

НЕИНВАЗИВНОЕ АКТИВАЦИОННОЕ КАРТИРОВАНИЕ ПРИ ПОСТОЯННОЙ
ЭЛЕКТРОКАРДИОСТИМУЛЯЦИИ ПРОВОДЯЩЕЙ СИСТЕМЫ СЕРДЦАМ.С.Медведь¹, С.В.Зубарев¹, Т.В.Чумарная², А.Е.Бажутина², О.Э.Соловьева², Д.С.Лебедев¹¹ФГБУ «НМИЦ им. В.А.Алмазова» МЗ РФ, Россия, Санкт-Петербург, ул. Аккуратова 2; ²ФГБУН «Институт иммунологии и физиологии Уральского отделения РАН», Россия, Екатеринбург, ул. Первомайская, д.106.

Цель. Выявить особенности активации правого и левого желудочков при стимуляции проводящей системы сердца.

Материал и методы исследования. В рамках исследования сформированы 2 группы. У пациентов группы №1 осуществляется стимуляция проводящей системы сердца (ПСС), у пациентов второй группы - стимуляция без захвата ПСС. Протокол исследования выполнен у 30 пациентов: группа №1 - 20 пациентов, группа №2 - 10. Возраст пациентов составил 73 [57; 81] и 71 [63; 75] лет соответственно. Всем пациентам до и после имплантации электрокардиостимулятора выполнены ЭКГ, неинвазивное активационное картирование с использованием программно-аппаратного комплекса «Амикард», определены ширина QRS, время активации левого (LVAT) и правого (RVAT) желудочков исходно и на фоне стимуляции.

Результаты. По результатам исследования значение ширины нативных комплексов QRS в группе №1 составило 106 [100; 132] мс, в группе №2 - 144 [109; 155] мс ($p > 0,05$); LVAT 70 [60; 93] мс и 88 [75; 115] мс ($p > 0,05$) соответственно; RVAT 62 [50; 74] мс и 85 [67; 117] мс ($p > 0,05$) соответственно. Всем пациентам имплантирован электрод 3830 SelectSecure (Medtronic, Ireland). Значение ширины комплекса QRS при стимуляции в группе №1 составило 117 [109; 125] мс и 160 [145; 173] мс в группе №2; LVATp 76 [65; 89] мс и 129 [119; 148] мс соответственно; RVAT 67 [60; 80] мс и 108 [90; 128] мс соответственно. В ходе исследования выявлены статистически значимые различия между двумя группами всех оцениваемых параметров на фоне стимуляции: QRS ($p = 0,01$), LVAT ($p < 0,01$), RVAT ($p < 0,01$). Необходимо отметить, исходные значения и значения на фоне стимуляции комплекса QRS, LVAT, RVAT у пациентов группы №1 не отличались ($p > 0,05$); у пациентов второй группы значения комплекса QRS, LVAT, RVAT исходно и на фоне стимуляции имели значимые различия ($p = 0,11$, $p < 0,01$ и $p = 0,038$ соответственно).

Выводы. Стимуляция ПСС - перспективный метод электрокардиостимуляции, позволяющий добиться активации миокарда левого и правого желудочка при электрокардиостимуляции существенно не отличающейся от активации при синусовом ритме.

Ключевые слова: стимуляция проводящей системы сердца; неинвазивное активационное картирование; электрокардиостимуляция; компьютерная томография

Конфликт интересов: отсутствует.

Финансирование: Сбор материала выполнен при финансовой поддержке государственного задания МЗ РФ (номер регистрации ЕГИСУ НИОКТР 122041500020-5). Обработка и анализ собранных данных выполнены при финансовой поддержке Российского научного фонда в рамках гранта № 19-14-00134-П.

Рукопись получена: 04.09.2023 **Исправленная версия получена:** 28.10.2023 **Принята к публикации:** 27.11.2023

Ответственный за переписку: Михаил Сергеевич Медведь, E-mail: medved_mikhail@mail.ru

М.С.Медведь - ORCID ID 0000-0002-2825-899X, С.В.Зубарев - ORCID ID 0000-0002-4670-5861, Т.В.Чумарная - ORCID ID 0000-0002-7965-2364, А.Е.Бажутина - ORCID ID 0009-0006-7853-2332, О.Э.Соловьева - ORCID ID 0000-0003-1702-2065, Д.С.Лебедев - ORCID ID 0000-0002-2334-1663

Для цитирования: Медведь МС, Зубарев СВ, Чумарная ТВ, Бажутина АЕ, Соловьева ОЭ, Лебедев ДС. Неинвазивное активационное картирование при постоянной электрокардиостимуляции проводящей системы сердца. *Вестник аритмологии*. 2024;31(1): 47-52. <https://doi.org/10.35336/VA-1251>.

