

DOI: <https://doi.org/10.17816/DD568070>



Prospective evaluation of the extensibility of the ascending aorta wall and its vascular prosthesis in a patient with an aneurysm with technically flawless surgical correction and postoperative decrease in functional parameters: A case report

Alexander V. Friedman¹, Tatiana A. Bergen¹, Dmitry A. Sirota¹, Boris N. Kozlov², Irina Yu. Zhuravleva¹, Alexandra R. Tarkova¹, Wladimir Yu. Ussov¹, Alexander M. Chernyavskiy¹

¹ E. Meshalkin National Medical Research Center, Novosibirsk, Russia;

² Cardiology Research Institute of the Tomsk National Research Medical Center, Tomsk, Russia

ABSTRACT

In this clinical case, a patient who had an instrumentally detected aneurysm with the lumen expanding up to 60 mm underwent a surgically flawless prosthetic replacement of the ascending aorta. This treatment led to decreased exercise tolerance, decreased contractile function of the left ventricular myocardium at rest, and enlarged pulmonary artery. The leading factor was a decrease in the volume of systolic expansion of the aorta down to 5 mL (at the initial 13 mL), despite a noticeable increase in the extensibility and a decrease in mechanical stiffness compared with initial indexes of the affected aortic wall. In the literature review, considering mechanical extensibility and elasticity, problems in creating aortic prostheses equivalent to those for healthy biological tissues were discussed.

Keywords: aneurysm of the ascending aorta; prosthetics of the ascending aorta; extensibility; Young's modulus; systolic stretching of the aorta; coronary blood supply to the myocardium; case report.

To cite this article:

Friedman AV, Bergen TA, Sirota DA, Kozlov BN, Zhuravleva IYu, Tarkova AR, Ussov WYu, Chernyavskiy AM. Prospective evaluation of the extensibility of the ascending aorta wall and its vascular prosthesis in a patient with an aneurysm with technically flawless surgical correction and postoperative decrease in functional parameters: A case report. *Digital Diagnostics*. 2024;5(2):342–353. DOI: <https://doi.org/10.17816/DD568070>

DOI: <https://doi.org/10.17816/DD568070>

Перспективная оценка показателей растяжимости стенки восходящей аорты и её сосудистого протеза у пациентки с аневризмой при технически безупречной хирургической коррекции и послеоперационном снижении функциональных показателей: клинический случай

А.В. Фридман¹, Т.А. Берген¹, Д.А. Сирота¹, Б.Н. Козлов², И.Ю. Журавлева¹, А.Р. Таркова¹, В.Ю. Усов¹, А.М. Чернявский¹

¹ Национальный медицинский исследовательский центр имени академика Е.Н. Мешалкина, Новосибирск, Россия;

² Научно-исследовательский институт кардиологии Томского национального исследовательского медицинского центра Российской академии наук, Томск, Россия

АННОТАЦИЯ

Представлен и обсуждён клинический случай, когда у пациентки после выполнения хирургически безупречного протезирования восходящей аорты отмечалось выраженное снижение толерантности к физической нагрузке, снижение сократительной функции миокарда левого желудочка в покое и расширение лёгочной артерии вследствие усиления лёгочной артериальной гипертензии. Протезирование было выполнено в связи с инструментально выявленной при расширенном магнитно-резонансном томографическом исследовании аневризмой восходящей аорты с увеличением просвета в поперечном сечении аорты до 60 мм. Показано, что единственным и ведущим фактором к развитию негативных последствий протезирования явилось снижение объёма систолического расширения аорты до 5 мл, при исходных 13 мл, несмотря на заметное увеличение показателей растяжимости и снижения механической жёсткости по сравнению с показателями поражённой стенки аорты. Представлен обзор литературы и обсуждены в этой связи настоятельная необходимость и проблемы создания протезов аорты, эквивалентных по показателям механической растяжимости и упругости таковым для здоровых биологических тканей.

Ключевые слова: аневризма восходящей аорты; протезирование восходящей аорты; растяжимость; модуль Юнга; коронарное кровоснабжение миокарда; клинический случай.

Как цитировать:

Фридман А.В., Берген Т.А., Сирота Д.А., Козлов Б.Н., Журавлева И.Ю., Таркова А.Р., Усов В.Ю., Чернявский А.М. Перспективная оценка показателей растяжимости стенки восходящей аорты и её сосудистого протеза у пациентки с аневризмой при технически безупречной хирургической коррекции и послеоперационном снижении функциональных показателей: клинический случай // Digital Diagnostics. 2024. Т. 5, № 2. С. 342–353. DOI: <https://doi.org/10.17816/DD568070>

DOI: <https://doi.org/10.17816/DD568070>

对一名动脉瘤患者升主动脉壁及其血管假体的伸展性参数进行前瞻性评估，手术矫正技术完美，但术后功能下降

Alexander V. Friedman¹, Tatiana A. Bergen¹, Dmitry A. Sirota¹, Boris N. Kozlov²,
Irina Yu. Zhuravleva¹, Alexandra R. Tarkova¹, Wladimir Yu. Ussov¹, Alexander M. Chernyavskiy¹

