

# Первый опыт интраоперационной эластографии миокарда у кардиохирургических пациентов

В.А. Сандриков, Э.Р. Чарчян, А.В. Лысенко, Т.Ю. Кулагина, А.Н. Дзеранова, А.В. Новикова, С.В. Федулова, С.О. Попов

ФГБНУ «Российский научный центр хирургии им. академика Б.В. Петровского» Москва, Россия

## РЕЗЮМЕ

**Целью** работы было изучение возможности применения интраоперационной эластографии для определения жесткости миокарда левого желудочка. **Материал и методы.** Интраоперационно эластография выполнена у 6 пациентов с изолированным аортальным стенозом и расслаивающей аневризмой восходящей аорты с аортальной недостаточностью. Три пациента оперированы с заменой аортального клапана на механические протезы (SIM-19) и трое были оперированы с заменой восходящего отдела аорты на искусственный протез с протезированием аортального клапана (операция Девиды). Средний возраст пациентов составил  $42 \pm 9$  лет (42–53) года. Все пациенты оперированы в условиях искусственного кровообращения. Первоначально эластография оценивалась на работающем сердце, а затем на полном искусственном кровообращении. Исследование выполняли на ультразвуковом приборе VK5000 с интраоперационным датчиком типа «клюшка» с частотой 7,5–15 МГц, усилением 1,6 Дб, разрешением 127 Гц. Оценивали коэффициент деформации. Программу для визуализации выставляли как для «нейрохирургии» с частотой 15 МГц. Визуализацию выполняли в В-режиме с последующим получением эластографии сдвиговой волны с расчетом коэффициента деформации. **Результаты.** Оценивали волновую эластографию при различной патологии сердца с различной толщиной миокарда. Было обнаружено, что жесткость в исследуемых участках миокарда различная. Так, у пациентов с аортальным стенозом атеросклеротического типа и градиентом давления более 100 мм рт. ст., коэффициент деформации увеличен, в соответствии с толщиной миокарда, и составлял 3,81–4,06, а у пациентов с дилатацией корня аорты и аортальной недостаточностью коэффициент деформации составил 1,64–2,9. **Заключение.** Интраоперационная оценка коэффициента деформации миокарда левого желудочка возможна только на остановленном сердце и дает представление о состоянии сердечной мышцы с возможностью мягких и жестких участков. Эластография сдвиговой волной предоставляет информацию об упругости и твердости ткани, что косвенно отражает вязкость миокарда. Это исследование было направлено на проверку методики оценки характеристики эластичности миокарда левого желудочка на перегрузку миокарда давлением (аортальный стеноз) и объемом при дилатации корня аорты с аортальной недостаточностью.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** интраоперационная эластография, миокард, коэффициент деформации.

**КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## The first experience of intraoperative myocardial elastography in cardiac surgery patients

V.A. Sandrikov, E.R. Charchyan, A.V. Lysenko, T.Yu. Kulagina, A.N. Dzeranova, A.V. Novikova, S.V. Fedulova, S.O. Popov