NONINVASIVE ACTIVATION MAPPING DURING THE CARDIAC CONDUCTIVE SYSTEM PACING

M.S.Medved¹, S.V.Zubarev¹, T.V.Chumarnaya, A.E.Bazhutina², O.E.Solovyova², D.S.Lebedev¹¹FSBI «Almazov National Medical Research Centre» of the MH RF, Russia, Saint-Petersburg, 2 Akkuratova str.;²FSBI of Science «Immunology and Physiology Institution of Ural Department of Russian Science Academy» Russia, Ekaterinburg, 106 Pervomayskaya str.

Aim. To identify the features of activation of the right and left ventricles during cardiac conductive system pacing.

Methods. There are 2 groups of the study. The cardiac conductive pacing carried in patients of first group. The cardiac conductive pacing not carried in patients of second group. Before and after implantation of the pacemaker, all

patients underwent ECG, noninvasive activation mapping using the Amycard software and hardware complex, the width of the QRS, the activation time of the left (LVAT) and right (RVAT) ventricles were determined initially and against the background of pacing. The parameter values are presented in the format: median and interquartile range (Me [25; 75]).

Results. The study protocol was performed in 30 patients: first group - 20 patients, second group - 10. The age of the patients was 73 [57; 81] and 71 [63; 75] years, respectively. The value of native QRS complexes in first group was 106 [100; 132] msec, in second group - 144 [109; 155] msec; LVAT 70 [60; 93] msec and 88 [75; 115] msec, respectively; RVAT 62 [50; 74] msec and 85 [67; 117] msec, respectively. There were no statistically significant differences between the groups ($p > 0.05$) in age, values of native QRS, LVAT, RVAT. The implantable electrode model is identical in both groups. The value of the QRS complex during pacing in first group was 117 [109; 125] msec and 160 [145; 173] msec in second group; LVATp 76 [65; 89] msec and 129 [119; 148] msec, respectively; RVAT 67 [60; 80] msec and 108 [90; 128] msec, respectively. The study revealed statistically significant differences between the two groups of all evaluated parameters against the background of pacing: QRS ($p = 0.01$), LVAT ($p < 0.01$), RVAT ($p < 0.01$). It should be noted that the initial values and values against the background of pacing of the QRS, LVAT, RVAT complex in patients of group No. 1 did not differ ($p > 0.05$); in patients of the second group, the values of the QRS, LVAT, RVAT complex initially and against the background of stimulation had significant differences ($p = 0.11$, $p < 0.01$ and $p = 0.038$ respectively).

Conclusion. Cardiac conductive system pacing is a promising method of cardiac pacing, which allows to achieve activation of the myocardium of the left and right ventricles, which does not differ significantly from activation with a sinus rhythm.

Key words: cardiac conductive system pacing; noninvasive activation mapping; pacing; computed tomography

Conflict of interest: none.

Funding: The collection of the material was funded by the MH RF governmental assignment №122041500020-5. The processing and analysis of the collected data were funded by the Russian Science Foundation grant №19-14-00134-P.

Received: 04.09.2023 **Revision received:** 28.10.2023 **Accepted:** 27.11.2023

Corresponding author: Mikhail S. Medved, E-mail: medved_michail@mail.ru

M.S.Medved - ORCID ID 0000-0002-2825-899X, S.V.Zubarev - ORCID ID 0000-0002-4670-5861, T.V.Chumarnaya - ORCID ID 0000-0002-7965-2364, A.E.Bazhutina - ORCID ID 0009-0006-7853-2332, O.E.Solovyova - ORCID ID 0000-0003-1702-2065, D.S.Lebedev - ORCID ID 0000-0002-2334-1663

For citation: Medved MS, Zubarev SV, Chumarnaya TV, Bazhutina AE, Solovyova OE, Lebedev DS. Noninvasive activation mapping during the cardiac conductive system pacing. *Journal of Arrhythmology*. 2024;31(1): 47-52. <https://doi.org/10.35336/VA-1251>.