¹ E. Meshalkin National Medical Research Center, Novosibirsk, Russia;

² Cardiology Research Institute of the Tomsk National Research Medical Center, Tomsk, Russia

摘要

本文介绍并讨论了一例临床病例，患者在对升主动脉进行无瘤假体修复手术后，运动耐力明显下降，左心室静息时心肌收缩功能减弱，肺动脉高压加重导致肺动脉扩张。通过增强磁共振成像器械检测到升主动脉瘤，主动脉横截面的管腔扩大到 60 毫米，在这种情况下进行了假体植入术。结果表明了，尽管与病变主动脉壁的指数相比，主动脉的伸展性指数明显增加，机械硬度指数下降，但假体造成不良后果的唯一和主要因素是主动脉收缩期的扩张量从最初的 13 毫升减少到 5 毫升。本文对文献进行了综述，并就此讨论了制作在机械延伸性和弹性方面与健康生物组织相当的主动脉假体的迫切性和问题。

关键词：升主动脉瘤；升主动脉假体；伸展性；Young 模块；冠状动脉心肌血流；临床病例。

引用本文：

Friedman AV, Bergen TA, Sirota DA, Kozlov BN, Zhuravleva IYu, Tarkova AR, Ussov WYu, Chernyavskiy AM. 对一名动脉瘤患者升主动脉壁及其血管假体的伸展性参数进行前瞻性评估，手术矫正技术完美，但术后功能下降. *Digital Diagnostics*. 2024;5(2):342–353.

DOI: <https://doi.org/10.17816/DD568070>

收到: 06.08.2023

接受: 06.12.2023

发布日期: 29.01.2024

论证

对于升主动脉膝部横截面延伸超过5厘米[1]的主动脉瘤病变，手术治疗历来是将此类患者从几乎不可避免的动脉瘤破裂风险中拯救出来的首选方法，急性动脉瘤破裂几乎会导致 100% 的死亡率[2-4]。

目前已开发出多种心脏手术干预方法，包括使用全弓或部分弓假体置换升主动脉[5]。

在评估此类假体的结果时，通常基于这些患者死亡风险的显著降低[2]，而对升主动脉生理和生物力学指标的定量评估、假体植入后患者的生活质量、心绞痛的存在和严重程度以及其他冠状动脉缺血指数则被置于次要地位[3]。这通常是合理的，因为挽救病人的生命始终是第一位的。

然而，为了在升主动脉瘤的手术治疗中实现降低死亡率的可持续效果，就必然需要进一步改进病理生理学标准，这些标准决定了患者的功能状态、康复和重返工作岗位的可能性、心肌状态以及影响冠状动脉供血的因素。

升主动脉是向心肌供血的血管系统中最重要解剖和功能部分，因为流向心肌的血流几乎完全发生在舒张期，并且发生在升主动脉收缩期拉伸的体积内[6]。长期以来，生理学家和运动医生[6]以及瓣膜和血管假体开发专家[7]一直在研究升主动脉的弹性特性，以了解收缩期拉伸的主动脉在舒张期下降时如何为心肌提供足够的血流供应。然而，在单中心和中心间研究中，主动脉弹性的生物物理和生物力学评估的临床应用都很少[4]。此前，我们已经证明，升主动脉弹性和扩张性的降低以及僵硬度的增加是导致急性心肌梗死发生的最重要病理因素[8, 9]。显然，对患有动脉瘤病理的心脏手术患者升主动脉弹性的研究具有同样的临床意义。假体弹性不足可能是一个限制因素，有时甚至是病理因素。

在这方面，我们在此报告了一例患者的随访病例，尽管升主动脉假体修复手术并不复杂，但术后 pO_2 水平和其他必要的高功能表现指标（如运动耐力）却未能达到足够的水平。这些指标不仅没有增加，反而出现了恶化，患者本人在术后几个月内一直依赖于使用氧气浓缩器进行呼吸。

病例描述

介绍了一例在手术治疗期间对主动脉瘤生物力学指标动态进行前瞻性观察的病例，患者B-k，65岁，曾患动脉高血压10年（血压完全药物控制）。该患者还被诊断患有2型糖尿病，在口服降糖药物后，血糖和糖化血红蛋白水平已恢复到正常值范围。在过去的15年中，没有发现其他疾病。

最初，患者因头晕和虚弱发作频率增加，伴有呼吸急促和短暂的言语丧失发作而求助于神经科

医生。由于怀疑颈内动脉或其分支严重狭窄，她被转诊接受颈内动脉超声波和磁共振（MR）血管造影检查。

术前还进行了冠状动脉造影和主动脉造影检查，充分确认了主动脉病变的性质和范围，排除了冠状动脉狭窄病变。最大的狭窄是右冠状动脉近端三分之一处的狭窄，达动脉管腔的35%。在左冠状动脉池中，其主要分支的狭窄程度均未超过25%。

