



<https://doi.org/10.29001/2073-8552-2021-36-4-67-76>
УДК 616.124.2-005.8-06-007.64-089.844-035-073.86

Результаты планирования пластики постинфарктных аневризм левого желудочка на основе магнитно-резонансной томографии и трехмерного моделирования

С.В. Кушнарев¹, И.С. Железняк¹, В.Н. Кравчук^{1,2}, С.Д. Рудь¹, А.В. Ширшин^{1,3},
И.А. Меньков¹

¹ Военно-медицинская академия имени С.М. Кирова Министерства обороны Российской Федерации, 194044, Российская Федерация, Санкт-Петербург, ул. Академика Лебедева, 6

² Северо-Западный государственный медицинский университет имени И.И. Мечникова Министерства здравоохранения Российской Федерации, 191015, Российская Федерация, Санкт-Петербург, ул. Кирочная, 41

³ Национальный исследовательский университет ИТМО, 197101, Российская Федерация, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49

Аннотация

Цель: оценить результаты планирования оперативных вмешательств с использованием трехмерных моделей, изготовленных на основе магнитно-резонансной томографии (МРТ), у пациентов с постинфарктными аневризмами левого желудочка (ПАЛЖ).

Материал и методы. В исследовании участвовали две группы пациентов с ПАЛЖ общей численностью 41 человек. В 1-ю (экспериментальную) группу были включены 17 пациентов, у которых ПАЛЖ была диагностирована по результатам МРТ, планирование оперативного вмешательства выполнялось по изготовленной 3D-модели сердца. Вторая (контрольная) группа была представлена 24 пациентами, у которых ПАЛЖ были диагностированы по данным эхокардиографии (ЭхоКГ) или вентрикулографии, а планирование оперативного вмешательства выполнялось по традиционным двухмерным срезам на экране монитора.

Результаты. Сравнение времени полного искусственного кровообращения (ИК) между группами показало наличие статистически значимых различий: в 1-й группе этот параметр составил 60 [56; 68] мин, в то время как во 2-й группе – 71 [61; 84] мин ($p = 0,043$). При сравнении времени общей продолжительности операции (1-я группа – 280 [265; 320], 2-я группа – 263 [248; 283], $p = 0,055$), общего времени ИК (1-я группа – 93 [86; 109], 2-я группа – 104 [83; 109], $p = 0,653$) и времени параллельного ИК (1-я группа – 31 [26; 39], 2-я группа – 27 [21; 32], $p = 0,127$) статистически значимые различия отсутствовали.

Заключение. Применение 3D-моделей для подготовки хирургов к пластике ПАЛЖ позволяет определить тип реконструктивной операции, отработать основные этапы предстоящего вмешательства, а также уменьшить время полного ИК при его проведении.

Ключевые слова:	магнитно-резонансная томография, 3D-печать, 3D-модель сердца, предоперационное планирование, постинфарктная аневризма левого желудочка.
Конфликт интересов:	авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
Прозрачность финансовой деятельности:	никто из авторов не имеет финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.
Соответствие принципам этики:	информированное согласие получено от каждого пациента. Исследование одобрено этическим комитетом при Военно-медицинской академии имени С.М. Кирова Министерства обороны Российской Федерации (протокол № 199 от 19.12.2017 г.).
Для цитирования:	Кушнарев С.В., Железняк И.С., Кравчук В.Н., Рудь С.Д., Ширшин А.В., Меньков И.А. Результаты планирования пластики постинфарктных аневризм левого желудочка на основе магнитно-резонансной томографии и трехмерного моделирования. <i>Сибирский журнал клинической и экспериментальной медицины</i> . 2022;37(1):67–76. https://doi.org/10.29001/2073-8552-2022-37-1-67-76 .

✉ Кушнарев Сергей Владимирович, e-mail: s.v.kushnarev@yandex.ru.

Results of post-infarction left ventricular aneurysms surgical planning using magnetic resonance imaging and three-dimensional modeling

Sergey V. Kushnarev¹, Igor S. Zheleznyak¹, Vyacheslav N. Kravchuk^{1, 2},
Sergey D. Rud¹, Alexander V. Shirshin^{1, 3}, Igor A. Menkov¹

¹Military Medical Academy named after C.M. Kirov,
194044, Russian Federation, St. Petersburg, Acad. Lebedeva str., 6

²North-Western State Medical University named after I.I. Mechnikov,
191015, Russian Federation, St. Petersburg, Kirochnaya str., 41

³ITMO University,
197101, Russian Federation, St. Petersburg, Kronverksky pr., 49

Abstract

Aim. To evaluate the results of surgical intervention planning using three-dimensional models based on magnetic resonance imaging in patients with postinfarction left ventricular aneurysms.

Material and Methods. Two groups of patients with postinfarction left ventricular aneurysm (PLVA) were included in the study, totaling 41 patients. The first (experimental) group included 17 patients diagnosed with PLVA by magnetic resonance imaging (MRI), and surgical intervention planning was performed using a 3D model of the heart. The control group comprised 24 patients in whom PLVA was diagnosed by echocardiography (TTE) or ventriculography, and surgical intervention planning was performed using traditional two-dimensional slice images.

Results. Comparison of full perfusion under cardiopulmonary bypass (CPB) showed statistically significant differences between the groups: this parameter was 60 [56; 68] min in group 1 vs. 71 [61; 84] min in group 2, which was significantly higher ($p = 0.043$). There were no significant differences in total operation time (280 [265; 320] min in group 1 vs. 263 [248; 283] min in group 2, $p = 0.055$), overall CPB time (93 [86; 109] min in group 1 vs. 104 [83; 109] min in group 2, $p = 0.653$), and partial CPB time (31 [26; 39] min in group 1 vs. 27 [21; 32] min in group 2, $p = 0.127$).

Conclusion. The use of 3D models to support surgeons for PLVA correction makes it possible to determine the type of reconstructive surgery, practice the main stages of the upcoming intervention, and reduce the time of full perfusion under CPB during its implementation.

Keywords:	magnetic resonance imaging, 3D printing, heart 3D model, preoperative planning, postinfarction left ventricular aneurysm.
Conflict of interest:	the authors have no conflicts of interest to declare.
Financial disclosure:	no author has a financial or property interest in any material or method mentioned.
Adherence to ethical standards:	informed consent was obtained from all patients. The study was approved by the Ethics Committee of Military Medical Academy named after C.M. Kirov (protocol No. 199 from 19.12.2017).
For citation:	Kushnarev S.V., Zheleznyak I.S., Kravchuk V.N., Rud S.D., Shirshin A.V., Menkov I.A. Results of post-infarction left ventricular aneurysms surgical planning using magnetic resonance imaging and three-dimensional modeling. <i>The Siberian Journal of Clinical and Experimental Medicine</i> . 2022;37(1):67–76. https://doi.org/10.29001/2073-8552-2022-37-1-67-76 .

Введение

По данным Всемирной организации здравоохранения, в 2019 г. 16% всех летальных исходов в мире пришлось на ишемическую болезнь сердца (ИБС) [1]. Ростовый тренд сердечно-сосудистых заболеваний сохраняется с начала 2000 г., и прогноз неутешительный – к 2030 г. смертность возрастет на 50% [2].

