательность активации при типичном ТП с различными направлениями вращения возбуждения [40]. В 2013 г. другая научная группа из Бордо (Франция) показала, что точность неинвазивного ЭФИ в целом составляет 92%, но может варьировать в зависимости от механизма тахиаритмии. В данное исследование были включены 52 пациента с различными предсердными тахикардиями, а для неинвазивного исследования использовался метод только эпикардиального картирования с записью ЭКГ с 252 грудными отведениями [41]. Опыт работы ученых из Научно-исследовательского института кардиологии Томского национального исследовательского медицинского центра Российской академии наук также является подтверждением высокой диагностической точности неинвазивного картирования у пациентов с предсердными тахиаритмиями. Обследовав 64 пациента, авторы установили, что данные неинвазивного ЭФИ в 92,9% совпадают с результатами инвазивного картирования и радиочастотной абляции, а расхождения в основном возникают у пациентов с тахикардиями с неустойчивым циклом [42].

В последнее время неинвазивное картирование все чаще используется у пациентов с крупноволновой персистирующей и длительно-персистирующей формами ФП. Основная идея заключается в поиске «драйвера» ФП. По данным неинвазивного исследования можно достаточно четко определить область наиболее ранней активации в левом предсердии (ЛП), которая, как правило, совпадает с зонами фрагментированных, двойных потенциалов, а также с минимальным циклом тахикардии, выявленным в процессе катетерного лечения. Проведение линейной абляции через данную область, как правило, приводит к увеличению цикла тахикардии или даже восстановлению синусового ритма (рис. 3, 4).

Еще одним перспективным направлением в использовании неинвазивного ЭФИ является интраоперационное поверхностное картирование у пациентов с ЖТ и имплантированными кардиовертерами-дефибрилляторами.

delayed activation in LBBB, which may be an optimal place for the implantation of the left ventricular lead [39].

Non-invasive imaging of cardiac electrophysiology is also performed in patients with atrial tachyarrhythmias. The first results were obtained by the research team headed by Professor Amiran Sh. Revishvili, Full Member of the RAS, in 2012. Authors examined seven patients with focal atrial arrhythmias and showed that the results of NICE by using 'Amicard' system agreed with data of the intracardiac mapping in all cases for the right and left atrial extrasystoles [33]. Thereafter, they performed a validation study in four patients with type I AFL and showed that the non-invasive phase mapping allowed to accurately determine the activation sequence in typical AFL with different directions of the excitation rotation [40].

In 2003, the research group from Bordeaux (France) showed that the overall accuracy of NICE is 92%, but it may vary depending on the mechanism of tachyarrhythmia. This study included 52 patients with diverse atrial tachycardias and the only method used for the non-invasive study was the epicardial mapping based on ECG recording with 252 chest leads [41]. The clinical experience of researchers from Cardiology Research Institute of Tomsk National Research Medical Center of the Russian Academy of Sciences also confirms the high diagnostic accuracy of NICE in patients with atrial tachyarrhythmias. By examining 64 patients, the authors found out that NICE data coincide with the results of invasive mapping and radiofrequency ablation in 92.9% whereas discrepancies occur mostly in patients with unstable cycle of tachycardia [42].

In recent years, NICE is increasingly used in patients with persistent large-wave and long-standing persistent AF. The main idea is to search for AF drivers. Based on NICE data, one may clearly determine the area of the earliest activation in the left atrium, which, as a rule, coincides with the areas of fragmented and double potentials as well as with the minimum cycle of tachycardia detected in the process of the catheter treatment. The linear ablation through this area results, as a rule, in an increase in the tachycardia cycle and even in the restoration of sinus rhythm (Fig. 3, 4).

One more promising area for the use of NICE is an intraoperative surface mapping in patients with VT and implanted cardioverters-defibrillators (ICD). In such patients, VT often has a polymorphic character and may be hemodynamically unstable. In these patients, VT is induced from ICD during an interventional treatment; ECG is immediately registered with 216–252 leads (one complex is enough for the non-invasive activation mapping) and the tachycardia is terminated. After that, based on obtained results, isopotential and isochronous endocardial and epicardial maps are generated and radiofrequency ablation is performed. Indeed, a group of researchers (Alexey Tsiganov, Mikhail Chmelevsky, Christine Lemes, and others) used the above mentioned method in eight patients with the ischemic and nonischemic cardiomyopathy and showed that NICE is capable to visualize macro re-entry in patients with monomorphic VT associated with the presence of a scar area. Polymorphic VT or VF are primarily induced in patients without scar and non-invasive mapping may help in identifying the rotor activity or/and multiple re-entry [43].