主动脉假体手术前，心电图监测的自行车运动试验的运动耐量阈值为25W，呼吸困难和肌肉无力是停止测试的原因。测试期间没有冠状动脉功能不全的心电图迹象。

如上所述，患者接受了心脏和主动脉壁的心电图同步磁共振成像研究[8]，包括覆盖胸主动脉直至膈肌水平。特别是，心脏短轴和长轴的磁共振成像切片是通过以下方式获得的：

- T1 加权图像（WI）：重复时间（TR）= 500 毫秒，回波时间（TE）= 12毫秒；
- T2-WI：TR=4000毫秒，TE=25毫秒；
- SSFP加权模式。

切片厚度为5-8毫米，矩阵为 256×392 或 256×256。作为心脏和胸部心电图同步磁共振成像的一部分，胸部器官的研究是在轴向切片中进行的，T1-WI，呼吸和心电图同步，TR=1850-1900 毫秒，TE=32毫秒（图 1）。在这种模式下，胸腔大血管的结构，尤其是血管壁，都能得到稳定的成像。由于肾小球滤过率的临界值（小于 30 毫升/（分钟×1.73平方米）），该研究在没有额外顺磁对比增强的情况下进行。

心脏磁共振成像后，在在轴向平面上以电影模式对升主动脉与肺动脉分叉交界处进行心电图同步磁共振成像，每个心动周期记录24帧，测定心动周期中主动脉壁厚度的变化（图 2, b）、研究水平主动脉腔的直径和横截面积（图 2, a 中用箭头标出）。对心脏磁共振成像结果进行标准处理，计算左心室舒张末期（LVEDV，毫升）和收缩末期（LVESV，毫升）容积以及射血分数（EF）。此外，还根据获得的无对比度cine-MRI数据计算了主动脉扩张性的生物力学指标。

根据这些测量结果和线性生物物理模型[10, 11]，计算出主动脉横向拉伸量[12]：

$$Distensibility_{adj} = S_{syst} - S_{diast} / S_{diast} \quad (1)$$

此外，还计算了根据脉搏血压标准化的拉伸强度：

$$Distensibility_{adj} = \frac{S_{syst} - S_{diast} / S_{diast}}{BP_{pulse}} \quad (2),$$

其中 S_{syst} 和 S_{diast} — 收缩期和舒张期主动脉横截面积分别为， BP_{pulse} — 动脉脉压，如图 3 所示。

升主动脉壁的横向 Young 模量是根据心电图同步磁共振主动脉造影数据，并且按照生物力学实验[10, 11]中详细研究的技术计算得出的：

$$E = \frac{d_{diast}^2 \times (1 - 0,25) \times BP_{pulse}}{2 \times h \times \Delta d_{pulse}} \times 133,3 \quad (3),$$

其中 E — Young模量 (帕),

d_{diast} — 舒张期主动脉横径、

Δd_{pulse} — 收缩期主动脉直径增大

0,25 — 是主动脉壁 Poisson 系数的平方, 已知该系数等于 0.5 [11]、

h — 舒张期主动脉壁厚 (见图 2, b)

BP_{pulse} — 脉搏血压,

133.3 — 毫米汞柱与帕的换算系数。

在收缩期和舒张期, 从瓣膜上水平到主动脉弓中部 (肱动脉干和左颈总动脉口之间) 的长度计算升主动脉的体积。膝上主动脉被表示为一个变形的、即均匀不可压缩弯曲的、长度为 1 的截

顶锥体 (如图 1 a 所示, “主动脉瓣-主动脉弓中部” 部分的长度), 其基底半径由胶片模式下的横截面确定: 下部基底半径 — R , 上部基底半径 — r 。这样就可以高精度地计算出截断变形锥体—升主动脉膝部—的体积[13]:

$$V = \frac{1}{3}\pi l (R^2 + Rr + r^2) \quad (4)$$

根据升主动脉收缩期和舒张期容积的差异, 确定收缩期主动脉容积膨胀值 ΔV_{sys} , ml, 该值决定了心动周期舒张期心肌主要供血时冠状动脉供血可用的血容量[6, 14]。

患者在体外循环下接受了升主动脉和半弓的人工置换术, 置换的是直径为35毫米的合成GORE-TEX假体 (W.L. Gore & Associates, USA), 没有置换主动脉