С внедрением эндоваскулярных методов лечения, а также благодаря своевременному применению тромболитических препаратов снизилось количество леталь-

ных исходов среди пациентов, перенесших обширный трансмуральный инфаркт миокарда (ИМ) [3]. В среднем у 20% таких пациентов возникает такое осложнение, как постинфарктная аневризма левого желудочка (ПАЛЖ) [4]. Количество пациентов с терминальной стадией хронической сердечной недостаточности (ХСН) вследствие ИБС ежегодно увеличивается.

Хирургический метод лечения пациентов с терминальной стадией ХСН остается одним из эффективных [5]. Оперативное лечение таких пациентов имеет высокий риск развития осложнений [6]. Существуют различные

виды реконструктивных операций на левом желудочке (ЛЖ), однако окончательное решение хирурга зависит от множества факторов и принимается непосредственно во время операции. Вид и объем пластики определяются индивидуально для каждого конкретного случая и зависят от общего состояния пациента, формы и размера полости ЛЖ, локализации и глубины фиброзных изменений [7].

В качестве основного метода диагностики ПАЛЖ в настоящее время применяют трансторакальную эхокардиографию (ЭхоКГ). Несмотря на это, визуализация сердечных структур и фиброзных изменений миокарда при ЭхоКГ ограничена [8]. Магнитно-резонансная томография (МРТ) с контрастным усилением позволяет проводить оценку структурных и функциональных изменений миокарда, а также выступает в качестве референсного метода для расчета количественных показателей сердца [9]. Несмотря на высокую тканевую контрастность изображений, получаемых при МРТ, они представляют плоскостную картину, при этом размеры могут быть пропорционально искажены, что может повлечь расхождение в интерпретации одного и того же клинического случая различными специалистами. В результате возможности планирования предстоящего оперативного вмешательства

ограничены [10]. Аддитивные технологии, а именно трехмерная печать (3D-печать), могут решить проблему наглядной демонстрации патологических изменений [11].

Цель исследования: оценка результатов планирования оперативных вмешательств с использованием трехмерных моделей, изготовленных на основе МРТ, у пациентов с ПАЛЖ.

Материал и методы

В период с 2015 по 2020 г. были обследованы и прооперированы 41 пациент с ПАЛЖ, которых разделили на две группы; 1-я группа была сформирована проспективно, 2-я группа – ретроспективно. В 1-ю (экспериментальную) группу были включены 17 пациентов с ПАЛЖ, диагностированной по данным МРТ, планирование операции которым осуществлялось с использованием 3D-модели. Вторая (контрольная) группа состояла из 24 пациентов, у которых ПАЛЖ была диагностирована на основе венстрикулографии и результатов ЭхоКГ, а планирование реконструктивной операции основывалось на анализе двумерных срезов, отображаемых на мониторе. В таблице 1 представлены основные клинические параметры для каждой из групп пациентов.

Таблица 1. Общая клиническая характеристика пациентов по группам
Table 1. General clinical characteristics of patient groups

Параметры Characteristics	1-я группа (оперированные с использованием 3D-модели) Group 1 (with 3D model)	2-я группа (оперированные без использования 3D-модели) Group 2 (without 3D model)
Количество обследуемых, <i>n</i> Number of people examined, <i>n</i>	17	24
Возраст, лет Age, years	62 [57; 66]	59 [55; 66]
Мужчины, <i>n</i> (%) Male, <i>n</i> (%)	16 (94,1)	22 (91,6)
Женщины, <i>n</i> (%) Female, <i>n</i> (%)	1 (5,9)	2 (8,4)
Длительность анамнеза ИБС, лет History of coronary artery disease, years	8 [3; 10]	6 [2,5; 9]
Количество инфарктов в анамнезе, <i>n</i> Number of heart attacks in history, <i>n</i>	1 [1; 2]	1 [1; 2]
Функциональный класс стенокардии напряжения (<i>n</i> , %): Functional class of angina pectoris (<i>n</i> , %):		
I	–	–
II	–	5 (20,8)
III	16 (94,1)	19 (79,2)
IV	1 (5,9)	–
Хроническая сердечная недостаточность (<i>n</i> , %): Chronic heart failure (<i>n</i> , %):		
I	–	–
IIA	5 (29,4)	17 (70,8)
IIB	10 (58,8)	6 (25,0)
III	2 (11,8)	1 (4,2)
Функциональный класс сердечной недостаточности (NYHA) (<i>n</i> , %): Functional class of heart failure (NYHA) (<i>n</i> , %):		
I	–	–
II	2 (11,8)	12 (50,0)
III	14 (82,4)	11 (45,8)
IV	1 (5,9)	1 (4,2)

ЭхоКГ выполняли по стандартной методике на аппарате экспертного класса. Сканирование производили из парастернального и апикального доступов для визуализации сердечных структур по длинным и коротким осям. МРТ сердца выполняли на компьютерном томогра-

фе с индукцией магнитного поля 1,5 Тесла, с получением МР-изображений в стандартных плоскостях сканирования. Для визуализации фиброзных изменений внутривенно вводили парамагнитный контрастный препарат в дозировке 0,15 ммоль/кг, через 10 мин выполняли скани-

рование. МР-изображения получали с помощью двух типов импульсных последовательностей (ИП). Первый тип – стандартная двухмерная ИП «инверсия-восстановление» на основе сверхбыстрого градиентного эха (2D_IR_TFE),

второй тип – усовершенствованная трехмерная ИП «инверсия-восстановление» на основе сверхбыстрого градиентного эха (3D_PSIR_TFE). МР-критерии диагностики ПАЛЖ представлены на рисунке 1.