Therefore, NICE, based on solving the inverse problem of electrocardiography, has clearly surpassing diagnostic capabilities compared with other methods for the topical diagnostics both in the accuracy and in sensitivity. Nevertheless, many questions remain and the non-invasive mapping is still inferior in its capabilities to the reference method of intracardiac EPS, which requires

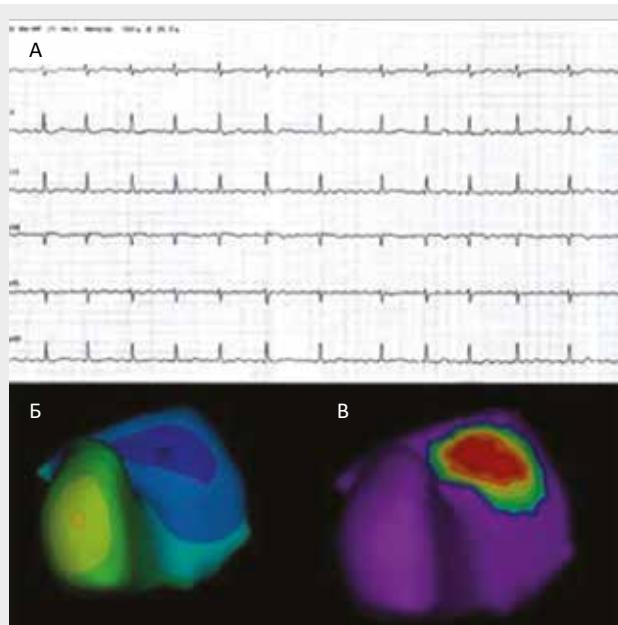


Рис. 3. Неинвазивная топическая диагностика фибрилляции предсердий, зона наиболее раннего возбуждения в области передней стенки левого предсердия

Примечание: А – ЭКГ в стандартных отведениях; Б – изопотенциальная карта; В – изохронная карта.

Fig. 3. Noninvasive imaging of atrial fibrillation; the zone of the earliest activation in the anterior wall of the left atrium

Note: A – electrocardiogram; Б – isopotential map; В – isochronous map.

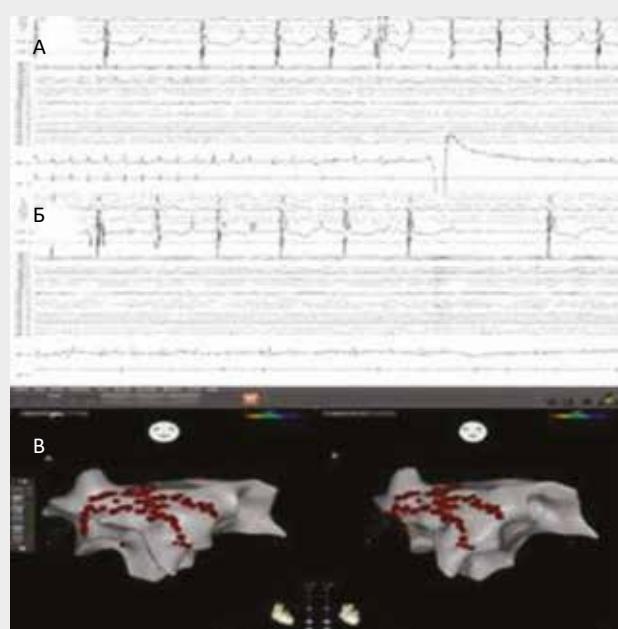


Рис. 4. Радиочастотная абляция фибрилляции предсердий

Примечание: А – начало абляции, изменение цикла тахикардии; Б – купирование тахикардии на воздействии; В – 3D реконструкция с использованием системы Carto 3™ (США).

Fig. 4. Radiofrequency ablation of the atrial fibrillation

Note: А – beginning of ablation and change of tachycardia cycle; Б – the sinus rhythm recovery; В – 3D reconstruction with Carto 3™ system (USA).

У таких больных ЖТ часто имеют полиморфный характер и могут быть гемодинамически нестабильными. Данным пациентам во время интервенционного лечения с имплантированным устройством индуцируется ЖТ, сразу же регистрируется ЭКГ с 216–252 отведений (для неинвазивно-

further research to enhance the accuracy of the computational reconstruction of epi- and endocardial electrograms and to identify optimal algorithms for the computational solution of the inverse problem of the electrocardiography with quick processing of the obtained pool of data.

го активационного картирования достаточно одного комплекса), а тахикардия купируется. Затем по полученным результатам строятся изопотенциальные и изохронные эндокардиальные и эпикардиальные карты, проводится радиочастотная абляция. Так, группа исследователей (А. Цыганов, М. Чмелевский, Christine Lemes и др.) использовала указанный метод у 8 больных с ишемической и неишемической кардиомиопатией и показала, что неинвазивное картирование способно визуализировать macro re-entry у пациентов с мономорфной ЖТ, ассоциированной с наличием рубцовой зоны. Полиморфные ЖТ или фибрилляция желудочков в основном индуцируются у больных без рубца, а неинвазивное картирование может помочь в определении роторной активности и/или множественных re-entry [43].