С момента создания и введения в практику в 1950-х гг. трансвенозных электродов для постоянной электрокардиостимуляции длительное время целевой областью для имплантации желудочковых электродов оставалась верхушка правого желудочка (ПЖ), что было обусловлено особенностями электродов - отсутствием механизма активной фиксации [1]. Однако, уже в 1990-е гг. было доказано, что стимуляция области верхушки ПЖ приводит к отрицательному инотропному эффекту, который обусловлен явлением диссинхронии [2]. В 2000 году была показана возможность осуществления постоянной селективной стимуляции пучка Гиса (ПГ) пациентам с фибрилляцией предсердий и нормальной шириной комплекса QRS [3]. Стимуляция ПГ показала преимущества по отношению к стимуляции ПЖ [4].

Стимуляция проводящей системе сердца (ПСС) является перспективным методом кардиостимуляции, поскольку позволяет проводить стимуляцию наиболее физиологично. В настоящее время при данном типе стимуляции электрод должен быть имплантирован в область ПГ, либо в проксимальные отделы левой ножки пучка Гиса (ЛНПГ). Необходимо отметить, что при сохранной ПСС, при имплантации электрода в область

ПГ распространение потенциала действия происходит по обеим ножкам ПГ, что является потенциальной альтернативой бивентрикулярной стимуляции [4-10].

Методика неинвазивного активационного картирования представляет собой электрокардиографи-

Таблица 1.

Клиническая характеристика пациентов

Параметр	Группа 1 (n=20)	Группа 2 (n=10)	p
Мужчин, n (%)	10 (50%)	9 (90%)	> 0,05
Возраст, лет	73 [57; 81]	71 [63; 75]	> 0,05
ФП в анамнезе, n (%)	7 (35%)	2 (20%)	> 0,05
ДСУ, n (%)	9 (45%)	3 (30%)	> 0,05
АВБ ≥ 2 степени, n (%)	10 (50%)	5 (50%)	> 0,05
БЛНПГ и ее ветвей, n (%)	6 (30%)	10 (100%)	< 0,001
ПБЛНПГ, n (%)	3 (15%)	3 (30%)	> 0,05
БПВЛНПГ, n (%)	3 (15%)	7 (70 %)	< 0,05

Примечания: ФП - фибрилляция предсердий; ДСУ - дисфункция синусового узла; АВБ - атриовентрикулярная блокада; БЛНПГ и ПБЛНПГ - блокада и полная блокада левой ножки пучка Гиса (ЛНПГ), БПВЛНПГ - блокада передней ветви ЛНПГ.

ческую визуализацию, основанную на использовании плотной матрицы электродов на поверхности тела, расположенных вокруг грудной клетки, в сочетании с реконструкцией сердца и тела пациента по данным компьютерной томографии (КТ). Данная методика позволяет оценить особенности активации желудочков как при нативном ритме (в том числе при блокаде ножек ПГ), так и при стимуляции [11-12]. Кроме того, данные, полученные с использованием неинвазивного картирования, коррелируют с аналогичными, полученными при инвазивном картировании [12-13]. Метод неинвазивного активационного картирования с реконструкцией желудочков сердца позволяет произвести расчет времени активации правого (RVAT) и левого (LVAT) желудочка [12-13]. В данной статье выполнен анализ электрофизиологических особенностей активации желудочков сердца по результатам собственного опыта имплантации электродов в ПСС.

Целью данного исследования стало выявление особенностей активации миокарда правого и левого желудочков при электрокардиостимуляции ПСС в сравнении со стандартной стимуляцией.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Проспективное одноцентровое нерандомизированное исследование выполнено в соответствии со стандартами надлежащей клинической практики (Good Clinical Practice) и принципами Хельсинской декларации. Критерии включения пациентов в исследование: пациенты с показаниями к кардиостимуляции которым выполнена попытка имплантации электрода для постоянной электрокардиостимуляции в область ЛНПГ; подписанное информированное согласие; достижение возраста 18 лет.

Критерии не включения пациентов в исследование: повторные имплантации электрода в ПСС; поражение коронарного русла, требующее реваскуляризации; активные воспалительные и аутоиммунные заболевания; наличие противопоказаний для использования рентгенконтрастных веществ; наличие психических расстройств; женщины в период беременности, родов, грудного вскармливания.