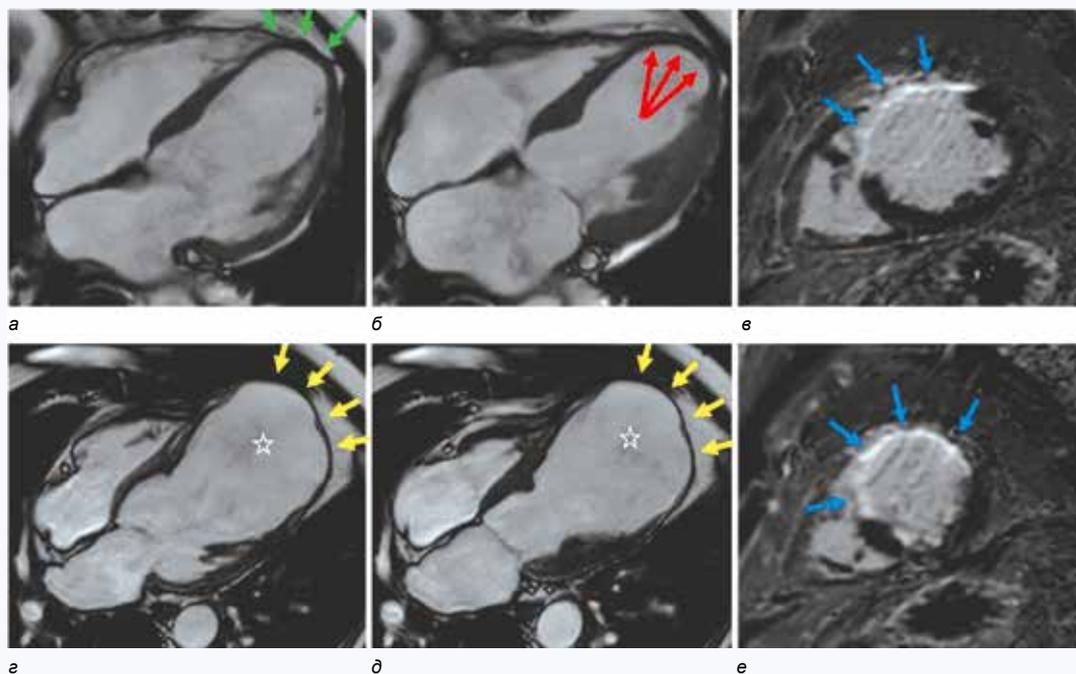


Рис. 1. Критерии постинфарктной аневризмы левого желудочка на МР-изображениях: а, б – киноизображения, 4-камерная ось, парадоксальный ход стенки (дискинезия) во время диастолы (а) и систолы (б). Зелеными стрелками обозначена зона западения стенки, красными – зона выбухания в области верхушки левого желудочка. в, д – киноизображения, 4-камерная ось, акинезия стенки во время диастолы (в) и систолы (д). Желтыми стрелками обозначена зона акинезии в области верхушки левого желудочка с истончением стенки до 3 мм и шарообразной деформацией его полости (звездочка). е, ф – постконтрастные МР-изображения, короткая ось, срединные (в) и апикальные (е) сегменты. Синими стрелками обозначено трансмуральное накопление контрастного вещества стенками левого желудочка

Fig. 1. Criteria of postinfarction left ventricular (LV) aneurysm on MR images: а, б – cine images, 4-chamber axis, paradoxical wall motion (dyskinesia) during diastole (а) and systole (б). Green arrows indicate the zone of wall recession and red arrows indicate the bulging zone in the LV apex. в, д – cine images, 4-chamber axis, wall akinesia during diastole (в) and systole (д). Yellow arrows indicate an area of akinesia in the LV apex with wall thinning up to 3 mm and spherical deformation of its cavity (asterisk). е, ф – post-contrast MR images, short axis, medial (в) and apical (е) segments. Blue arrows indicate transmural accumulation of contrast agent by LV walls.

Цифровую 3D-модель сердца создавали на основе МР-изображений, полученных с помощью ИП 3D_PSIR_TFE. На каждом срезе осуществляли выделение (сегментирование) интактного миокарда и фиброзных изменений. Далее сегментированные зоны интереса суммировались между собой и сохранялись в цифровую 3D-модель, которую изготавливали на 3D-принтере. На финальном этапе напечатанную 3D-модель обрабатывали механическим и термическим способами. Особенностью получаемых 3D-моделей была эластичность и двухцветность. Красным материалом обозначался интактный миокард, белым – фиброзные изменения. При наличии тромба в полости ЛЖ он изготавливался отдельно синим и фиксировался в полости ЛЖ двухцветной модели. Основные этапы изготовления представлены на рисунке 2.

Хирурги использовали изготовленные прототипы для планирования и отработки основных этапов предстоящей операции. На 3D-модели оценивали форму и размеры ЛЖ, общий вид фиброзных изменений. Далее выполняли подробный визуальный анализ фиброзных изменений – определяли точную локализацию, их глубину и распространение на межжелудочковую перегородку (МЖП).

Полученные данные использовали для выбора оптимального типа реконструктивной операции. Также на 3D-модели проектировали линии нанесения разрезов, вероятные объемы иссекаемых тканей, место вшивания дакроновой заплаты и моделировали остаточную полость ЛЖ.

В экспериментальной группе на предоперационном этапе оперативное вмешательство планировалось с использованием плоскостных изображений ЭхоКГ и изготовленной 3D-модели. Окончательное решение о типе пластики ЛЖ принималось во время операции. В зависимости от соответствия результатов планирования различными методами была рассчитана их диагностическая точность.

В качестве критериев эффективности выполненных оперативных вмешательств для обеих групп выступали время операции и время ИК (полное, параллельное и общее).

Для создания базы пациентов и хранения исходных данных использовали редактор «MS Excel 2019» (Microsoft, США). В качестве инструментов статистической обработки применяли программные пакеты «Jamovi 1.2» (www.jamovi.org) и «PSPP» (www.gnu.org/software/pspp).

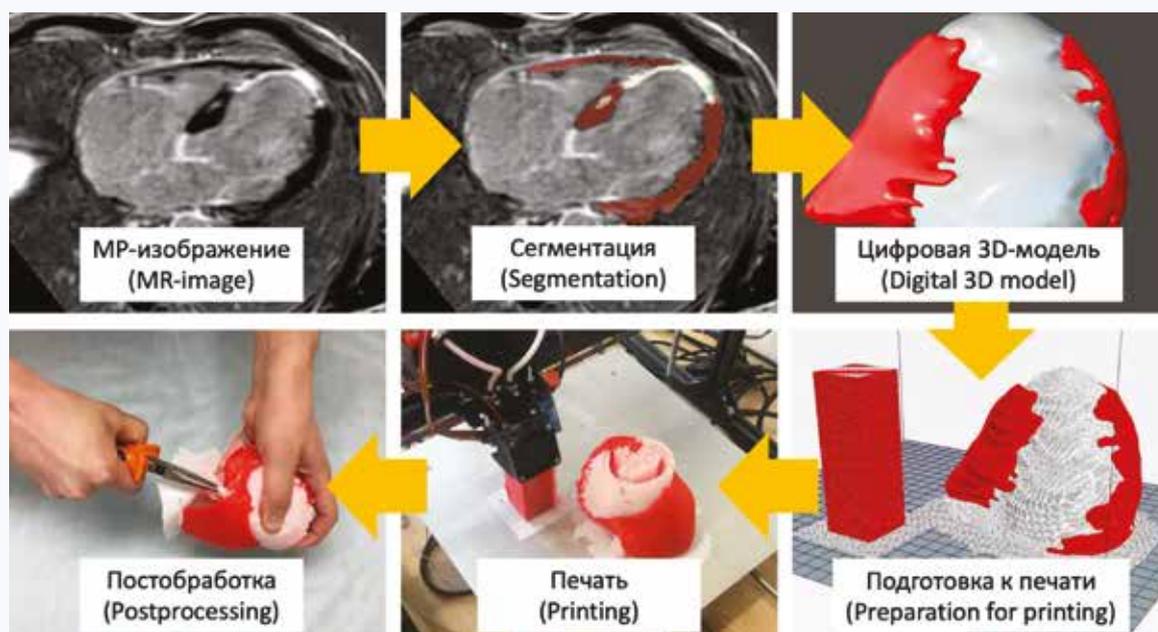


Рис. 2. Алгоритм изготовления 3D-моделей. Последовательность этапов обозначена желтыми стрелками
 Fig. 2. Algorithm of 3D models making. The order of steps is indicated by yellow arrows

Распределение значений исследуемых параметров в результате проверки с использованием критерия Шапиро – Уилка отличалось от нормального. Учитывая малый объем выборок, оценку различий между ними проводили с использованием критерия Уилкоксона – Манна – Уитни, а различия между ранговыми и номинальными переменными оценивали на основе точного теста Фишера. Критерием статистической значимости различий считали значение p , не превышающее 0,05.