Таким образом, очевидно, что диагностические возможности неинвазивного вычислительного ЭФИ сердца, основанного на решении обратной задачи электрокардиографии, значительно превосходят другие методы топической диагностики как по точности, так и чувствительности. Тем не менее, до сих пор остается много нерешенных вопросов, а неинвазивное картирование уступает по своим возможностям «эталонному» методу внутрисердечного ЭФИ, что требует дальнейших исследований в направлении повышения точности вычислительной реконструкции эпи- и эндокардиальных электрограмм и определения оптимальных алгоритмов к полному решению обратной задачи электрофизиологии с быстрой обработкой получаемого массива данных.

В настоящее время на рынке представлены приборы как для инвазивного ЭФИ, так и для неинвазивного электрофизиологического картирования сердца. Однако в условиях операционной необходима интегрированная система неинвазивного электрофизиологического картирования с инвазивным трехмерным электроанатомическим картированием. Создание гибридных систем позволит с очень высокой точностью визуализировать электрофизиологические процессы на эпи- и эндокардиальной поверхности в режиме реального времени и проводить по полученным результатам радиочастотной абляции аритмий с одновременным снижением лучевой нагрузки на пациента и медицинский персонал. Создание системы позволит с достаточно высокой точностью вплоть до 0,5–1,0 см локализовать эктопические очаги аритмии сердца не только для идиопатических аритмий (т. е. для пациентов без структурных изменений сердца), но и для топической диагностики как предсердных, так и желудочковых аритмий у пациентов разных клинических групп, например, с рубцовыми изменениями.

Предлагаемая к разработке система, в которой работа всех компонентов будет контролироваться единой компьютерной программой, позволит существенно упростить управление в условиях операционной. С ее помощью также можно будет устанавливать параметры радиочастотного воздействия и электроокардиостимуляции и обеспечить гибкую автоматизацию процесса исследования и лечения, в частности, автоматическое сохранение (регистрацию) событий в процессе исследования (абляция, стимуляция), автоматическую корректировку параметров стимуляции, индикацию аварийных ситуаций и автоматическое принятие мер по их устранению. Система позволит проводить картирование электрофизиологических процессов одновременно в 4 камерах сердца, картирование эпи- и эндокардиальной поверхности, апериодических процессов, представляющих значительную сложность и трудно индуцируемых во время оперативного лечения НРС [22], совмещать данные инвазивного ЭФИ и неинвазивного электрофизиологического картирования сердца.

At present, the market presents devices both for the invasive EPS and for non-invasive electrophysiological mapping of the heart. However, in the context of surgical procedures, the integrated system of non-invasive mapping with invasive electroanatomical mapping is needed. The creation of hybrid systems will allow to visualize electrophysiological processes on the epi- and endocardial surface in a real time and, based on obtained results, to perform the radiofrequency ablation of arrhythmias with simultaneous reduction of the absorbed radiation dose to the patient and medical personnel. The creation of the system will ensure high accuracy (up to 0.5–1.0 cm) of cardiac arrhythmia localization not only in patients without structural changes in the heart, but also for topical diagnostics of both atrial and ventricular arrhythmias in patients of different clinical groups, for example, with scar changes.

The system, proposed for the development, will have the components integrated by unique software, which will allow to essentially simplify the control of the system in the conditions of a surgery room. With the help of the system, one may also set the parameters of the radiofrequency ablation and cardiac pacing and ensure a flexible automatization of the diagnostics and treatment processes, in particular, automatic storing (registration) of the events in the process of the study (ablation, pacing), automatic correction of the cardiac pacing parameters, indication of the emergency situations, and automatic measures for the emergency response. The system will allow to perform mapping of the electrophysiological processes simultaneously in four cardiac chambers, mapping of the epi- and endocardial surfaces, and mapping of the aperiodic processes and arrhythmias challenging for induction during surgical treatment [22]. The system also allows to integrate data of the invasive EPS and NICE.