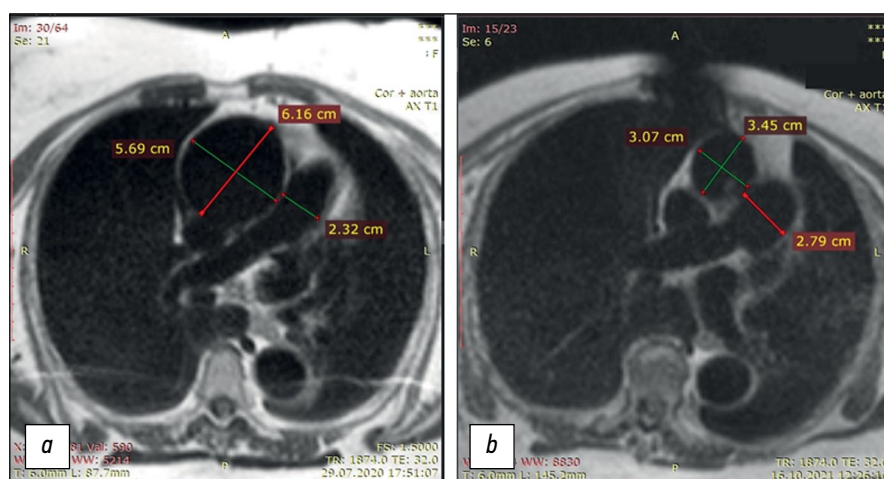


图 1. 患者B-k在肺动脉分叉处的胸部器官, 特别是胸主动脉的T1加权图像横向切片: **a** — 动脉瘤扩张的胸主动脉人工修复前, 可见动脉瘤升主动脉临界扩张至大于6厘米; **b** — 动脉瘤扩张的胸主动脉人工修复后, 升主动脉横截面恢复正常。在植入假体前后, 降主动脉都在正常范围内。值得注意的是, 植入假体后肺动脉扩张到27毫米, 而入院时的初始横截面为23毫米。术后CT扫描还显示了钢丝金属固定器在胸骨区域的伪影。

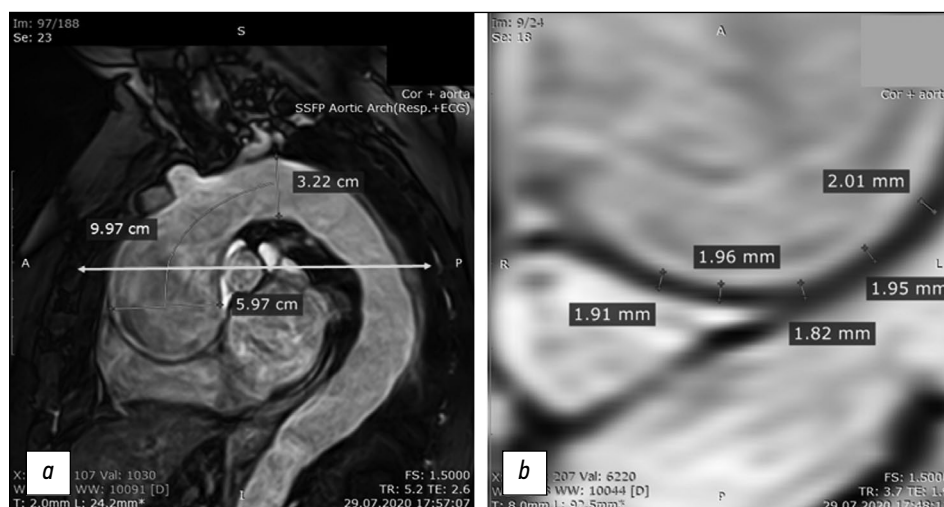


图 2. 患者B-k的心电图同步磁共振成像: **a** — 胸部主动脉的磁共振血管造影研究。图中显示了瓣膜水平和主动脉弓水平的横截面尺寸, 以及用于计算升主动脉收缩和舒张体积指标和收缩舒张体积的间距。两端带箭头的水平绿松石线标志着断层切片的水平; **b**, 升主动脉壁区的横向断层切片, 厚度测量用于随后计算Young模量值。测量值用绿色细线表示, 细线旁边有相应的数值。