Результаты

В 1-й группе на первом этапе предоперационное планирование хирургом осуществлялось по изображениям на экране монитора, полученным при выполнении плановой ЭхоКГ. Далее вторым этапом пациенту выполнялась

МРТ сердца, по изображениям которой изготавливалась 3D-модель, после анализа которой хирург принимал окончательное решение о виде предстоящей пластики ЛЖ. Итоги принятых решений по выполнению оперативных вмешательств в предоперационном периоде в зависимости от метода визуализации и их сравнение с интраоперационным результатом представлены в таблице 2.

По результатам, приведенным в таблице 2, видно, что при планировании оперативных вмешательств с использованием 3D-модели только у одного пациента (5,8% случаев) решение не совпало с интраоперационным, в то время как при планировании оперативных вмешательств с использованием ЭхоКГ у трех пациентов (17,6%) было принято решение, отличающееся от интраоперационного.

Таблица 2. Сравнение результатов количества запланированных и выполненных реконструктивных операций по видам пластики в 1-й группе пациентов

Table 2. Comparison of the results in regard to the number of planned and performed reconstructive surgeries by plastic surgery type in group 1

Вид пластики Type of plastic surgery	Запланированное количество операций Scheduled number of operations		Выполнено Performed surgeries
	2D-изображения ЭхоКГ 2D TTE images	3D-модель на основе МРТ MRI-based 3D model	
Линейная Linear repair	14	10	11
Чувствительность, % Sensitivity, %	100 [71,5; 100]	90,9 [58,7; 99,8]	–
Специфичность, % Specificity, %	50 [11,8; 88,2]	100 [54,1; 100]	–
Расширенная Extended	3	7	6
Чувствительность, % Sensitivity, %	50 [11,8; 88,2]	100 [54,1; 100]	–
Специфичность, % Specificity, %	100 [71,5; 100]	90,9 [58,7; 99,8]	–

Таким образом, точность планирования с использованием плоскостных изображений ЭхоКГ составила 82,4 против 94,1% при использовании 3D-модели.

Пример отработки основных этапов выполнения внутрижелудочковой пластики и соответствующие им интраоперационные фотографии представлены на рисунках 3–4.

Во 2-й группе 17 пациентам (70,8%) была выполнена линейная пластика, 7 – расширенная (29,2%). Решение о необходимости выполнения реконструктивной операции ЛЖ принималось только с учетом данных ЭхоКГ, однако они не позволяли однозначно осуществить выбор пластики, окончательное решение принималось интраоперационно.

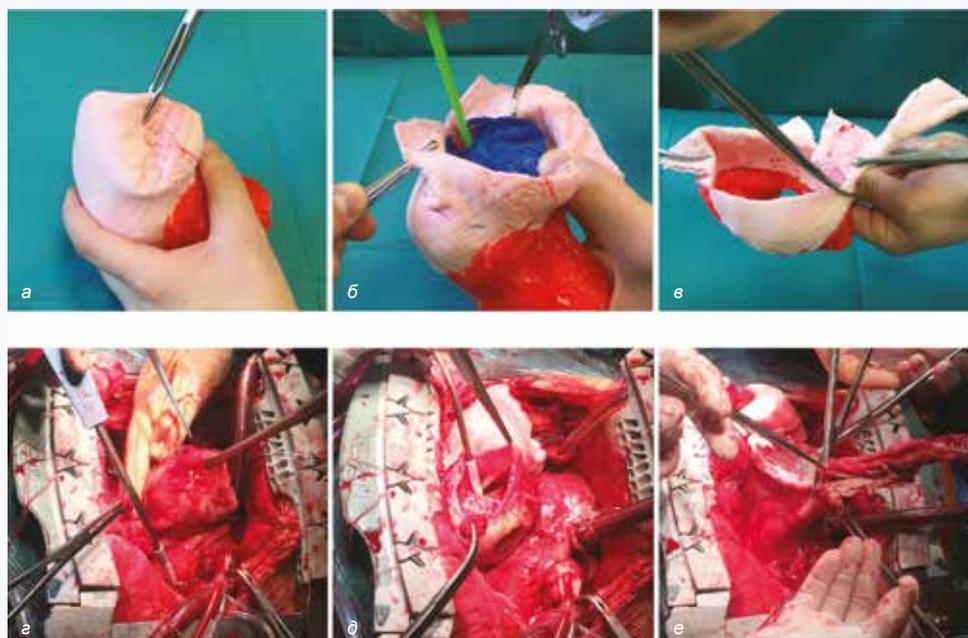


Рис. 3. а, б, в – фотографии планирования оперативного вмешательства на 3D-модели, г, д, е – интраоперационные фотографии, соответствующие этапам планирования. Выделение купола аневризмы (а, г), аневризмотомия и экспирация крови из полости ЛЖ (б, д), иссечение фиброзных тканей (в, е)

Fig. 3. а, б, в – photographs at different stages of surgical planning using 3D model, г, д, е – corresponding intraoperative photographs. Extraction of aneurysm dome (а, г), aneurysmotomy and blood expiration from LV cavity (б, д), and excision of fibrous tissues (в, е)

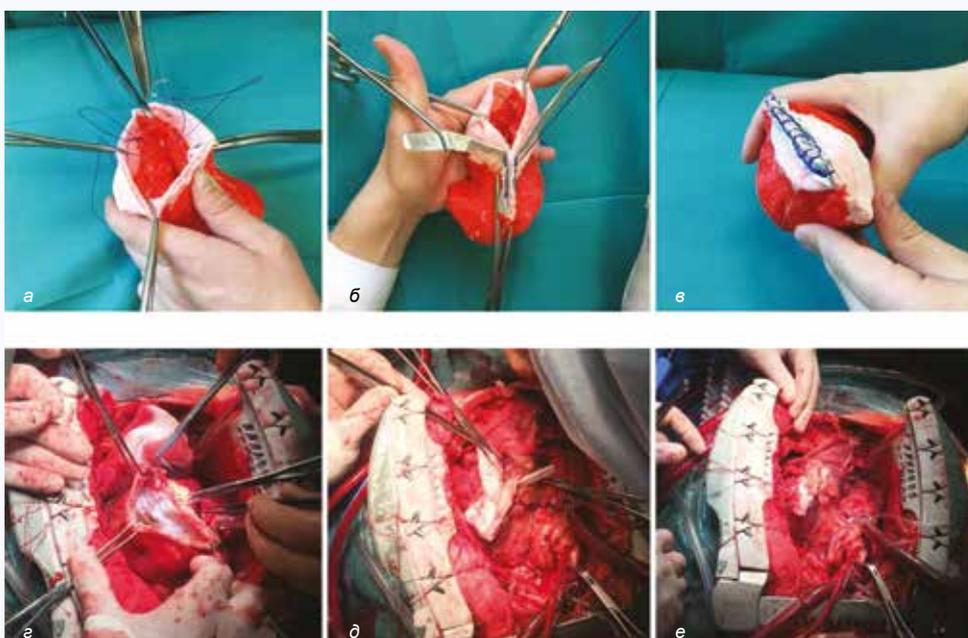


Рис. 4. а, б, в – фотографии планирования оперативного вмешательства на 3D-модели, г, д, е – интраоперационные фотографии, соответствующие этапам планирования. Наложение эндовентрикулярного кисетного шва (а, г), ушивание полости ЛЖ (б, д), наложение циркулярных швов на завершающем этапе (в, е)