Критерии исключения пациентов из исследования: появление аллергических реакций на рентгенконтрастное вещество; отказ пациента от исследования; смерть пациента.

Оцениваемые параметры

Параметр	Группа 1	Группа 2	p
QRS исходно (QRS), мс	106 [100; 132]	144 [109; 155]	> 0,05
ВАЛЖ исходно (LVAT), мс	70 [60; 93]	88 [75; 115]	> 0,05
ВАПЖ исходно (RVAT), мс	62 [50; 74]	85 [67; 117]	> 0,05
QRS на фоне ЭКС (QRS _{sp}), мс	117 [109; 125]	160 [145; 173]	0,01
ВАЛЖ на фоне ЭКС (LVAT _p), мс	76 [65; 89]	129 [119; 148]	< 0,01
ВАПЖ на фоне ЭКС (RVAT _p), мс	67 [60; 80]	108 [90; 128]	< 0,01

Примечания: ВАЛЖ и ВАПЖ - время активации левого и правого желудочков; ЭКС - электрокардиостимуляция.

В рамках исследования сформированы 2 группы. Определение принадлежности пациентов к той или иной группе определялось исходя из возможности осуществления стимуляции ПСС интраоперационно. У пациентов первой группы осуществляется стимуляция с захватом ПСС, у пациентов второй группы - стимуляция без захвата ПСС. Клиническая характеристика пациентов представлена в табл. 1.

Согласно протоколу исследования на предоперационном этапе всем пациентам выполнены электрокардиография (ЭКГ), неинвазивное активационное картирование (Amyscard 01C, EP Solutions SA, Switzerland), КТ сердца (является неотъемлемой частью методики неинвазивного картирования). При выполнении ЭКГ оценен ритм, ширина QRS, наличие патологии проводящей системы сердца, при выполнении неинвазивного картирования - построены трехмерные модели желудочков сердца с оценкой времени активации RVAT и LVAT желудочков на собственном ритме и при стимуляции.

Имплантация электрода в ЛНПГ всем пациентам проводилась одним хирургом, имеющим опыт выполнения данной операции. Целевая область для имплантации - ЛНПГ. Всем пациентам имплантированы стандартные желудочковые, предсердные электроды и электрокардиостимуляторы. Для имплантации в область ПСС использовали электрод 3830 SelectSecure (Medtronic, Ireland) с применением систем доставки (Medtronic C304, Medtronic Ireland; Medtronic C315HIS, Medtronic Ireland; Boston Scientific AcuityPro, Boston Scientific USA). Систему доставки Boston Scientific AcuityPro (Boston Scientific USA) применяли с оптимизацией формы. Методика имплантации беспросветного электрода 3830 в область ЛНПГ подробно описана Huang et al в литературе [8]. Критерии, подтверждающие возможность стимуляции ПСС подробно описаны в литературе [8, 16, 17]. Необходимо отметить, единого мнения относительно системы дифференциальных критериев, подтверждающих стимуляцию ЛНПГ не существует [8, 15-17]. Для подтверждения стимуляции ЛНПГ мы руководствовались ЭКГ критериями. При достижении электрода ЛНПГ при тестовой стимуляции на поверхностной ЭКГ в отведении V1 происходит смена W-образной морфологии широкого комплекса QRS на узкий комплекс QRS с морфологией неполной блокады правой ножки пучка Гиса. Пороги стимуляции ЛНПГ - низкие. В отличие от стимуляции ЛНПГ

Таблица 2.

при осуществлении стимуляции ПГ морфология комплекса QRS будет полностью соответствовать морфологии нативного комплекса, как правило, с более высокими порогами стимуляции в сравнении со стимуляцией ЛНПГ [10].

В послеоперационном периоде всем пациентам проведены повторно неинвазивное активационное картирование, КТ, ЭКГ. ЭКГ выполнено как на собственном ритме, так и на фоне кардиостимуляции. Оценена морфология

и ширина нативного (исходного) и стимулированного комплекса QRS. По данным неинвазивного картирования - построены трехмерные модели желудочков сердца, оценены время активации правого (RVATp) и левого (LVATp) желудочков на фоне стимуляции.