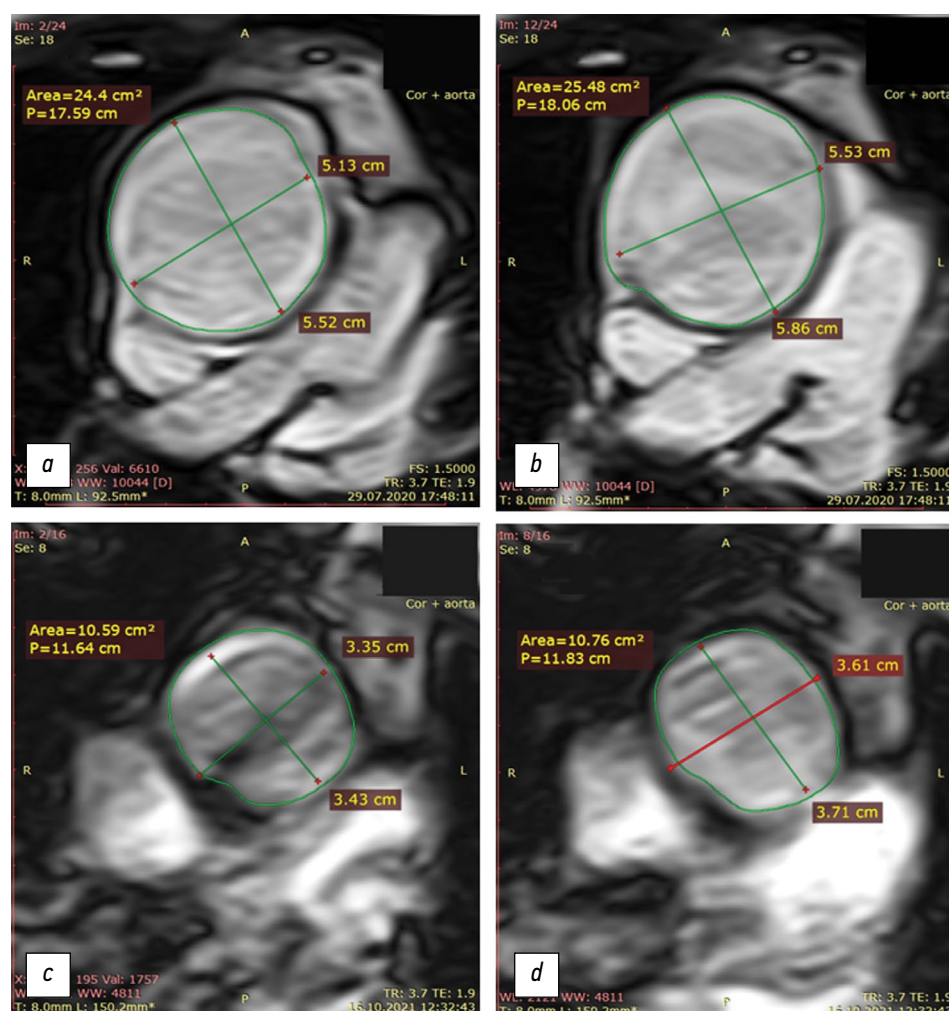


图 3. 舒张期和收缩期升主动脉横向尺寸和面积的测量结果：上排——入院初期（动脉瘤主动脉假体手术前）；下排——使用合成假体进行主动脉假体手术后；a、c——舒张期；b、d——收缩期。值得注意的是，手术后主动脉横截面明显缩小，而升主动脉管腔横截面的扩张性相对较小。

瓣，因为没有观察到明显的主动脉瓣功能不全，主动脉瓣在收缩期的有效血流动力学管腔面积超过2.0平方厘米。肱脑干的开口被植入相应的人工瓣膜，术后未发现右侧颈总动脉和锁骨下动脉盆腔的供血障碍。

术后期间没有手术并发症，包括炎症，也没有任何重要器官血液供应中断的迹象。静息时出现窦性心动过速（每分钟 82~92 次），低负荷时明显加重。术前肾小球滤过率为 57~65 毫升/（分钟×1.73 平方米），安装假体后仍保持在上述范围内。患者长期处于必须使用富氧混合物呼吸的状态，因为只有在这种情况下，她的情况才会被主观评估为接近正常。同时，根据仪器检查和临床生化检查，没有发现术后心肌梗塞的迹象。在没有使用膜氧浓缩器对呼吸混合物进行浓缩的情况下，pO₂ 指标为 81%~83%，而在使用膜氧浓缩器时，pO₂ 指标升至 93%~95%，（偶尔在休息时）甚至更高。在使用 ^{99m}Tc 标记的微球进行灌注单光子计算机断层扫描检查时，没有发现肺动脉及其分支有血栓或栓塞的迹象。

术后，患者的运动耐量与术前相比大幅下降，在术后住院期间和出院后运动耐量都很低。患者

只能使用电梯到她居住的一楼，而去门诊做核磁共振成像则需要使用制氧机。

术后 4 个月，再次进行了心脏磁共振成像和主动脉壁磁共振弹性成像检查，表 1 和表 2 列出了这两项检查的指标与基线的对比情况。

不过，假体植入后主动脉弹性指标明显改善，但仍比正常值高出许多倍[8]，但由于主动脉直径缩小了2厘米，升主动脉收缩容积膨胀指数 ΔV_{sys} 急剧下降。

术后主动脉壁（更确切地说，是升主动脉假体）的 Young 模量值降低，弹性增加。然而，总体而言，主动脉收缩期舒张量仍然减少了一半以上，降至约 5 毫升（见表 2），这肯定不足以保证足够的冠状动脉供血[8]。与此同时，假体的几何尺寸与文件中提供的护照尺寸一致。因此，即使在没有明显冠状动脉狭窄且升主动脉假体手术技术无可挑剔的情况下，但主动脉壁伸展性不足仍是限制假体植入后运动耐量的关键因素，也是导致左心室衰竭恶化的原因之一，尽管没有发生急性心肌梗死。

表 1. 主动脉假体植入前后患者 B-k的心脏磁共振成像指标

	左心室心肌质量, 克	LVEDV, 毫升	LVEF, %	LVM, 克	左心房体积, 毫升	肺动脉直径, 毫米
基线（入院时）	165	79. 4	83	165	55. 7	23
升主动脉人工修复术后	161	94. 2	73	161	69. 4	28

注。LVEDV - 左心室舒张末期容积；LVEF - 左心室射血分数；LVESV - 左心室收缩末期容积。表示心衰进展的指标——LVEDV 增加、LVEF 减少、左心房容积增加和肺动脉扩张 4 毫米——以粗体标出。