Литература

- 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.
- 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.
- Kraus F., Nicolai G.F. Ueber des Elektrokardiogramm unter normalen und pathologischen Verhältnissen. *Berl. klin. Wchnschr.* 1908;34(I).
- Rosenbaum M.B. Classification of ventricular extrasystoles according to form. *J. Electrocardiol.* 1969;2(3):289–297.
- Ревишвили А.Ш., Рзаев Ф.Г., Снегур Р.Ю., Лабарткава Е.З. Алгоритм топической диагностики правожелудочных аритмий. *Вестник аритмологии*. 2006;46:5–11.
- Саушкин В.В. Сцинтиграфическая диагностика сократительной дисфункции сердца у пациентов с желудочковыми аритмиями: автореф. дис. ... канд. мед. наук. Томск; 2013:23.
- Ляджина О.С., Калинин В.В., Фетисова Е.А., Симонян Г.Ю., Ревишвили А.Ш. Топическая диагностика некоронарогенной желудочковой экстракардиолитии на основе неинвазивного активационного картирования. *Вестник аритмологии*. 2009;57:47–51.
- Чернышёв А.А. Идиопатические желудочковые нарушения ритма сердца у детей и подростков: клинико-функциональная характеристика и результаты лечения: автореф. дис. ... канд. мед. наук. Томск; 2011:22.
- Markowitz St.M., Litvak B.L., Ramirez de Arellano E.A., Markisz J.A., Stein K.M., Lerman B.B. Adenosine-sensitive ventricular tachycardia. Right ventricular abnormalities delineated by magnetic resonance imaging. *Circulation*. 1997;96:1192–1200.
- Marchlinski F.E., Zado E., Dixit S. Electroanatomic substrate and outcome of catheter ablative therapy for ventricular tachycardia in setting of right ventricular cardiomyopathy. *Circulation*. 2004;110:2293–2298.
- Wang Y., Cuculich P.S., Zhang J., Desouza K.A., Vijayakumar R., Chen J., et al. Noninvasive electroanatomic mapping of human ventricular arrhythmias using ECG imaging (ECGI). *Science Translational Medicine*. 2011;3:98ra84. DOI: 10.1126/scitranslmed.3002152.
- Coggins D.L., Lee R.J., Sweeney J.J., Chein W.W., Van Hare G., Epstein L., et al. Radiofrequency catheter ablation as a cure for idiopathic tachycardia of both left and right ventricular origin. *Am. Coll. Cardiol.* 1994;6:1331–1341.
- Jadonath R.L. Utility of the 12-lead electrocardiogram in localizing the origin of right ventricular outflow tract tachycardia. *Am. Heart J.* 1995;130:1107–1113.
- Shima T., Ohnishi H., Inoue T., Yoshida A., Shimizu H., Itagaki T., et al. The relation between pacing sites in the right ventricular outflow tract and QRS morphology in the 12-lead EGG. *Jpn. Circ. J.* 1998;62:399–404.
- Yoshida Y., Hirail M., Murakami Y., Kondo T., Inden Y., Akahoshi M., et al. Localization of precise origin of idiopathic ventricular tachycardia from the right ventricular outflow tract by a 12-lead ECG: A study of pace mapping using a multielectrode "Basket" catheter. *PACE*. 1999;22:1760–1768.
- Ouyang F., Fotuhi P., Ho S.Y., Hebe J., Volkmer M., Goya M., et al. Repetitive monomorphic ventricular tachycardia originating from the aortic sinus cusp: Electrocardiographic characterization for guiding catheter ablation. *J. Am. Coll. Cardiol.* 2002;39:500–508.
- Ревишвили А.Ш., Носкова М.В., Рзаев Ф.Г., Артюхина Е.А. Неинвазивная топическая диагностика некоронарогенных желудочковых аритмий. *Вестник аритмологии*. 2004;35:5–15.
- Вайнштейн А.Б., Яшин С.М., Думпис Я.Ю., Шубик Ю.В. Электрокардиографическая топическая диагностика некоронарогенных желудочковых аритмий. *Вестник аритмологии*. 2004;34:11–17.
- Advances in noninvasive electrocardiographic monitoring techniques, eds. Osterhues H., Hombach V., Moss A.J. Kluwer Academic Publishers; 2000:401–411.
- Tada H., Toide H., Naito S., Ito S., Kurokaki K., Kobayashi Y., et al. Tissue tracking imaging as a new modality for identifying the origin of idiopathic ventricular arrhythmias. *Am. J. Cardiol.* 2005;95:660–664. DOI: 10.1016/j.amjcard.2004.10.047.