Статистический анализ

Статистический анализ показателей проведен с использованием программного обеспечения STATISTICA 10. Для проверки соответствия распределения количественных показателей выборки нормальному распределению с учетом малых объемов выборок использован критерий Шапиро-Уилка (Shapiro-Wilk test). Параметры выборок, соответствующие нормальному распределению представлены в виде среднего значения и стандартного отклонения в формате $M \pm SD$, параметры не соответствующие нормальному распределению - в виде медианы и интерквартильного размаха в формате $Me [Q1; Q3]$. Учитывая тип распределения, а также малый объем выборок, для оценки статистической значимости различий между количественными параметрами выборки применены критерии Манна-Уитни (Mann-Whitney Test) и t-критерий Стьюдента (Student's t-test), для анализа качественных (бинарные значения) показателей - χ^2 Пирсона (Pearson's chi-squared test), для определения различий зависимых выборок - критерий Уилкоксона (Wilcoxon Signed Ranks Test). Различия между показателями считались статистически значимыми при значении $p < 0,05$.

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Оцениваемые параметры представлены в табл. 2. По критерию Шапиро-Уилка все оцениваемые количественные показатели полученных выборок не соответствуют нормальному распределению. По результатам предоперационной оценки ЭКГ у 30% пациентов группы №1 и у 100% пациентов группы №2 зафиксирована блокада ЛНПГ, либо ее ветвей. Исходные значения ширины нативных комплексов QRS, LVAT, RVAT не имели статистически значимых различий между двумя группами.

Среди пациентов группы №1 16 пациентам осуществляется с не-селективная стимуляция ЛНПГ, 2 - пациента селективная стимуляция ЛНПГ, 1 - селективная стимуляция ПГ, 1 - не-селективная стимуляция ПГ. Статистически значимых различий между значениями QRSp, LVATp, RVATp у пациентов группы №1 на фоне разных видов стимуляции не выявлено.

Значения ширины комплексов QRSp ($p = 0,01$), LVATp ($p < 0,01$), RVATp ($p < 0,01$) на фоне электрокардиостимуляции имеют статистически значимые различия между двумя группами (рис. 1), что подтверждает различие активации желудочков при стандартной стимуляции и при стимуляции проводящей системы сердца. Кроме того, значения ширины натив-

ных и стимулированных комплексов QRS и QRSp ($p = 0,011$), LVAT и LVATp ($p < 0,01$), RVAT и RVATp ($p < 0,038$) статистически значимо отличаются во второй группе, в то время, как в группе стимуляции ПСС аналогичные параметры не имеют статистически значимых отличий ($p > 0,05$) от исходных.

По данным послеоперационной КТ в группе №1 у всех пациентов электрод в септальной позиции в проекции ПСС. У 7 (70%) пациентов группы №2 электрод в септальной позиции, у 2 (20%) - в области верхушки ПЖ, у 1 (10%) - в области передней стенки ПЖ. У 30% группы №1 и у всех пациентов группы №2 зафиксирована на предоперационном этапе блокада ЛНПГ, либо ее ветвей (табл. 1).

Таким образом, при стимуляции ПСС, удалось достичь паттерн активации, при котором значения QRSp, LVATp, RVATp не имели статистически значимых отличий в сравнении с аналогичными параметрами исходно, при собственном синусовом ритме. Однако при миокардиальной стимуляции значения QRSp, LVATp, RVATp статистически значимо отличались от таковых при синусовом ритме.

ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

В 2023 году опубликован мета-анализ M.V.Mariani et al [14]. Общее количество пациентов, включенных в анализ составило 4386, (1324 - стандартная правожелудочковая стимуляция; 1032 - бивентрикулярная стимуляция; 2037 - стимуляция ПСС (1069 - стимуляция ПГ, 968 - ЛНПГ)). Ширина стимулированного комплекса при стимуляции ПГ и ЛНПГ была значительно меньше, чем при стандартной правожелудочковой и при бивентрикулярной стимуляции ($p < 0,05$). Стимуляция ПГ была ассоциирована со значительным повышением порога стимуляции в отдаленном периоде в сравнении со стимуляцией ЛНПГ ($p < 0,05$). Осложнения связанные с электродом возникали чаще в группах бивентри-