Fig. 4. а, б, в – photographs at different stages of surgical planning using 3D model, г, д, е – corresponding intraoperative photos. Endoventricular suturing (а, г), suturing of LV cavity (б, д), and circular suturing at the final stage (в, е)

Показатели сравнения времени, затраченного на всю операцию, и времени ИК (общего, параллельного и полного) представлены в таблице 3.

Таблица 3. Сравнение временных показателей выполненных операций

Table 3. Comparison of surgery time parameters

Показатели Parameters	1-я группа Group 1	2-я группа Group 2	<i>p</i>
Общее время операции, мин Total time of operation, min	280 [265; 320]	263 [248; 283]	0,055
Общее время ИК, мин Total artificial circulation time, min	93 [86; 109]	104 [83; 109]	0,653
Время параллельного ИК, мин Parallel artificial circulation time, min	31 [26; 39]	27 [21; 32]	0,127
Время полного ИК, мин Full artificial circulation time, min	60 [56; 68]	71 [61; 84]	0,043

В 1-й (экспериментальной) группе время полного ИК составило 60 [56; 68] мин, в то время как во 2-й (контрольной) группе этот показатель был выше и составил 71 [61; 84] мин ($p = 0,043$).

Обсуждение

Одним из фундаментальных преимуществ МРТ перед ЭхоКГ является возможность прямой визуализации фиброзных изменений (рис. 5), что было одним из ключевых параметров в изготовлении 3D-моделей.

Двухмерная ИП «инверсия-восстановление» на основе сверхбыстрого градиентного эха (2D_IR_TFE) используется для получения МР-изображений фиброзных изменений миокарда при выполнении стандартного исследования сердца. Она позволяет получить отдельные срезы, чаще всего 3–5, толщиной 8 мм, что достаточно только для посегментной оценки распространения фиброзных изменений. На основе таких изображений невозможно создать качественную 3D-модель, так как для приемлемой детализации структур толщина срезов не должна превышать 2 мм. Также важно, чтобы серия МР-изображений покрывала весь объем сердца без промежутков.

Для решения этих проблем мы использовали трехмерную ИП «инверсия-восстановление» на основе сверхбыстрого градиентного эха (3D_PSIR_TFE).

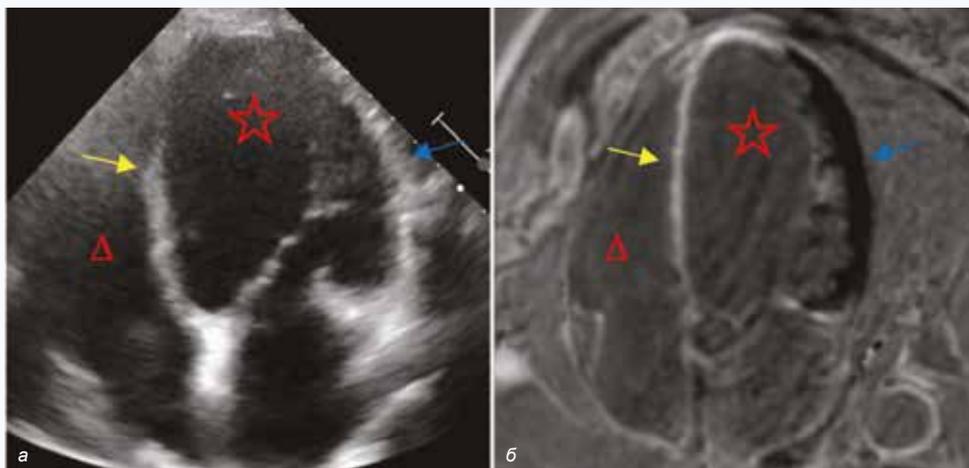


Рис. 5. Постинфарктные аневризмы левого желудочка, переднеперегородочно-верхушечная локализации: а – сонограмма (ЭхоКГ), б – мультипланарная реконструкция постконтрастной серии МР-изображений, 4-камерные плоскости. Звездочка – полость левого желудочка. Треугольник – полость правого желудочка. Желтая стрелка – трансмуральные фиброзные изменения. Синяя стрелка – интактный миокард (синяя стрелка)
Fig. 5. Postinfarction left ventricular aneurysms, anteroparietal-apical localization: а – sonogram (TTE), б – multiplanar reconstruction of the post-contrast series of MR images, 4-chamber planes. The asterisk is the left ventricular cavity. Triangle – right ventricular cavity. Yellow arrow – transmural fibrous changes. Blue arrow – intact myocardium

Трехмерный тип ИП последовательностей позволяет выполнить сбор данных со всей области сканирования (без промежутков между ними) с различной толщиной среза. При подборе минимальной толщины среза эмпирическим путем, при условии сохранения высокого соотношения «сигнал – шум», таковой являлась толщина среза 3 мм в получаемой серии МР-изображений. Дальнейшее снижение толщины среза достигалось за счет использования 50% интерполяции между срезами, что позволило снизить толщину среза до 1,5 мм с сохранением соотношения «сигнал – шум». Снижение времени сканирования достигалось изменением направления сбора данных с короткой оси сердца на длинную. Проблема поддержания тканевой контрастности получаемых МР-изображений, возникающая при постоянном сдвиге «времени инверсии», была решена применением ИП «инверсия-восста-

новление» с фазовой чувствительностью. В результате технических решений, с помощью усовершенствованной трехмерной ИП «инверсия-восстановление» на основе сверхбыстрого градиентного эха (3D_PSIR_TFE), стало возможным получение качественной высокоинформативной серии МР-изображений, на основе которых возможно создание 3D-модели у пациентов с ПАЛЖ.

Одним из важных условий при выборе типа пластики ЛЖ являются предоперационная оценка состояния миокарда левого желудочка [12] и точное определение границы между миокардом и фиброзными изменениями [13], что не всегда возможно [7]. Проблема выбора типа пластики при ПАЛЖ ставит перед специалистами задачу поиска новых способов лечения и усовершенствования уже имеющихся.

Результатом внедрения 3D-технологий стала возможность комплексной визуализации патологических изме-

нений, планирования и отработки этапов операции. На сегодняшний день речь идет о передаче реальных пространственных соотношений между нормальными анатомическими структурами и детальной демонстрации распространности патологических изменений. Создание 3D-модели на этапе планирования операции позволит расширить ограничения метода ЭхоКГ, используемого в настоящее время для этих целей.