Petrovsky National Research Centre of Surgery, Moscow, Russia

## SUMMARY

**The goal** the work was to study the possibility of using elastography on an open heart to determine the stiffness of the left ventricular myocardium. **Material and methods.** Intraoperative elastography was performed in 6 patients with isolated aortic stenosis and dissecting aneurysm of the ascending aorta with aortic insufficiency. Three patients underwent surgery to replace the aortic valve with mechanical prostheses (SIM-19) and three were operated to replace the ascending aorta with an artificial prosthesis with aortic valve replacement (David's operation). The average age of the patients was  $42 \pm 9$  years (42–53) years. All patients underwent surgery under conditions of artificial blood circulation. Initially, elastography was evaluated on a working heart, and then on full artificial circulation. The study was performed on a VK 5000 ultrasound device with an intraoperative («stick») type sensor at a frequency of 7.5–15 Mhz, gain of 1.6 Db, resolution of 127 hz. The deformation coefficient was evaluated. The imaging program was exposed as for neurosurgery with a frequency of 15 Mhz. Visualization was performed in B-mode, followed by obtaining shear wave elastography with calculation of the deformation coefficient. **Results.** Wave elastography was evaluated for various heart pathologies with different myocardial thickness. It was found that the stiffness in the studied areas of the myocardium is different. Thus, in patients with atherosclerotic aortic stenosis and a pressure gradient of more than 100 mmHg, the deformation coefficient was increased, in accordance with the thickness of the myocardium and amounted to 3.81–4.06, and in patients with aortic root dilation and aortic insufficiency, the deformation coefficient was 1.64–2.9. **Conclusion.** Intraoperative assessment of the left ventricular myocardial deformation coefficient is possible only on a stopped heart and gives an idea of the state of the heart muscle with the possibility of soft and hard areas. Shear wave elastography provides information about the elasticity and hardness of the tissue, which indirectly reflects the viscosity of the myocardium. This study was aimed at verifying the methodology for assessing the characteristics of the elasticity of the left ventricular myocardium for myocardial overload by pressure (aortic stenosis) and volume in case of a dissecting aortic aneurysm with aortic insufficiency.

**KEYWORDS:** intraoperative elastography, myocardium, strain coefficient.

**CONFLICT OF INTEREST.** The authors declare that they have no conflicts of interest.

## Введение

Эластография миокарда – метод отслеживания спеклов, был предложен для оценки деформации сердца с целью выявления различий в вязкоупругих свойствах сердечной мышцы [1]. В 2020 году в США начаты исследования миокарда интраоперационно с помощью эластографии у кардиохирургических пациентов (Клиническое испытание NCT02051920 – Кардиоэластография: исследование в интраоперационной кардиохирургии (REA-FO)).

Современный подход к количественной оценке функции миокарда основан на измерении напряжения миокарда с помощью ультразвуковой визуализации, компьютерной томографии. Однако, методы визуализации деформации миокарда сильно зависят от частоты сердечных сокращений, нарушения ритма, давления в полостях сердца, ишемической и клапанной патологии, в зависимости от видов перегрузки сердца. В связи с этим, интерпретация деформации миокарда остается достаточно сложной в клинической практике. Чтобы определить независимое механическое свойство миокарда, такое как жесткость, необходимо оценить распределение напряжений в период сердечного цикла [2]. К сожалению, такие измерения не всегда возможны.

В практике в оценке деформации в режиме реального времени достаточно надежен ультразвук, в тоже время преимущество МРТ заключается в том, что метод чувствителен к движению в трех измерениях, что особенно важно в исследовании эластографии. Однако МР-эластография от длительного времени сканирования теряет взаимосвязь с электрокардиограммой, что приводит к неточности измерения [3]. Однако многие исследования деформации миокарда эластографией вызывают сомнения в точности их получения из-за динамического сокращения сердца [3 и 4]. В связи с этим, целью работы послужила попытка оценить коэффициент деформации миокарда интраоперационно на остановленном кровообращении.

## Материал и методы

Интраоперационно обследовано 6 пациентов с патологией сердца. Три пациента были с аортальным стенозом, три пациента – с дилатацией корня аорты, двустворчатым аортальным клапаном и аортальной недостаточностью 3 степени. Оценивали стенку аорты, миокард левого желудочка. Все пациенты оперированы в условиях искусственного кровообращения и холодовой кардиopleгии. Первоначально эластография оценивалась на работающем сердце, а затем на остановленном во время искусственного кровообращения. В одном случае интраоперационно после выполнения коррекции патологии датчик вводился в полость левого желудочка, где оценивали миокард и перегородку. Исследование выполняли на ультразвуковом приборе ВК 5000 с интраоперационным датчиком на частоте 7,5 и 15 Мг, усиление 1,6 Дб, разрешение 127 Гц. Программу для визуализации выставляли как для нейрохирургии. Анализировали четыре участка миокарда с построением гистограммы распределения деформации (рис. 1). Визуализацию выполняли в В-режиме с изображением эластографии сдвиговой волны и автоматическим расчетом коэффициент деформации.