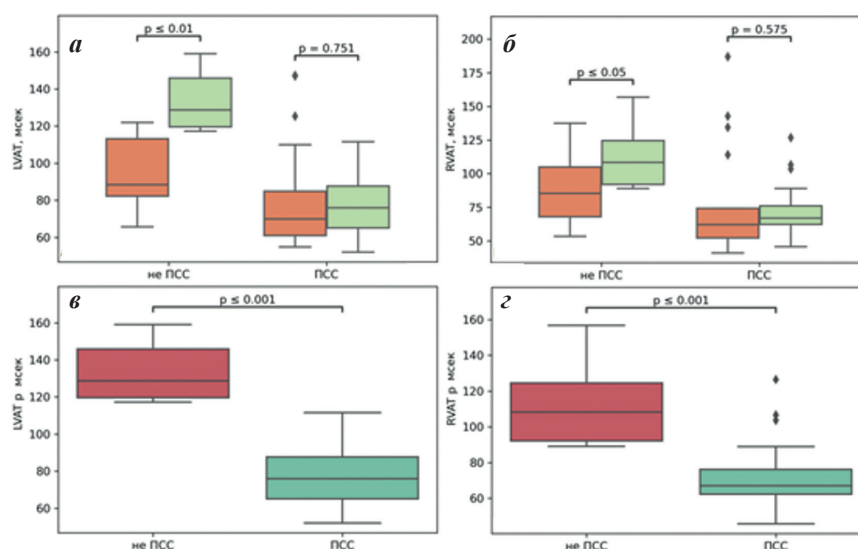


Рис. 1. Параметры активации желудочков: время активации левого (LVAT - а) и правого (RVAT - б) желудочка исходно (оранжевый) и на фоне стимуляции (салатный); время активации левого (LVATp - в) и правого (RVATp - г) желудочка на фоне стимуляции миокарда (не ПСС - красный) и проводящей системы сердца (ПСС - зеленый).

кулярной стимуляции и стимуляции ПГ ($p < 0,05$), в группе пациентов со стимуляцией ЛНПГ, результаты были противоположны ($p = 0,4$). Таким образом, наиболее перспективным методом электрокардиостимуляции как с точки зрения физиологичности активации миокарда, так и отдаленных результатов, является стимуляция ЛНПГ [14].

Оценка собственного опыта имплантации электрода в область ЛНПГ, подтверждает, что данный вид кардиостимуляции является более физиологичным методом, в сравнении со стимуляцией из области межжелудочковой перегородки, либо верхушки ПЖ. Это подтверждается отсутствием статистически значимых отличий ширины комплекса QRS, времени активации левого и правого желудочков как исходных (собственный ритм), так и на фоне электрокардиостимуляции. При стандартной стимуляции без захвата ПСС выявлены статистически значимые отличия собственных комплексов от стимулированных как по ширине комплекса QRS, так и по времени активации левого и правого желудочков (рис. 1). Кроме того, трехмерная модель активации левого желудочка на собственном ритме практи-

чески не отличается от таковой как при селективной, так и при неселективной стимуляции ПСС (Рис. 2).

Необходимо отметить, что в группе с отсутствием захвата ПСС при стимуляции у 100% пациентов исходно существовала полная блокада ЛНПГ, либо блокада ее ветвей. По данным литературы, отсутствие захвата ПСС, при ее патологии, может быть обусловлено как патологией ЛНПГ (дистальная блокада), так и сложностью картирования при БЛНПГ [8]. Кроме того, многие авторы сходятся во мнении, что успех имплантации электрода в ПСС зависит от опыта хирурга, что особенно важно при патологии ПСС (блокада ЛНПГ и ее ветвей). Так называемое «время обучения» при имплантации электрода в ПСС составляет по данным разных авторов от 40 до 100 операций [8, 10].

Бесспорно, методика стимуляции ПСС имеет определенные особенности:

- сложность выполнения имплантации с достаточно длительным периодом обучения;
- необходимость использования системы доставки;
- большая, в сравнении со стандартной стимуляцией, продолжительность операции и лучевая нагрузка;

- возможность осложнений, таких как перфорация межжелудочковой перегородки, перфорация стенки ПЖ;
- увеличение порогов стимуляции в отдаленном периоде (ПГ);
- отсутствие адаптированной системы интраоперационной визуализации;
- возможность повреждения ПСС [8-10].