References

- Khlynin M.S., Batalov R.E., Popov S.V., Krivolapov S.N. Non-invasive topical diagnosis of ventricular arrhythmias. *Vestnik aritmologii=Journal of Arrhythmology*. 2013;73:49–53 (In Russ.).
- Khlynin M.S., Batalov R.E., Popov S.V., Krivolapov S.N. Non-invasive electrocardiographic mapping of ventricular arrhythmias. *Sibirskij medicinskij žurnal=The Siberian Medical Journal*. 2013;28(2):28–31 (In Russ.).
- Kraus F., Nicolai G.F. Ueber des Elektrokardiogramm unter normalen und pathologischen Verhältnissen. *Berl. klin. Wchnschr.* 1908:34(I).
- Rosenbaum M.B. Classification of ventricular extrasystoles according to form. *J. Electrocardiol.* 1969;2(3):289–297.
- Revishvili A.S., Rzaev F.G., Snegur R.Yu., Labartkava E.Z. Algorithm of topical diagnostics of right ventricular arrhythmias. *Vestnik aritmologii=Journal of Arrhythmology*. 2006; 46:5–11 (In Russ.).
- Saushkin V.V. Scintigraphic diagnosis of contractile dysfunction of the heart in patients with ventricular arrhythmias: autoref. dis. ... candidate of medical sciences. Tomsk; 2013:23 (In Russ.).
- Lyadzhina O.S., Kalinin V.V., Fetisova E.A., Simonyan G.Yu., Revishvili A.S. Topic diagnosis of non-coronary ventricular extrasystole on the basis of noninvasive activation mapping. *Vestnik aritmologii=Journal of Arrhythmology*. 2009;57:47–51 (In Russ.).
- Chernyshev A.A. Idiopathic ventricular arrhythmias in children and adolescents: clinical and functional characteristics and results of treatment: autoref. dis. ... candidate of medical sciences. Tomsk; 2011:22 (In Russ.).
- Markowitz St.M., Litvak B.L., Ramirez de Arellano E.A., Markisz J.A., Stein K.M., Lerman B.B. Adenosine-sensitive ventricular tachycardia. Right ventricular abnormalities delineated by magnetic resonance imaging. *Circulation*. 1997;96:1192–1200.
- Marchlinski F.E., Zado E., Dixit S. Electroanatomic substrate and outcome of catheter ablative therapy for ventricular tachycardia in setting of right ventricular cardiomyopathy. *Circulation*. 2004;110:2293–2298.
- Wang Y., Cuculich P.S., Zhang J., Desouza K.A., Vijayakumar R., Chen J., et al. Noninvasive electroanatomic mapping of human ventricular arrhythmias using ECG imaging (ECGI). *Science Translational Medicine*. 2011;3:98ra84. DOI: 10.1126/scitranslmed.3002152.
- Coggins D.L., Lee R.J., Sweeney J.J., Chein W.W., Van Hare G., Epstein L., et al. Radiofrequency catheter ablation as a cure for idiopathic tachycardia of both left and right ventricular origin. *Am. Coll. Cardiol.* 1994;6:1331–1341.
- Jadonath R.L. Utility of the 12-lead electrocardiogram in localizing the origin of right ventricular outflow tract tachycardia. *Am. Heart J.* 1995;130:1107–1113.
- Shima T., Ohnishi H., Inoue T., Yoshida A., Shimizu H., Itagaki T., et al. The relation between pacing sites in the right ventricular outflow tract and QRS morphology in the 12-lead EGG. *Jpn. Circ. J.* 1998;62:399–404.
- Yoshida Y., Hirail M., Murakami Y., Kondo T., Inden Y., Akahoshi M., et al. Localization of precise origin of idiopathic ventricular tachycardia from the right ventricular outflow tract by a 12-lead ECG: A study of pace mapping using a multielectrode "Basket" catheter. *PACE*. 1999;22:1760–1768.
- Ouyang F., Fotuhi P., Ho S.Y., Hebe J., Volkmer M., Goya M., et al. Repetitive monomorphic ventricular tachycardia originating from the aortic sinus cusp: Electrocardiographic characterization for guiding catheter ablation. *J. Am. Coll. Cardiol.* 2002;39:500–508.
- Revishvili A.S., Noskov M.V., Rzaev F. G., Artyukhina E.A. Noninvasive topical diagnosis of noncoronary ventricular arrhythmia. *Vestnik aritmologii=Journal of Arrhythmology*. 2004;35:5–15 (In Russ.).
- Weinstein A.B., Yashin S.M., Dumpis Ya.Yu., Shubik Yu.V. Electrocardiographic topical diagnosis of non-coronary ventricular arrhythmias. *Vestnik aritmologii=Journal of Arrhythmology*. 2004;34:11–17 (In Russ.).
- Advances in noninvasive electrocardiographic monitoring techniques, eds. Osterhues H., Hombach V., Moss A.J. Kluwer Academic Publishers; 2000:401–411.
- Tada H., Toide H., Naito S., Ito S., Kurokaki K., Kobayashi Y., et al. Tissue tracking imaging as a new modality for identifying the origin of idiopathic ventricular arrhythmias. *Am. J. Cardiol.* 2005;95:660–664. DOI: 10.1016/j.amjcard.2004.10.047.
- Sunil Roy T.N., Vikram S., Johnson F., Hiroshi T. Tissue tracking imaging for identifying the origin of idiopathic ventricular arrhythmias: a new