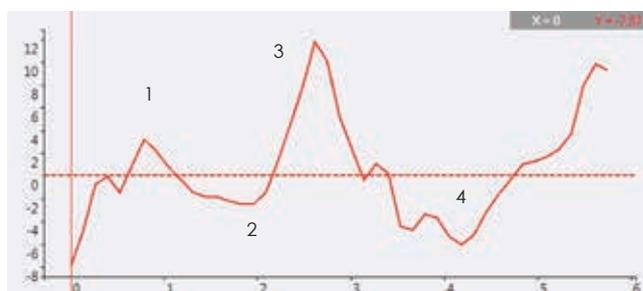
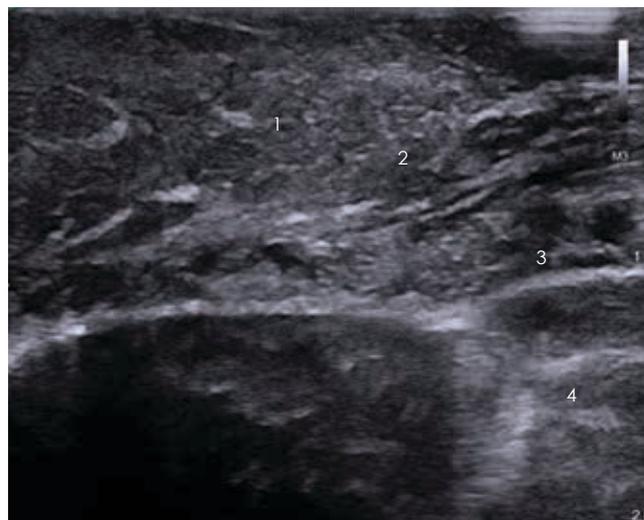


Рисунок 1. Области миокарда в различных участках миокарда с расстоянием в 1,2 см друг от друга для визуализации эластограммы. Дифференцированная гистограмма распределения коэффициента деформации согласно выбранным участкам миокарда

## Результаты

В данной работе рассматривается методика количественной оценки деформационной визуализации, с сегментацией миокарда у пациентов с патологией миокарда и аорты в интраоперационном периоде до подключения искусственного кровообращения и в период полного искусственного кровообращения с фибрилляцией сердца. Ишемия миокарда во всех случаях не превышала 60–65 минут. Оценивали волновую эластографию при различной толщине миокарда (таблица 1).

Таблица 1  
Значения коэффициента деформации у пациентов с аортальным стенозом и аневризмой восходящей аорты с аортальной недостаточностью на искусственном кровообращении

Параметры	Аортальный стеноз	Дилатации корня аорты + АН	Процент отличия между патологиями
Расстояние измерения	6,3	6,45	+3
1 точка	3,51	1,67	-53
2 точка	5,75	2,66	-54
3 точка	4,12	2,93	-39
4 точка	2,62	1,49	-43
Площадь измерения, см <sup>2</sup>	1,35	1,33	-2
Объем потока мл/мин	2,7	2,8	+4

Примечание: точки измерения соответствуют рисунку 1.

Было обнаружено, что жесткость в различных участках миокарда не однородная. Так, у пациентов с аортальным стенозом и градиентом давления более 100 мм рт. ст.

коэффициент жесткости увеличен в соответствии с толщиной миокарда до 1,7 см и составляет от 2,62 до 5,75 (рис. 2 и 3).