Однако, несмотря на техническую сложность, данный метод стимуляции позволяет получить активацию миокарда желудочков близкую к активации при собственном синусовом ритме.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, при использовании метода неинвазивного активационного картирования с реконструкцией желудочков сердца возможно произвести расчет RVAT, LVAT желудочков и выполнить анализ электрофизиологических особенностей активации желудочков сердца при имплантации электродов в ПСС. Стимуляция ПСС перспективный метод, позволяющий добиться активации миокарда левого и правого желудочков, которая существенно не отличается от таковой при собственном ритме с нормальной шириной QRS. Требуется дальнейшее клиническое изучение метода прямой стимуляции ПСС для его широкого внедрения в рутинную практику.

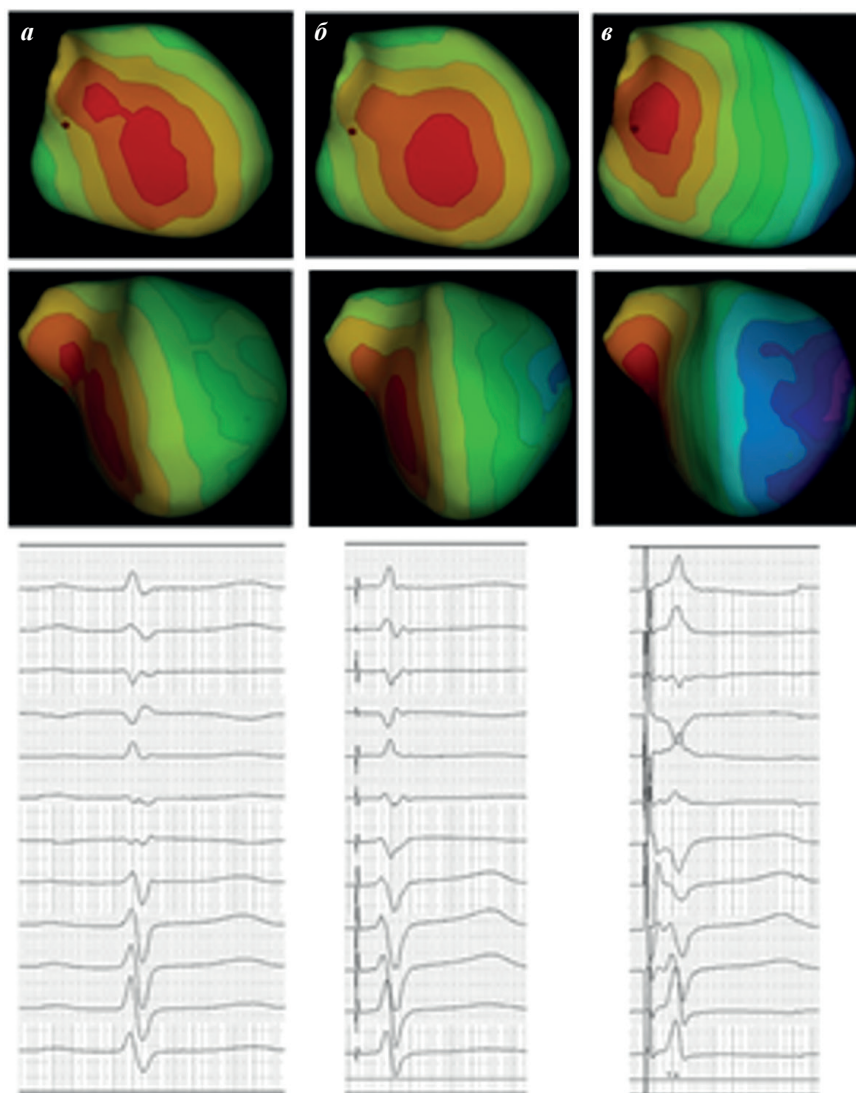


Рис. 2. Трехмерные модели активации левого желудочка и ЭКГ при исходном синусовом ритме (а); при селективной стимуляции проводящей системы сердца (б); при неселективной стимуляции проводящей системы сердца (в).