21. Sunil Roy T.N., Vikram S., Johnson F., Hiroshi T. Tissue tracking imaging for identifying the origin of idiopathic ventricular arrhythmias: a new role of cardiac ultrasound in electrophysiology. *Indian Pacing and Electrophysiology Journal.* 2005;5:155–159.
22. Чмелевский М.П., Зубарев С.В., Буданова М.А. Неинвазивное электрофизиологическое картирование в диагностике желудочковых аритмий. *Трансляционная медицина.* 2015;5:91–103. DOI: 10.18705/2311-4495-2015-0-5-91-103.
23. Барр Р. Решения обратной задачи, выраженные непосредственно в форме потенциала. В кн.: Теоретические основы электрокардиологии: под ред. К.В. Нельсона и Д.В. Гезеловица. М.: Медицина; 1979:341–352.
24. 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;51:7–12.
25. Ghanem R.N., 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. DOI: 10.1016/j.hrthm.2004.12.022.
26. Ramanathan C., Ghanem R.N., Jia P., Kyungmoo R., Rudy Y. Noninvasive imaging modality for cardiac electrophysiology and arrhythmia. *Nat. Med.* 2004;10:422–428.
27. Berger T., Fisher G., Pfeifer B., Hanser F.F., Hintringer F., Baumgartner C., et al. Single-beat noninvasive imaging of cardiac electrophysiology of ventricular pre-excitation. *J. Am. Coll. Cardiol.* 2006;48:2045–2052.
28. Berger T., Hintringer F., Fischer G. Non-invasive Imaging of Cardiac Electrophysiology. *Indian Pacing and Electrophysiology Journal.* 2007;7(3):160–165.
29. Berger T., Pfeifer B., Fischer G., Netzer M., Trieb T., Stuehlinger M., et al. Single-beat non-invasive imaging of ventricular endocardial and epicardial activation in patients undergoing CRT. *PLoS One.* 2011 Jan. 27;6(1):e16255. DOI: 10.1371/journal.pone.0016255.
30. Liu C., Skadsberg N.D., Ahlberg S.E., Swingen C.M., Iaizzo P.A., 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.
31. Han C., Pogwizd C.M., Killingsworth C.R., He B. Noninvasive imaging of three dimensional cardiac activation sequence during pacing and ventricular tachycardia. *Heart Rhythm.* 2011;8(8):1266–1272. DOI: 10.1016/j.hrthm.2011.03.014.
32. 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. DOI: 10.1109/TMI.2008.929094.
33. Ревишвили А.Ш., Калинин В.В., Калинин А.В., Лабарткава Е.З., Александрова С.А., Спиридонова Е.И., и др. Неинвазивная диагностика и результаты интервенционного лечения аритмий сердца с использованием новой системы неинвазивного поверхностного картирования «Амикард 01К». *Анналы аритмологии.* 2012;3:39–47.
34. Хлынин М.С., Попов С.В., Криволапов С.Н., Баталов Р.Е. Неинвазивная топическая диагностика нарушений ритма сердца. *Латология кровообращения и кардиохирургия.* 2014;4:96–103.
35. Мамчур С.Е., Хоменко Е.А., Боян Н.С., Романова М.П., Якубик Г.Г. Точность топической диагностики желудочковых эктопических аритмий при помощи неинвазивного картирования. *Комплексные проблемы сердечно-сосудистых заболеваний.* 2016;3:75–80.
36. Чмелевский М.П., Зубарев С.В., Буданова М.А. Неинвазивное электрофизиологическое картирование в диагностике желудочковых аритмий: от научных исследований к клинической практике. *Трансляционная медицина.* 2015;5(34):91–103.
37. Revishvili A.S., Wissner E., Lebedev D.S., Deiss S., Metzner A., Kalinin V.V., et al. Validation of the mapping accuracy of a novel non-invasive epicardial and endocardial electrophysiology system. *Europace.* 2015;17:1282–1288. DOI: 10.1093/europace/euu339.
38. Revishvili A.S., Metzner A., Tsyanov A., Kalinin V., Lemes C., Saguner A.M., et al. Noninvasive epicardial and endocardial mapping of premature ventricular contractions. *Europace.* 2016;19(5):843–849. DOI: 10.1093/europace/euw103.
39. Zubarev S.V., Chmelevsky M.P., Budanov M.A., Trukhina M.A., Ryzhkov A.V., Pakhomov A.V., et al. Improvement of methods of superficial non-invasive epi - and endocardial mapping in disorders of intraven-
- role of cardiac ultrasound in electrophysiology. *Indian Pacing and Electrophysiology Journal.* 2005;5:155–159.
22. Chmelevsky M.P., Zubarev S.V., Budanov M.A. Non-invasive electro-physiological mapping in the diagnosis of ventricular arrhythmias. *Translacionnaja medicina=Translational Medicine.* 2015;5:91–103 (In Russ.). DOI: 10.18705/2311-4495-2015-0-5-91-103.
23. Barr R. Solutions of the inverse problem expressed directly in the form of potential. The theoretical basis of electrocardiology: edited by K.V. Nelson and D.V. Geselowitz. Moscow: Medicine; 1979:341–352 (In Russ.).
24. Revishvili A.S., Kalinin V.V., Lyadzhina O.S., Fetisova E.A. Verification of a new technique of non-invasive electrophysiological study of the heart based on the solution of the inverse problem of electrocardiography. *Vestnik aritmologii=Journal of Arrhythmology.* 2008;51:7–12 (In Russ.).
25. Ghanem R.N., 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. DOI: 10.1016/j.hrthm.2004.12.022.
26. Ramanathan C., Ghanem R.N., Jia P., Kyungmoo R., Rudy Y. Noninvasive imaging modality for cardiac electrophysiology and arrhythmia. *Nat. Med.* 2004;10:422–428.
27. Berger T., Fisher G., Pfeifer B., Hanser F.F., Hintringer F., Baumgartner C., et al. Single-beat noninvasive imaging of cardiac electrophysiology of ventricular pre-excitation. *J. Am. Coll. Cardiol.* 2006;48:2045–2052.
28. Berger T., Hintringer F., Fischer G. Non-invasive Imaging of Cardiac Electrophysiology. *Indian Pacing and Electrophysiology Journal.* 2007;7(3):160–165.
29. Berger T., Pfeifer B., Fischer G., Netzer M., Trieb T., Stuehlinger M., et al. Single-beat non-invasive imaging of ventricular endocardial and epicardial activation in patients undergoing CRT. *PLoS One.* 2011 Jan. 27;6(1):e16255. DOI: 10.1371/journal.pone.0016255.
30. Liu C., Skadsberg N.D., Ahlberg S.E., Swingen C.M., Iaizzo P.A., 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.
31. Han C., Pogwizd C.M., Killingsworth C.R., He B. Noninvasive imaging of three dimensional cardiac activation sequence during pacing and ventricular tachycardia. *Heart Rhythm.* 2011;8(8):1266–1272. DOI: 10.1016/j.hrthm.2011.03.014.
32. 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. DOI: 10.1109/TMI.2008.929094.
33. Revishvili A.S., Kalinin V.V., Kalinin A.V., Labartkava E.Z., Aleksandrova S.A., Spiridonova E.I., et al. Non-invasive diagnosis and results of interventional treatment of cardiac arrhythmias with the use of a new system of non-invasive surface mapping “Amicard 01K”. *Annaly aritmologii=Annals of Arrhythmology.* 2012;3:39–47 (In Russ.).
34. Khlynin M.S., Popov S.V., Krivolapov S.N., Batalov R.E. Non-invasive topical diagnosis of cardiac rhythm *Patologija krovoobrashchenija i kardiohirurgija=Circulation Pathology and Cardiac Surgery.* 2014;4:96–103 (In Russ.).
35. Mamchur S.E., Khomenko E.A., Bohan N.S., Romanova M.P., Yakubik G.G. Accuracy of topical diagnosis of ventricular ectopic arrhythmias using non-invasive mapping. *Kompleksnye problemy serdechno-sudistih zabolovanij=Complex Issues of Cardiovascular Diseases.* 2016;3:75–80 (In Russ.).
36. Chmelevsky M.P., Zubarev S.V., Budanova M.A. Non-invasive electro-physiological mapping in the diagnosis of ventricular arrhythmias: from scientific research to clinical practice. *Translacionnaja medicina=Translational Medicine.* 2015;5(34):91–103 (In Russ.).
37. Revishvili A.S., Wissner E., Lebedev D.S., Deiss S., Metzner A., Kalinin V.V., et al. Validation of the mapping accuracy of a novel non-invasive epicardial and endocardial electrophysiology system. *Europace.* 2015;17:1282–1288. DOI: 10.1093/europace/euu339.
38. Revishvili A.S., Metzner A., Tsyanov A., Kalinin V., Lemes C., Saguner A.M., et al. Noninvasive epicardial and endocardial mapping of premature ventricular contractions. *Europace.* 2016;19(5):843–849. DOI: 10.1093/europace/euw103.
39. Zubarev S.V., Chmelevsky M.P., Budanov M.A., Trukhina M.A., Ryzhkov A.V., Pakhomov A.V., et al. Improvement of methods of superficial non-invasive epi - and endocardial mapping in disorders of intraven-