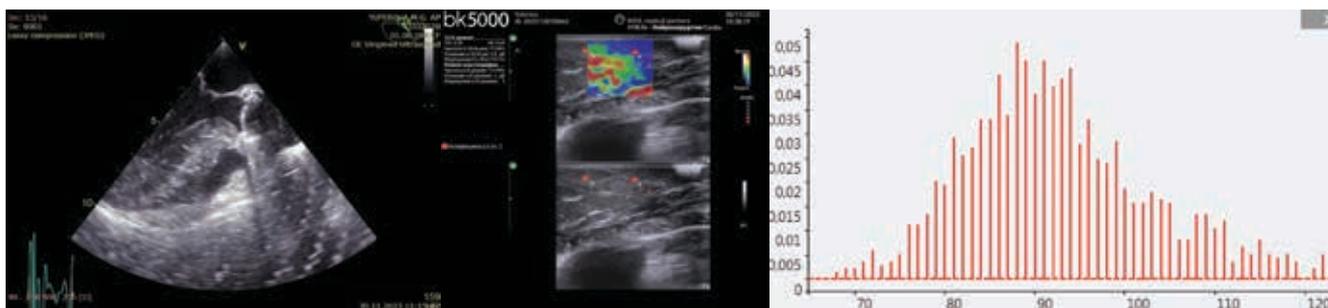


Рисунок 2. Чреспищеводная эхокардиография и интраоперационная эластография миокарда и гистограмма распределения деформации у пациента с аортальным стенозом. Коэффициент деформации в данном случае составляет 4,06 на площади 0,008 см<sup>2</sup>

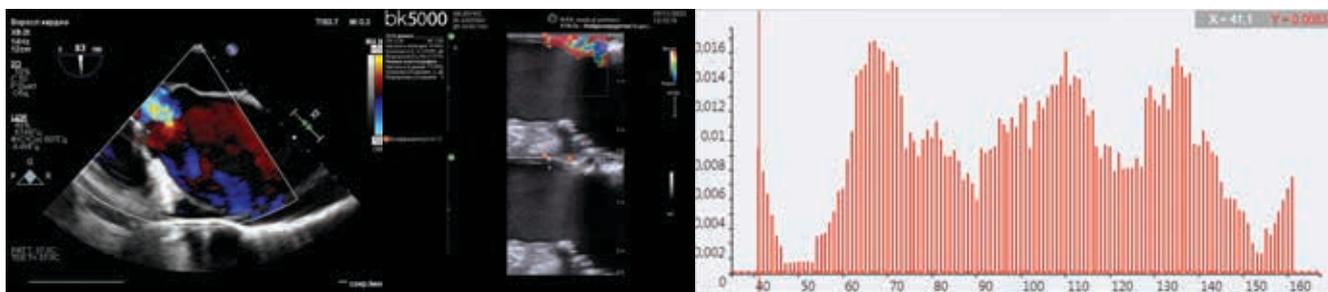


Рисунок 3. Чреспищеводная эхокардиография и интраоперационная эластография миокарда с гистограммой распределения деформации у пациента с дилатацией корня аорты, двустворчатым аортальным клапаном и аортальной недостаточностью. Коэффициент деформации составляет от 1,49 до 2,9 на площади 0,001 см<sup>2</sup>



Рисунок 4. Сравнение деформации миокарда по данным эластографии до и после операции у пациентов с дилатацией корня аорты с аортальной недостаточностью и аортальным стенозом. DA – диаметр аорты (см), TCA – толщина стенки аорты (мм), KDA – коэффициент деформации стенки аорты, KDM – коэффициент деформации миокарда левого желудочка

Отмечается достоверная разница между этими патологиями по дифференциальным гистограммам. Так, при сравнении деформации миокарда по данным эластографии до и после операции у пациентов с дилатацией корня аорты с аортальной недостаточностью и аортальным стенозом после операции коэффициент деформации стенки аорты и миокарда практически в 2 раза (рис. 4).