表 2. 主动脉假体植入前后患者 B-k 升主动脉壁的磁共振弹性测量指标

	升主动脉壁的Young 模量, Pa	升主动脉的收缩率		ΔV_{sys} , 毫升
		绝对	正常值 = 绝对值/ (BP 脉搏)	
基线（入院时）	0.58×10^6	0.0043	$0.0043/25 = 1.72 \times 10^{-4}$	13.28
升主动脉人工修复术后	0.260×10^6	0.0161	$0.0161/20 = 8.05 \times 10^{-4}$	4.95

讨论

为了研究主动脉僵硬，通常使用向主动脉外部传输高频机械波的方法，这种方法最初在动物实验中进行过测试 [15、16、17]，使用的是与核磁共振成像兼容的特殊振动波发生器，然后通过核磁共振成像对波沿主动脉壁的传播进行登记 [15、18、19]。这种方法借鉴了对实质器官弹性的研究，并得到广泛应用 [18、19、20]。

使用高频技术来评估主动脉的机械弹性可以在研究区域的整个解剖长度上计算该指标——沿着主动脉 [19]；但是，没有考虑计算一个或另一个层面的主动脉容积，主要是升主动脉层面的主动脉容积 [2]。最近，主动脉病变中考虑不同主动脉切面容积指数的必要性引起了详细关注 [15]。

从这个意义上说，在动脉（主动脉内）压力变化的影响下，使用心动周期期间主动脉直径本身的拉伸图更符合生理学 [12]，最重要的是，在升主动脉的情况下，可以直接估算出可用于舒张期“泵入”冠状动脉床的血容量 [12]。在我们的病例中，这种计算能力使我们能够明确地确定患者术后状况的原因，起初患者的状况是由于未发现的手术技术缺陷造成的，但最终并没有得到证实。

这个例子说明，主动脉连接对于确保通过冠状动脉通道向心肌提供充足的血液供应至关重要 [6, 12]，而在升主动脉假体置换的情况下，假体的弹性对这一供应起着至关重要的作用 [7]。主动脉壁的炎症损伤 [24] 和其僵硬 [25] 与脑循环障碍的频率和严重程度之间的相关性已经得到证实，因此这一点显得尤为重要。根据单中心研究 [12] 和多中心研究 [8, 26]，主动脉壁硬度增加已被证明是梗死患者冠状动脉疾病发生率增加的预测因素。在不需要进行心脏手术的心脏病患者中，药物治疗可以显著改善主动脉舒张性和弹性指标 [27]。

前面已经指出，升主动脉假体材料的进一步发展显然无可争议地指向使用具有保留弹性的合成和多组分材料，能够为心肌提供足够的舒张期血液供应和运动耐受性 [7]。制造商已经意识到了这一问题 [28, 29]，这在我们的病例中也很明显：植入假体后主动脉壁的机械刚度比术前动脉瘤主动脉降低了两倍多，截面积延展性提高了三倍多（见表 2）。然而，在假体直径相对于初始动脉瘤缩小的条件下，现代合成材料的特性不足以维持升主动脉的容积收缩扩张性——指数 ΔV_{sys} 。

从这个角度来看，生物主动脉移植 [29, 30] 在机械拉伸和弹性参数方面具有无可争议的优势，它是使用特殊技术由牛的大主干血管制成的，具有保留的胶原蛋白和弹性纤维结构；到目前为止，只有生物主动脉移植能够保持主动脉这种复杂血流动力学结构的管壁伸展性 [30]。核磁共振弹性测量法可根据需要对主动脉假体植入后的弹性特性进行监测，监测频率和观察时间可根据需要延长 [8]，并可作为评估膝关节升主动脉假体植入患者主动脉壁状态和机械伸缩性指标的一种方法，也可用于实验。

结论

从磁共振成像弹性测量的发展角度来看，使用这种方法获得升主动脉生物力学状态的定量评估结果是非常重要的临床信息。在对患有动脉粥样硬化和任何其他原因的主动脉疾病患者的研究中，以及在对动脉瘤不可逆性改变的升主动脉进行假体植入时，都应考虑到这一点。

心电图同步核磁共振弹性测量法可用于获取伸长指数和计算病变主动脉壁的 Young 模量，但这种方法目前尚无替代方案，因为基于 X 射线计算机断层扫描数据的弹性测量法在方法上与之相似，但却会对患者造成辐射。

我们有理由相信核磁共振弹性测量法的临床

应用范围将会扩大，因为主动脉收缩期扩张体积指标的计算可能会在主动脉生物力学和冠状动脉病理学的其他不同起源的疾病中具有临床参考价值。

ADDITIONAL INFORMATION

Funding source. This article was not supported by any external sources of funding.

Competing interests. The authors declare that they have no competing interests.