Несмотря на многочисленные обзоры литературы о применении 3D-моделей в кардиохирургии, роль их остается неопределенной. Большинство работ посвящено отдельным клиническим случаям. Положительная тенденция сохраняется только в направлении врожденных пороков сердца и подборе окклюдеров ушка левого предсердия. Как следствие, кардиохирургия нуждается в «больших исследованиях» касательно применения 3D-моделей. На современном этапе происходит определение именно целесообразности применения 3D-печати при определенной патологии, что может быть доказано или опровергнуто мультицентровыми исследованиями.

Единственная публикация, посвященная применению 3D-модели у пациентов с ПАЛЖ, была опубликована S. Jacobs и соавт. в 2008 г. [14]. В статье описывается два клинических случая. По итогам работы авторы резюмируют, что применение 3D-моделей на подготовительном этапе может улучшить результаты предстоящей операции. Подробный процесс создания 3D-модели не описан, однако авторы упоминают, что для ее создания использовали изображения компьютерной томографии. МРТ пациентам также выполнялась, но только для определения участков дис- и акинезии ЛЖ. Стоит отметить, что модели, представленные на рисунках, были двухцветными, однако по какому принципу сегментировались фиброзные изменения и здоровый миокарда, а также определялась граница между ними, в работе не описывается.

Результаты нашего исследования показывают, что использование 3D-моделей в клинической практике позволяет повысить точность выбора типа реконструкции и отработать ее основные этапы на индивидуализированном макете, отражающем анатомические соотношения и распространенность патологических изменений.

Преимущества 3D-моделей в качестве инструмента планирования оперативного вмешательства заключаются в наглядном отображении границ интактных и патологически измененных участков миокарда, в том числе глубины распространения фиброза. Помимо этого, возможна визуализация внутренних структур сердца (рас-

пространение фиброза на папиллярные мышцы и МЖП, наличие тромботических масс в полостях), оценка которых возможна только после вскрытия полости ЛЖ.

В нашем исследовании было выявлено статистически значимое снижение времени полного ИК в 1-й (экспериментальной) группе. Несмотря на постоянное усовершенствование аппаратов для проведения ИК, многие параметры этой процедуры все равно достаточно сильно отличаются от физиологических, что приводит к нарушениям гомеостаза [15]. Осложнения, возникшие после выполнения процедуры ИК, могут свести к минимуму все результаты, достигнутые во время сложных оперативных вмешательств [16]. Возникающая при ИК ишемия оказывает нефротоксическое действие отдельными лекарственными препаратами и компонентами переливаемой крови, что может привести к повреждению почечного эпителия и развитию острой почечной недостаточности [17]. Использование ИК часто вызывает неврологические осложнения [18], 3–6% которых приводят к возникновению очаговой неврологической симптоматики в виде транзиторной ишемической атаки, инсульта или комы [19, 20].

Справедливо отметить, что ограничением выполненной нами работы является небольшой объем выборки пациентов в 1-й (экспериментальной) группе, поэтому выполнение исследования с большим объемом выборки пациентов ($n > 35$) будет являться направлением развития в долгосрочной перспективе.

Выводы

МРТ является высокоинформативным методом в визуализации фиброзных изменений миокарда. Данных о распространенности патологических изменений миокарда, получаемых по усовершенствованной методике МР-сканирования, достаточно для создания двухцветных эластичных 3D-моделей сердца.

Использование 3D-моделей для планирования реконструктивных операций у пациентов с ПАЛЖ позволяет спланировать и отработать основные этапы предстоящей операции. Точность выбора способа пластики с применением 3D-модели выше, чем при традиционном планировании, которое планируется на плоскостных изображениях ЭхоКГ, отображаемых на мониторе.

Предоперационное планирование этапов реконструктивной операции на ЛЖ с использованием 3D-модели ведет к снижению времени полного ИК, что, в свою очередь, способно положительно сказаться на эффективности оперативного вмешательства.

Литература

1. Всемирная организация здравоохранения. 10 ведущих причин смерти в мире. URL: <https://www.who.int/ru/news-room/fact-sheets/detail/the-top-10-causes-of-death>
2. Starodubov V.I., Marczak L.B., Varavikova E., Bikbov B., Ermakov S.P., Gall J. et al. The burden of disease in Russia from 1980 to 2016: A systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2016. *Lancet*. 2018;392(10153):1138–1146. DOI: 10.1016/S0140-6736(18)31485-5.
3. Коков А.Н., Масенко В.Л., Семенов С.Е., Барбараш О.Л. МРТ сердца в оценке постинфарктных изменений и ее роль в определении тактики ревазуляризации миокарда. *Комплексные проблемы сердечно-сосудистых заболеваний*. 2014;(3):97–102. DOI: 10.17802/2306-1278-2014-3-97-102.
4. Сигаев И.Ю., Алшибая М.М., Бокерия О.Л., Бузиашвили Ю.И., Голухова Е.З., Мерзляков В.Ю. и др. Современные тенденции развития коронарной хирургии в НЦССХ им. А.Н. Бакулева. *Бюллетень НЦССХ им А.Н. Бакулева РАМН*. 2016;17(3):66–76.
5. Contreras C.A.M., Orellana P.X., de Almeida A.F.S., Finger M.A., Rossi Neto J.M., Chacur P. Left ventricular reconstruction surgery in candidates for heart transplantation. *Braz. J. Cardiovasc. Surg.* 2019;34(3):265–270. DOI: 10.21470/1678-9741-2018-0087.
6. Hartyánszky I., Tóth A., Berta B., Pólos M., Veres G., Merkely B. et al. Personalized surgical repair of left ventricular aneurysm with computer-assisted ventricular engineering. *Interact. Cardiovasc. Thorac. Surg.* 2014;19(5):801–806. DOI: 10.1093/icvts/ivu219.
7. Yan J., Jiang S.-L. Impact of surgical ventricular restoration on early and long-term outcomes of patients with left ventricular aneurysm. *Medicine (Baltimore)*. 2020;97(41):e12773. DOI: 10.1097/MD.0000000000012773.
8. Siddiqui I., Nguyen T., Movahed A., Kabirdas D. Elusive left ventricular thrombus: Diagnostic role of cardiac magnetic resonance imaging-A case report and review of the literature. *World J. Clin. Cases*. 2018;6(6):127–131. DOI: 10.12998/wjcc.v6.i6.127.