Скорость сдвиговой волны незначительно уменьшается при толщине миокарда от 4 до 12 мм, а затем значительно снижается при толщине менее 3 мм. Этот эффект был обусловлен распространением управляемых волн, когда толщина и длина волны сдвига становятся одного порядка. Следовательно, измеренная скорость сдвига занижается при толщине менее 4 мм, а смещение

скорости сдвиговой волны превышает 12%. Эти результаты также показывают, что скорость сдвиговой волны может быть измерена в тканях толщиной более 4 мм с отклонением скорости сдвиговой волны до 10–15%. Поэтому применение эластографии сдвиговой волной в клинической практике для оценки жесткости миокарда может быть ограничена на истонченном миокарде при патологиях, характеризующихся уменьшением толщины стенки миокарда.

Оценка жесткости миокарда по результатам исследования показала, что измерения, полученные интраоперационно, хорошо согласуются с патологией. Анализ показывает, что измерения при толщине миокарда более 1 см с высокими скоростями сдвиговых волн, характерны

для жестких тканей. Этот факт связан с ограничением метода интраоперационной визуализации миокарда и качества полученных данных на работающем сердце для отслеживания распространения сдвиговой волны. Поэтому эластография миокарда сдвиговой волной на работающем сердце не дает представления о жесткости и соответственно, можно предположить, является ограниченным методом исследования в диагностике.

### Обсуждение

В настоящее время осуществляются подходы в применении эластографии сердца. Сокращение и расслабление сердца оценивают с изменением сдвига миокарда, что представляет собой физическую величину в виде напряжения и давления в желудочке. Появление ультразвуковой визуализации с высокой частотой кадров позволило разработать эластографию сдвиговой волной в качестве неинвазивной альтернативы для оценки жесткости миокарда. В 2007 году Jianwen L et. al. [5] выполнили эксперименты на животных с оценкой жизнеспособности миокарда после перевязки коронарной артерии. Было показано, что у животных перенесших инфаркт, отмечено снижение подвижности и деформации в пораженном участке миокарда. На основании этого был сделан вывод, что кумулятивные эластограммы имеют более высокий коэффициент деформации, по сравнению с нормой.

В 2007 году Wei-Ning Lee et. al. [3] была разработана теоретическая основа для оценки эффективности двумерной эластографии миокарда, на основе ранее разработанной трехмерной конечно-элементной модели левого желудочка собаки. Были изучены контрольная и ишемическая модели, которые более полно отражают деформацию миокарда. Такой подход был использован для оценки качества миокардиальной эластографии в норме и при ишемии. Оценка механических параметров тканей миокарда по эластографии используется и в клинических условиях по сдвиговой волне [4, 6, 7].

В наших исследованиях у пациентов с дилатацией корня аорты и аортальной недостаточностью также наблюдалось снижение коэффициента деформации в участках миокарда с неравномерной перфузией и структурой миокарда. В тоже время следует отметить, что правильная интерпретация полученных измерений во многом зависит от дополнительных факторов, таких как толщина стенки миокарда, пороков клапанного аппарата, геометрии сердца и давления, при котором выполняется исследование. Так, возможность исследования даже интраоперационно на работающем сердце затруднительна и не всегда дает правильную информацию о состоянии миокарда.

Коэффициент деформации у пациентов с аортальным стенозом и гипертрофией миокарда находился в диапазоне от 1,3 до 5,75, что характеризует плотность тканей

левого желудочка, а построение распределения плотности по гистрограммам указывает на однородность или неоднородность мышцы на достаточно большом участке миокарда (см. рисунок 2 и 3). При этом отмечено, что скорость сдвиговой волны незначительно уменьшается при гипертрофии миокарда более 1,4 см. Этот эффект в основном обусловлен неравномерным распространением волн, когда толщина миокарда увеличена.