- поверхностного неинвазивного эпи- и эндокардиального картирования при нарушениях внутрижелудочковой проводимости. *Вестник аритмологии.* 2015;80:42–48.
40. Ревишвили А.Ш., Сопов О.В., Фетисова Е.А., Чайковская М.К., Чмелевский М.П. Неинвазивное фазовое картирование: валидационное исследование у пациентов с трепетанием предсердий. *Вестник аритмологии.* 2016;83:12–17.
41. Shah A.J., Hocini M., Xhaet O., Pascale P., Roten L., Wilton S.B., et al. Validation of novel 3-dimensional electrocardiographic mapping of atrial tachycardias by invasive mapping and ablation: a multicenter study. *J. Am. Coll. Cardiol.* 2013 Sept. 3;62(10):889–897. DOI: 10.1016/j.jacc.2013.03.082.
42. Хлынин М.С., Баталов Р.Е., Попов С.В., Усенков С.Ю., Арчаков Е.А., Хлынин С.М. Неинвазивная диагностика предсердных аритмий с помощью программно-аппаратного комплекса «Амикард». *Вестник аритмологии.* 2017;88:42–45.
43. Tsyanov A., Wissner E., Metzner A., Mironovich S., Chaykovskaya M., Kalinin V., et al. Mapping of ventricular arrhythmias using a novel noninvasive epicardial and endocardial electrophysiology system. *J. Electrocardiol.* 2017;51(1):92–98. DOI: 10.1016/j.jelectrocard.2017.07.018.
- tricular conduction. *Vestnik aritmologii=Journal of Arrhythmology.* 2015;80:42–48 (In Russ.).
40. Revishvili A.S., Sopov O.V., Fetisova E.A., Tchaikovsky M.K., Chmelevsky M.P. Non-invasive phase mapping: validation study in patients with atrial flutter. *Vestnik aritmologii=Journal of Arrhythmology.* 2016;83:12–17 (In Russ.).
41. Shah A.J., Hocini M., Xhaet O., Pascale P., Roten L., Wilton S.B., et al. Validation of novel 3-dimensional electrocardiographic mapping of atrial tachycardias by invasive mapping and ablation: a multicenter study. *J. Am. Coll. Cardiol.* 2013 Sept. 3;62(10):889–897. DOI: 10.1016/j.jacc.2013.03.082.
42. Khlynin M.S., Batalov R.E., Popov S.V., Usenkov S.Yu., Archakov A.E., Khlynin S.M. Non-invasive diagnosis of atrial arrhythmias using hardware-software complex "Amicard". *Vestnik aritmologii=Journal of Arrhythmology.* 2017;88:42–45 (In Russ.).
43. Tsyanov A., Wissner E., Metzner A., Mironovich S., Chaykovskaya M., Kalinin V., et al. Mapping of ventricular arrhythmias using a novel noninvasive epicardial and endocardial electrophysiology system. *J. Electrocardiol.* 2017;51(1):92–98. DOI: 10.1016/j.jelectrocard.2017.07.018.