9. Paul M., Schäfers M., Grude M., Reinke F., Juergens K.U., Fischbach R. et al. Idiopathic left ventricular aneurysm and sudden cardiac death in young adults. *Europace*. 2006;8(8):607–612. DOI: 10.1093/eurpace/eul074.
10. Levin D., Mackensen G.B., Reisman M., McCabe J.M., Dvir D., Ripley B. 3D printing applications for transcatheter aortic valve replacement. *Curr. Card. Rep.* 2020;22(4):23. DOI: 10.1007/s11886-020-1276-8.
11. Vukicevic M., Puperi D.S., Jane Grande-Allen K., Little S.H. 3D printed modeling of the mitral valve for catheter-based structural interventions. *Ann. Biomed. Eng.* 2017;45(2):508–519. DOI: 10.1007/s10439-016-1676-5.
12. Чернявский А.М., Карева Ю.Е., Денисова М.А., Эфендиев В.У. Проблема предоперационного моделирования левого желудочка. *Кардиология и сердечно-сосудистая хирургия*. 2015;8(2):4–7. DOI: 10.17116/kardio2015824-7.
13. Cox J.L. Surgical management of left ventricular aneurysms: a clarification of the similarities and differences between the Jatene and Dor techniques. *Semin. Thorac. Cardiovasc. Surg.* 1997;9(2):131–138.
14. Jacobs S., Grunert R., Mohr F.W., Falk V. 3D-Imaging of cardiac structures using 3D heart models for planning in heart surgery: a preliminary study. *Interact. Cardiovasc. Thorac. Surg.* 2008;7(1):6–9. DOI: 10.1510/icvts.2007.156588.
15. Радивилко А.С. Профилактика осложнений после операций с искусственным кровообращением (дайджест публикаций). *Комплексные проблемы сердечно-сосудистых заболеваний*. 2016;(3):117–123. DOI: 10.17802/2306-1278-2016-3-117-123.
16. Чергина Л.В., Рыбка М.М. Взаимосвязь повышения послеоперационного уровня тропонина Т и лактата с развитием осложнений у больных, оперированных с применением искусственного кровообращения. *Клиническая физиология кровообращения*. 2015;(1):42–48.
17. Белов Ю.В., Литвицкий П.Ф., Винокуров И.А. Острая почечная недостаточность в кардиохирургической практике: предикторы, механизмы развития и критерии диагноза. *Сеченовский вестник*. 2015;22(4):4–11.
18. Farhoudi M., Mehrvar K., Afrasiabi A., Parvizi R., Khalili A.A., Nasiri B. et al. Neurocognitive impairment after off-pump and on-pump coronary artery bypass graft surgery – an Iranian experience. *Neuropsychiatr. Dis. Treat.* 2010;6:775–778. DOI: 10.2147/NDT.S14348.
19. Motalebzadeh R., Bland J.M., Markus H.S., Kaski J.C., Jahangiri M. Neurocognitive function and cerebral emboli: randomized study of on-pump versus off-pump coronary artery bypass surgery. *Ann. Thorac. Surg.* 2007;83(2):475–482. DOI: 10.1016/j.athoracsur.2006.09.024.
20. Lombard F.W., Mathew J.P. Neurocognitive dysfunction following cardiac surgery. *Semin. Cardiothorac. Vasc. Anesth.* 2010;14(2):102–110. DOI: 10.1177/1089253210371519.

References

1. World Health Organization. The top 10 causes of death. (In Russ.). URL: <https://www.who.int/ru/news-room/fact-sheets/detail/the-top-10-causes-of-death>
2. Starodubov V.I., Marczak L.B., Varavikova E., Bikbov B., Ermakov S.P., Gall J. et al. The burden of disease in Russia from 1980 to 2016: A systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2016. *Lancet*. 2018;392(10153):1138–1146. DOI: 10.1016/S0140-6736(18)31485-5.
3. Kokov A.N., Masenko V.L., Semenov S.E., Barbarash O.L. Cardiac MRI in evaluation postinfarction changes and its role in determining the revascularization tactics. *Complex Issues of Cardiovascular Diseases*. 2014;(3):97–102. (In Russ.). DOI: 10.17802/2306-1278-2014-3-97-102.
4. Sigaev I.Yu., Alshibaya M.M., Bockeria O.L., Buziashvili Yu.I., Golukhova E.Z., Merzlyakov V.Yu. et al. Current trends in the development of coronary surgery in A.N. Bakoulev Scientific Center for Cardiovascular Surgery. *Bull. of BCCVS for Cardiovascular Surgery "Cardiovascular diseases"*. 2016;17(3):66–76. (In Russ.).
5. Contreras C.A.M., Orellana P.X., de Almeida A.F.S., Finger M.A., Rossi Neto J.M., Chacur P. Left ventricular reconstruction surgery in candidates for heart transplantation. *Braz. J. Cardiovasc. Surg.* 2019;34(3):265–270. DOI: 10.21470/1678-9741-2018-0087.
6. Hartyánszky I., Tóth A., Berta B., Pólos M., Veres G., Merkely B. et al. Personalized surgical repair of left ventricular aneurysm with computer-assisted ventricular engineering. *Interact. Cardiovasc. Thorac. Surg.* 2014;19(5):801–806. DOI: 10.1093/icvts/ivv219.
7. Yan J., Jiang S.-L. Impact of surgical ventricular restoration on early and long-term outcomes of patients with left ventricular aneurysm. *Medicine (Baltimore)*. 2020;97(41):e12773. DOI: 10.1097/MD.00000000000012773.
8. Siddiqui I., Nguyen T., Movahed A., Kabirdas D. Elusive left ventricular thrombus: Diagnostic role of cardiac magnetic resonance imaging-A case report and review of the literature. *World J. Clin. Cases*. 2018;6(6):127–131. DOI: 10.12998/wjcc.v6.i6.127.
9. Paul M., Schäfers M., Grude M., Reinke F., Juergens K.U., Fischbach R. et al. Idiopathic left ventricular aneurysm and sudden cardiac death in young adults. *Europace*. 2006;8(8):607–612. DOI: 10.1093/eurpace/eul074.
10. Levin D., Mackensen G.B., Reisman M., McCabe J.M., Dvir D., Ripley B. 3D printing applications for transcatheter aortic valve replacement. *Curr. Card. Rep.* 2020;22(4):23. DOI: 10.1007/s11886-020-1276-8.
11. Vukicevic M., Puperi D.S., Jane Grande-Allen K., Little S.H. 3D printed modeling of the mitral valve for catheter-based structural interventions. *Ann. Biomed. Eng.* 2017;45(2):508–519. DOI: 10.1007/s10439-016-1676-5.
12. Cherniavskii A.M., Kareva Yu.E., Denisova M.A., Efendiev V.U. The problem of preoperative left ventricular modeling. *Russian Journal of Cardiology and Cardiovascular Surgery*. 2015;8(2):4–7. (In Russ.). DOI: 10.17116/kardio2015824-7.
13. Cox J.L. Surgical management of left ventricular aneurysms: a clarification of the similarities and differences between the Jatene and Dor techniques. *Semin. Thorac. Cardiovasc. Surg.* 1997;9(2):131–138.
14. Jacobs S., Grunert R., Mohr F.W., Falk V. 3D-Imaging of cardiac structures using 3D heart models for planning in heart surgery: a preliminary study. *Interact. Cardiovasc. Thorac. Surg.* 2008;7(1):6–9. DOI: 10.1510/icvts.2007.156588.
15. Radivilko A.S. Prevention of complications after surgery with cardiopulmonary bypass. *Complex Issues of Cardiovascular Diseases*. 2016;(3):117–123. (In Russ.). DOI: 10.17802/2306-1278-2016-3-117-123.
16. Chegrina L.V., Rybka M.M. Interrelation of increase postoperative level troponin T and a lactate with development of complications in the patients operated with application of cardiopulmonary bypass. *Clinical Physiology of Circulation*. 2015;(1):42–48. (In Russ.).
17. Belov Yu.V., Litvickiy P.F., Vinokurov I.A. Acute renal dysfunction after cardiac surgery: Predictors, mechanisms of development and criteria for diagnosis. *Sechenov Medical Journal*. 2015;22(4):4–11. (In Russ.).
18. Farhoudi M., Mehrvar K., Afrasiabi A., Parvizi R., Khalili A.A., Nasiri B. et al. Neurocognitive impairment after off-pump and on-pump coronary artery bypass graft surgery – an Iranian experience. *Neuropsychiatr. Dis. Treat.* 2010;6:775–778. DOI: 10.2147/NDT.S14348.
19. Motalebzadeh R., Bland J.M., Markus H.S., Kaski J.C., Jahangiri M. Neurocognitive function and cerebral emboli: randomized study of on-pump versus off-pump coronary artery bypass surgery. *Ann. Thorac. Surg.* 2007;83(2):475–482. DOI: 10.1016/j.athoracsur.2006.09.024.
20. Lombard F.W., Mathew J.P. Neurocognitive dysfunction following cardiac surgery. *Semin. Cardiothorac. Vasc. Anesth.* 2010;14(2):102–110. DOI: 10.1177/1089253210371519.