Authors' contribution. All authors made a substantial contribution to the conception of the work, acquisition, analysis, interpretation of data for the work, drafting and revising the work, final approval of the version to be published and agree to be accountable for all aspects of the work. A.V. Friedman — development of a research plan, data processing, clinical evaluation of MRI results, writing text, editing text, preparing illustrations for the article; T.A. Bergen — development of the work plan, clinical evaluation of MRI results,

text editing, final approval of the publication version of the article; D.A. Sirota — development of the work plan, clinical evaluation of MRI results and evaluation of cardiac surgery results, final approval of the publication version of the article; B.N. Kozlov — performing cardiac surgery and evaluating its results, editing the text; I.Y. Zhuravleva — participation in the development of the work concept, text editing, final approval of the publication version of the article; A.R. Tarkova — clinical evaluation of MRI results, writing the text, preparing illustrations for the article; W.Yu. Ussov — development of the work concept, data processing, clinical evaluation of MRI results, writing the text, preparation of illustrations for the article, final approval of the publication version of the article; A.M. Chernyavsky — development of the work concept, clinical evaluation of MRI results, text editing, final approval of the publication version of the article.

Consent for publication. Written consent was obtained from the patient for publication of relevant medical information and all of accompanying images within the manuscript in Digital Diagnostics Journal.

REFERENCES

1. Bokeriya LA, Malashenkov AI, Rusanov NI, et al. Surgical treatment of ascending aortic aneurysm with concomitant coronary artery disease. *Annaly khirurgii*. 2004(2):35–42. (In Russ).
2. Konstantinov BA, Belov YuV, Kuznechevskii FV. *Aneurysm of the ascending aorta and aortic arch*. Moscow: Astrel'; 2006. (In Russ).
3. Belov IuV, Isaev PM. Modern strategies of surgical treatment of aortic arch aneurysms. *Pirogov Russian Journal of Surgery (Khirurgiya. Zhurnal im. N.I. Pirogova)*. 2014(10):122–126.
4. Sirota DA, Zhulkov MO, Khvan DS. Predictors of Lethality, Remodeling, and Aorta-Related Events in Different Types of Proximal Aortic Dissection Surgery. *Modern Technologies in Medicine*. 2023;15(1):38–52. doi: 10.17691/stm2023.15.1.05
5. Belov IuV, Isaev RM. Risk stratification in cardiovascular surgery. *Pirogov Russian Journal of Surgery (Khirurgiya. Zhurnal im. N.I. Pirogova)*. 2014(7):78–81.
6. Karpman VL, Orel VR. Arterial system impedance and cardiac function. *Human Physiology*. 1985;(4):628–633. (In Russ).
7. Zhuravleva IYu, Lyashenko MM, Shadanov AA, Sirota DA, Chernyavskiy AM. Quo vadimus? Fundamental problems of developing hybrid prostheses of thoracic aorta. *Angiology and vascular surgery*. 2021;27(4):103–112. doi: 10.33529/ANGIO2021412
8. Ussov WYu, Ignatenko GA, Bergen TA, et al. Computational evaluation of mechano-elastic properties and of paramagnetic contrast enhancement of thoracic aortic wall in acute myocardial infarction and in non-coronarogenic myocardial damage, from the data of dynamic ECG-gated MRI (MR-elastometry). *Translational Medicine*. 2021;8(6):43–58. doi: 10.18705/2311-4495-2021-6-43-58
9. Ussov WYu, Igantenko GA, Maksimova AS, et al. The relationship of structural changes in the wall of the ascending aorta and myocardium according to chest contrast-enhanced MRI in myocardial infarction patients. *Regional blood circulation and microcirculation*. 2023;22(1):41–51. doi: 10.24884/1682-6655-2023-22-1-41-51
10. Purinya BA, Kas'yanov VA. *Biomechanics of human large blood vessels*. Riga: Zinatne; 1980. (In Russ).
11. Karo K, Pedli T, Shroter R, Sid U. *Circulatory mechanics*. Moscow: Mir; 1981. (In Russ).
12. Skripnik AYU, Fokin VA, Mironchuk RR, et al. Assessment of the elastic properties of the ascending aorta using electrocardiographic synchronized computed tomography angiography with advanced data processing. *Russian Journal of Cardiology*. 2019;24(12):48–54. doi: 10.15829/1560-4071-2019-12-48-54
13. Zel'dovich YaB. *Advanced Math for Beginners*. Moscow: Nauka; 1963. (In Russ).
14. Dudko VA, Karpov RS. *Atherosclerosis of heart and brain vessels*. Tomsk: STT; 2002. (In Russ).
15. Kolipaka A, Woodrum D, Araoz PA, Ehman RL. MR elastography of the in vivo abdominal aorta: a feasibility study for comparing aortic stiffness between hypertensives and normotensives. *J Magn Reson Imaging*. 2012;35(3):582–586. doi: 10.1002/jmri.22866
16. Damughatla AR, Raterman B, Sharkey-Toppen T, et al. Quantification of aortic stiffness using MR elastography and its comparison to MRI-based pulse wave velocity. *J Magn Reson Imaging*. 2015;41(1):44–51. doi: 10.1002/jmri.24506
17. Kolipaka A, Araoz PA, McGee KP, Manduca A, Ehman RL. Magnetic resonance elastography as a method for the assessment of effective myocardial stiffness throughout the cardiac cycle. *Magn Reson Med*. 2010;64(3):862–870. doi: 10.1002/mrm.22467
18. Dresner MA, Rose GH, Rossman PJ, et al. Magnetic resonance elastography of skeletal muscle. *J Magn Reson Imaging*. 2001;13(2):269–276. doi: 10.1002/1522-2586(200102)13:2<269::aid-jmri1039>3.0.co;2-1
19. Hrabak-Paar M, Kircher A, Al Sayari S, et al. Variability of MRI Aortic Stiffness Measurements in a Multicenter Clinical Trial Setting: Intraobserver, Interobserver, and Intracenter Variability of Pulse Wave Velocity and Aortic Strain Measurement. *Radiol Cardiothorac Imaging*. 2020;2(2):e190090. doi: 10.1148/ryct.2020190090
20. Woodrum DA, Romano AJ, Lerman A, et al. Vascular wall elasticity measurement by magnetic resonance imaging. *Magn Reson Med*. 2006;56(3):593–600. doi: 10.1002/mrm.20991