Однако следует отметить, что применение эластографии сдвиговой волной в клинической практике для оценки жесткости миокарда может быть ограничена на истонченном миокарде при таких патологиях, как острая аневризма левого желудочка и ряде генетических патологий, которые характеризуются уменьшением толщины стенки миокарда. При сравнении изображений деформации, полученных по данным эластографии, выявлены достоверные различия у пациентов с аортальным стенозом атеросклеротического происхождения и дилатацией аорт с аортальной недостаточностью.

Таким образом, прямое измерение сдвига миокарда дает возможность оценки миокарда при дисфункции и нарушениях релаксации. В нашем предварительном исследовании было показано, что интраоперационная эластография миокарда способна визуализировать деформацию миокарда и оценивать жесткость тканей в исследуемой части миокарда.

### Заключение

Интраоперационное исследование миокарда по оценке коэффициента деформации может быть применено в клинической практике у пациентов с патологией сердца. Применение эластографии рекомендуется для оценки механических свойств миокарда и стенки аорты. Скорость сдвига занижена для тканей толщиной менее 3 мм с коэффициентом деформации от 1,4 до 2,6.

### Список литературы / References

1. Mafalda Correia, Ilya Podetti, Olivier Villemain, Jérôme Baranger, Mickael Tanter, et al. Noninvasive Myocardial Shear Wave Elastography Device for Clinical Applications in Cardiology. *Innovation and Research in BioMedical engineering*, 2017, 38 (6), pp.357-362.
2. Caenen A, Stéphanie Bézy, Mathieu Pernot, Kathryn R. Nightingale, et al. // *Ultrasound Shear Wave Elastography in Cardiology – JACC Cardiovasc Imaging* 2024 Mar;17(3):314-329. doi: 10.1016/j.jcmg.2023.12.007.
3. Wei-Ning Lee, Christopher M Ingrassia, Simon D Fung-Kee-Fung, Kevin D Costa, Jeffrey W Holmes, Elisa E Konofagou // *Theoretical quality assessment of myocardial elastography with in vivo validation*. –IEEE Trans Ultrason Ferroelectr Freq Control. 2007, Nov;54(11):2233-45. doi: 10.1109/tuffc.2007.528.
4. P.Wells, Haidong Liang // *Medical ultrasound: imaging of soft tissue strain and elasticity Journal of the Royal Society Medicine, Engineering*. 2011, 7 November DOI:10.1098/rsif.2011.0054Zile.
5. Jianwen Luo, Kana Fujikura, Shunichi Homma, Elisa E Konofagou // *Myocardial elastography at both high temporal and spatial resolution for the detection of infarcts Ultrasound Med.Biol.* 2007, Aug;33(8):1206-23. doi: 10.1016/j.ultrasmed-bio.2007.01.019.
6. Zile M., Catalin F. Baicu, William H. Gaasch. // *Diastolic Heart Failure — Abnormalities in Active Relaxation and Passive Stiffness of the Left Ventricle Engl. – J. Med.* 2004;350:1953-1959 DOI: 10.1056/NEJMoa032566
7. Rie Nakayama, Yoichi Takaya, Kazufumi Nakamura et al. *Efficacy of shear wave elastography forevaluating right ventricular myocardial fibrosis in monocrotaline-induced pulmonary hypertension rats. J Cardiol* 2021 Jul;78(1):17-23. doi: 10.1016/j.jicc.2021.01.015.

Статья поступила / Received 06.06.2024  
Получена после рецензирования / Revised 02.09.2024  
Принята в печать / Accepted 02.09.2024

#### Информация об авторах

**Сандриков Валерий Александрович**, д. м. н., профессор, академик РАН, руководитель отдела клинической физиологии, инструментальной и лучевой диагностики НКЦ № 1

E-mail: sandrikov@med.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1535-5982>

**Чарчян Эдуард Рафаэлович**, д. м. н., профессор, член-корреспондент РАН, заведующий кардиохирургического I (отделения реконструктивно-восстановительной сердечно-сосудистой хирургии) НКЦ № 1