Информация о вкладе авторов

Кушнарев С.В. – разработка концепции исследования, проверка критически важного интеллектуального содержания, планирование методов для получения результатов, анализ и интерпретация данных, окончательное утверждение рукописи для публикации.

Железняк И.С. – разработка концепции исследования, проверка критически важного интеллектуального содержания, окончательное утверждение рукописи для публикации.

Information on author contributions

Kushnarev S.V. – study concept, revision of essential intellectual content, methodological support, data analysis, data interpretation, and final approval of the manuscript for publication.

Zheleznyak I.S. – study concept, revision of essential intellectual content, and final approval of the manuscript for publication.

Kravchuk V.N. – study concept, methodological support, data analysis, and data interpretation.

Кравчук В.Н. – разработка концепции исследования, планирование методов для получения результатов, анализ и интерпретация данных.

Рудь С.Д. – планирование методов для получения результатов, анализ и интерпретация данных.

Ширшин А.В. – планирование методов для получения результатов, анализ и интерпретация данных, проверка критически важного интеллектуального содержания, окончательное утверждение рукописи для публикации.

Меньков И.А. – планирование методов для получения результатов, анализ и интерпретация данных.

Rud S.D. – methodological support, data analysis, and data interpretation.

Shirshin A.V. – methodological support, data analysis, data interpretation, revision of essential intellectual content, and final approval of the manuscript for publication.

Menkov I.A. – methodological support, data analysis, and data interpretation.

Сведения об авторах

Кушнарев Сергей Владимирович, канд. мед. наук, преподаватель, кафедра рентгенологии и радиологии с курсом ультразвуковой диагностики, Военно-медицинская академия имени С.М. Кирова Министерства обороны Российской Федерации. ORCID 0000-0003-2841-2990.

E-mail: s.v.kushnarev@yandex.ru.

Железняк Игорь Сергеевич, д-р мед. наук, доцент, начальник кафедры рентгенологии и радиологии с курсом ультразвуковой диагностики, Военно-медицинская академия имени С.М. Кирова Министерства обороны Российской Федерации. ORCID 0000-0001-7383-512X.

E-mail: igzh@bk.ru.

Кравчук Вячеслав Николаевич, д-р мед. наук, доцент, заведующий кафедрой сердечно-сосудистой хирургии, Северо-Западный государственный медицинский университет имени И.И. Мечникова Министерства здравоохранения Российской Федерации; профессор, 1-я кафедра хирургии усовершенствования врачей, Военно-медицинская академия имени С.М. Кирова Министерства обороны Российской Федерации. ORCID 0000-0002-6337-104X.

E-mail: kravchuk9@yandex.ru.

Рудь Сергей Дмитриевич, канд. мед. наук, доцент, преподаватель, кафедра рентгенологии и радиологии с курсом ультразвуковой диагностики, Военно-медицинская академия имени С.М. Кирова Министерства обороны Российской Федерации. ORCID 0000-0002-3585-9793.

E-mail: rsd@mail.ru.

Ширшин Александр Вадимович, врач-рентгенолог, клиника рентгенодиагностики и ультразвуковой диагностики, Военно-медицинская академия имени С.М. Кирова Министерства обороны Российской Федерации; аспирант, факультет систем управления и робототехники, Национальный исследовательский университет ИТМО. ORCID 0000-0002-1494-9626.

E-mail: asmdot@gmail.com.

Меньков Игорь Анатольевич, канд. мед. наук, заведующий отделением лучевой диагностики, клиника рентгенодиагностики и ультразвуковой диагностики, Военно-медицинская академия имени С.М. Кирова Министерства обороны Российской Федерации. ORCID 0000-0002-1569-2180.

E-mail: i.menkov@gmail.com.

 **Кушнарев Сергей Владимирович**, e-mail: s.v.kushnarev@yandex.ru.

Information about the authors

Sergey V. Kushnarev, Cand. Sci. (Med.), Lecturer, Department of Roentgenology and Radiology with the Course of Ultrasound Diagnostics, Military Medical Academy named after S.M. Kirov. ORCID 0000-0003-2841-2990.

E-mail: s.v.kushnarev@yandex.ru.

Igor S. Zheleznyak, Dr. Sci. (Med.), Associate Professor, Head of the Department, Department of Roentgenology and Radiology with the Course of Ultrasound Diagnostics, Military Medical Academy named after S.M. Kirov. ORCID 0000-0001-7383-512X.

E-mail: igzh@bk.ru.

Vyacheslav N. Kravchuk, Dr. Sci. (Med.), Associate Professor, Head of the Department, Department of Cardiovascular Surgery, North-Western State Medical University named after I.I. Mechnikov; Professor, 1st Department of Surgery for Advanced Training of Doctors, Military Medical Academy named after S.M. Kirov. ORCID 0000-0002-6337-104X.

E-mail: kravchuk9@yandex.ru.

Sergey D. Rud, Cand. Sci. (Med.), Associate Professor, Lecturer, Department of Roentgenology and Radiology with the Course of Ultrasound Diagnostics, Military Medical Academy named after S.M. Kirov. ORCID 0000-0002-3585-9793.

E-mail: rsd@mail.ru.

Alexander V. Shirshin, Radiologist, Clinic of Roentgenoradiology with Ultrasound Diagnostics, Military Medical Academy named after S.M. Kirov; Postgraduate, Faculty of Control Systems and Robotics, ITMO University. ORCID 0000-0002-1494-9626.

E-mail: asmdot@gmail.com.

Igor A. Menkov, Cand. Sci. (Med.), Chief of Department of Diagnostic Radiology, Clinic of Roentgenoradiology with Ultrasound Diagnostics, Military Medical Academy named after S.M. Kirov. ORCID 0000-0002-1569-2180.

E-mail: i.menkov@gmail.com.

 **Sergey V. Kushnarev**, e-mail: s.v.kushnarev@yandex.ru.

Received February 14, 2022

Поступила 14.02.2022