ЛИТЕРАТУРА

1. Furman S, Schwedel JB. An Intracardiac Pacemaker for Stokes-Adams Seizures. *New England Journal of Medicine*. 1959;261(19): 943-948. <https://doi.org/10.1056/NEJM195911052611904>.
2. Sutton R. Ventricular pacing: what does it do? *Eur J CPE*. 1993; 3: 194-196.
3. Deshmukh P, Casavant DA, Romanyszyn M, et al. Permanent, direct His-bundle pacing: a novel approach to cardiac pacing in patients with normal His-Purkinje activation. *Circulation*. 2000;101(8): 869-877. <https://doi.org/10.1161/01.cir.101.8.869>.
4. Cai B, Huang X, Li L, et al. Evaluation of cardiac synchrony in left bundle branch pacing: Insights from echocardiographic research. *Journal of Cardiovascular Electrophysiology*. 2020;31(2): 560-569. <https://doi.org/10.1111/jce.14342>.
5. Chen K, Li Y, Dai Y, et al. Comparison of electrocardiogram characteristics and pacing parameters between left bundle branch pacing and right ventricular pacing in patients receiving pacemaker therapy. *Europace*. 2019;21(4): 673-680. <https://doi.org/10.1093/europace/euy252>.
6. Hou X, Qian Z, Wang Y, et al. Feasibility and cardiac synchrony of permanent left bundle branch pacing through the interventricular septum. *Europace*. 2019;21(11): 1694-1702. <https://doi.org/10.1093/europace/euz188>.
7. Ponnusamy SS, Arora V, Namboodiri N, et al. Left bundle branch pacing: A comprehensive review. *Journal of Cardiovascular Electrophysiology*. 2020;31(9): 2462-2473. <https://doi.org/10.1111/jce.14681>.
8. Huang W, Chen X, Su L, et al. A beginner's guide to permanent left bundle branch pacing. *Heart Rhythm*. 2019;16(12): 1791-1796. <https://doi.org/10.1016/j.hrthm.2019.06.016>.
9. Keene D, Arnold AD, Jastrzębski M, et al. His bundle pacing, learning curve, procedure characteristics, safety, and feasibility: Insights from a large international observational study. *Journal of Cardiovascular Electrophysiology*. 2019;30(10): 1984-1993. <https://doi.org/10.1111/jce.14064>.
10. Zhuo W, Zhong X, Liu H, et al. Pacing Characteristics of His Bundle Pacing vs. Left Bundle Branch Pacing: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Frontiers in Cardiovascular Medicine*. 2022;9: 849143. <https://doi.org/10.3389/fcvm.2022.849143>.
11. Jia P, Ramanathan C, Ghanem RN, et al. Electrocardiographic imaging of cardiac resynchronization therapy in heart failure: Observation of variable electrophysiologic responses. *Heart rhythm*. 2006;3(3): 296-310. <https://doi.org/10.1016/j.hrthm.2005.11.025>.
12. Duchateau J, Sacher F, Pambrun T, et al. Performance and limitations of noninvasive cardiac activation mapping. *Heart Rhythm*. 2019;16(3): 435-442. <https://doi.org/10.1016/j.hrthm.2018.10.010>.
13. Зубарев СВ, Чмелевский МП, Буданова МА, и др. Неинвазивное электрофизиологическое картирование и эффект от кардиоресинхронизирующей терапии: роль позиции левожелудочкового электрода. *Трансляционная медицина*. 2016;3(3): 7-16. [Zubarev SV, Chmelevsky MP, Budanova MA, et al. Non-invasive electrophysiological mapping of the patients undergoing cardiac resynchronization therapy: the role of left ventricular lead position. *Translational Medicine*. 2016;3(3): 7-16. (In Russ.)]
14. Mariani MV, Piro A, Forleo GB, et al. Clinical, procedural and lead outcomes associated with different pacing techniques: a network meta-analysis. *International Journal of Cardiology*. 2023;377: 52-59. <https://doi.org/10.1016/j.ijcard.2023.01.081>.
15. De Pooter J, Wauters A, Van Heuverswyn F, et al. A Guide to Left Bundle Branch Area Pacing Using Stylet-Driven Pacing Leads. *Frontiers in Cardiovascular Medicine*. 2022;9: 844152. <https://doi.org/10.3389/fcvm.2022.844152>.
16. Wu S, Chen X, Wang S, et al. Evaluation of the Criteria to Distinguish Left Bundle Branch Pacing From Left Ventricular Septal Pacing. *JACC. Clinical electrophysiology*. 2021;7(9): 1166-1177. <https://doi.org/10.1016/j.jacep.2021.02.018>.
17. Jastrzębski M, Kiełbasa G, Curila K, et al. Physiology-based electrocardiographic criteria for left bundle branch capture. *Heart Rhythm*. 2021;18(6): 935-943. <https://doi.org/10.1016/j.hrthm.2021.02.021>.