Информация о вкладе авторов

Хлынин М.С. – разработка концепции и дизайна обзора; интерпретация данных; проверка критически важного интеллектуального содержания; окончательное утверждение содержания для публикации рукописи.

Баталов Р.Е. – интерпретация данных; проверка критически важного интеллектуального содержания; окончательное утверждение содержания для публикации рукописи.

Киселев Н.В. – проверка критически важного интеллектуального содержания; окончательное утверждение содержания для публикации рукописи.

Нам И.Ф. – интерпретация данных; проверка критически важного интеллектуального содержания.

Силиванов В.В. – интерпретация данных; проверка критически важного интеллектуального содержания.

Списивцев С.А. – интерпретация данных; проверка критически важного интеллектуального содержания.

Сведения об авторах

Хлынин Михаил Сергеевич*, канд. мед. наук, научный сотрудник отделения хирургического лечения сложных нарушений ритма сердца и электрокардиостимуляции, Научно-исследовательский институт кардиологии, Томский национальный исследовательский медицинский центр Российской академии наук. ORCID 0000-0002-9885-5204.

E-mail: mskhlynin@mail.ru.

Баталов Роман Ефимович, д-р мед. наук, ведущий научный сотрудник отделения хирургического лечения сложных нарушений ритма сердца и электрокардиостимуляции, Научно-исследовательский институт кардиологии, Томский национальный исследовательский медицинский центр Российской академии наук. ORCID 0000-0003-1415-3932.

E-mail: romancer@cardio-tomsk.ru.

Киселев Николай Васильевич, директор Общества с ограниченной ответственностью «ЛОРГЕ медикал».

Нам Ирина Феликсовна, канд. техн. наук, заместитель директора по науке и инновациям «ЛОРГЕ медикал», доцент отделения электронной инженерии, ИШНКБ Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Силиванов Валерий Владимирович, главный инженер ООО «ЛОРГЕ медикал».

Списивцев Сергей Анатольевич, начальник производства ООО «ЛОРГЕ медикал».

Information about the authors

Mikhail S. Khlynin*, Cand. Sci. (Med.), Research Scientist, Department of Interventional Arrhythmology; Cardiology Research Institute; Tomsk National Research Medical Center, Russian Academy of Sciences. ORCID 0000-0002-9885-5204.

E-mail: mskhlynin@mail.ru.

Roman E. Batalov, Dr. Sci. (Med.), Leading Research Scientist, Department of Interventional Arrhythmology; Cardiology Research Institute; Tomsk National Research Medical Center, Russian Academy of Sciences. ORCID 0000-0003-1415-3932.

E-mail: romancer@cardio-tomsk.ru.

Nikolay V. Kiselev, Director, Limited Liability Company "LORGE Medical".

Irina F. Nam, Cand. Sci. (Tech.), Deputy Director for Science and Innovation, Limited Liability Company "LORGE medical", Associate Professor, Department of Electronic Engineering, National Research Tomsk Polytechnic University.

Valery V. Silivanov, Chief Engineer, Limited Liability Company "LORGE Medical".

Sergey A. Spisivtsev, Head of Production, Limited Liability Company "LORGE Medical".

Поступила 07.04.2019
Received April 07, 2019