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3164-2877>

**Лысенко Андрей Викторович**, к. м. н., заведующий отделением дисфункции миокарда НКЦ № 1

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8394-4116>

**Кулагина Татьяна Юрьевна**, д. м. н., заведующая лабораторией электрофизиологии и нагрузочных тестов отдела клинической физиологии, инструментальной и лучевой диагностики НКЦ № 1

E-mail: takula@list.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6165-6474>

**Дзеранова Ангелина Николаевна**, к. м. н., научный сотрудник лаборатории интраоперационной диагностики отдела клинической физиологии, инструментальной и лучевой диагностики НКЦ № 1

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7916-1151>

**Новикова Алина Владимировна**, врач лаборатории интраоперационной диагностики отдела клинической физиологии, инструментальной и лучевой диагностики

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9405-4920>

**Федулова Светлана Вячеславовна**, к. м. н., заведующая лабораторией интраоперационной диагностики отдела клинической физиологии, инструментальной и лучевой диагностики НКЦ № 1

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4517-9078>

**Попов Сергей Олегович**, к. м. н., сердечно-сосудистая хирургия, главный врач НКЦ № 1

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4488-1597>

ФГБНУ «Российский научный центр хирургии им. академика Б.В. Петровского» Москва, Россия

#### Контактная информация:

Сандриков Валерий Александрович. E-mail: sandrikov@med.ru

#### Author information

**Sandrikov Valery Alexandrovich**, MD, Professor, Academician of the Russian Academy of Sciences, Head of Clinical Physiology Department

E-mail: sandrikov@med.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1535-5982>

**Charchyan Eduard Rafaelovich**, MD, Professor, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Head of Cardiac Surgery I (Department of Reconstructive and Reconstructive Cardiovascular Surgery)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3164-2877>

**Lysenko Andrey Viktorovich**, Candidate of Medical Sciences, Head of the Department of Myocardial Dysfunction

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8394-4116>

**Kulagina Tatyana Yurievna**, MD, Head of the Laboratory of Electrophysiology and Stress Tests of the Department of Clinical Physiology, Instrumental and Radiation Diagnostics of the Scientific and Clinical Center No. 1

E-mail: takula@list.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6165-6474>

**Dzeranova Angelina Nikolaeвна**, Candidate of Medical Sciences, Department of Clinical Physiology, Instrumental and Radiation Diagnostics, Laboratory of Intraoperative Diagnostics Scientific and Clinical Center No. 1

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7916-1151>

**Novikova Alina Vladimirovna**, doctor of the Department of Clinical Physiology, Instrumental and Radiation Diagnostics of the Scientific and Clinical Center No. 1

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9405-4920>

**Fedulova Svetlana Vyacheslavovna**, Candidate of Medical Sciences, Head of the Laboratory of Intraoperative Diagnostics, Scientific and Clinical Center No.1

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4517-9078>

**Popov Sergey Olegovich**, Candidate of Medical Sciences, Cardiovascular Surgery, Chief Physician

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4488-1597>

Petrovsky National Research Centre of Surgery, Moscow, Russia

#### Contact information

Sandrikov Valery Alexandrovich. E-mail: sandrikov@med.ru

**Для цитирования:** Сандриков В.А., Чарчян Э.Р., Лысенко А.В., Кулагина Т.Ю., Дзеранова А.Н., Новикова А.В., Федулова С.В., Попов С.О. Первый опыт интраоперационной эластографии миокарда у кардиохирургических пациентов. Медицинский алфавит. 2024;(22):14–18. <https://doi.org/10.33667/2078-5631-2024-22-14-18>

**For citation:** Sandrikov V.A., Charchyan E.R., Lysenko A.V., Kulagina T.Yu., Dzeranova A.N., Novikova A.V., Fedulova S.V., Popov S.O. The first experience of intraoperative myocardial elastography in cardiac surgery patients Medical alphabet. 2024;(22): 14–18. <https://doi.org/10.33667/2078-5631-2024-22-14-18>