21. Kobelev E, Shadanov AA, Sirota DA, et al. Volumetric analysis on computed tomography Angiography in the management of thoracic aortic dissection in case of seven years follow-up period. *Medical Visualization*. 2022;26(3):46–56. doi: 10.24835/1607-0763-1060
22. Kobelev E, Bergen TA, Tarkova AR, et al. A New Look at Structural Changes in the Aortic Root in Aortic Valve Stenosis. *Modern Technologies in Medicine*. 2022;14(2):51–58. doi: 10.17691/stm2022.14.2.05
23. Nepomnyashchikh LM. *Morphogenesis of the most important common pathologic processes in the heart*. Novosibirsk: Nauka; 1991. (In Russ).
24. Ussov WYu, Belichenko OI, Maksimova AS, et al. Magnetic resonance imaging of the aortic wall with paramagnetic contrast enhancement in assessing the severity of its atherosclerotic lesion and predicting occlusive thrombotic arterial complications. *Terapevt*. 2017;128(9):55–62. (In Russ).
25. Badji A, Sabra D, Bherer L, et al. Arterial stiffness and brain integrity: A review of MRI findings. *Ageing Res Rev*. 2019;53. doi: 10.1016/j.arr.2019.05.001
26. Lechner I, Reindl M, Tiller C, et al. Determinants and prognostic relevance of aortic stiffness in patients with recent ST-elevation myocardial infarction. *Int J Cardiovasc Imaging*. 2022;38(1):237–247. doi: 10.1007/s10554-021-02383-0
27. Pribylov SA, Yakovleva MV, Pribylov VS, et al. Arterial stiffness in patients with acute coronary syndrome without persistent ST segment elevation combined with chronic kidney disease and arterial hypertension and its correction with antihypertensive therapy. *Humans and their health*. 2022;25(1):19–27. doi: 10.21626/vestnik/2022-1/03
28. Soynov IA, Zhuravleva IY, Kulyabin YY, et al. Tissue Engineering in Cardiovascular Surgery: Evolution and Contemporary Condition of the Problem. *Journal of Experimental and Clinical Surgery*. 2019;12(1):71–80. doi: 10.18499/2070-478X-2019-12-1-71-80
29. Zhuravleva IYu, Timchenko TP, Vladimirov SV, et al. Ab ovo: Factors Affecting the Radial Stiffness of Thoracic Aorta Stent-Grafts. *Modern Technologies in Medicine*. 2021;13(1):17–26. doi: 10.17691/stm2021.13.1.02
30. Vasilyeva MB, Kuznetsova EV, Rusakova YaL, et al. Mechanical properties of native and decellularized aortic wall after long-term storage in biocide solutions. *Russian Journal of Transplantology and Artificial Organs*. 2021;23(4):86–94. doi: 10.15825/1995-1191-2021-4-86-94

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бокерия Л.А., Малашенков А.И., Русанов Н.И., и др. Хирургическое лечение аневризмы восходящей аорты с сопутствующим поражением коронарных артерий // *Анналы хирургии*. 2004. № 2. С. 35–42.
2. Константинов Б.А., Белов Ю.В., Кузнецовский Ф.В. Аневризма восходящего отдела и дуги аорты. Москва : Астрель, 2006.
3. Белов Ю.В., Исаев Р.М. Современные стратегии оперативного лечения аневризм дуги аорты // *Хирургия. Журнал им. Н.И. Пирогова*. 2014. № 10. С. 122–126.
4. Сирота Д.А., Жульков М.О., Хван Д.С., и др. Предикторы летальности, ремоделирования и возникновения аортосвязанных событий при различных вариантах хирургии проксимального расслоения аорты // *Современные технологии в медицине*. 2023. Т. 15, № 1. С. 38–52. doi: 10.17691/stm2023.15.1.05
5. Белов Ю.В., Исаев Р.М. Стратификация риска в сердечно-сосудистой хирургии // *Хирургия. Журнал им. Н.И. Пирогова*. 2014. № 7. С. 78–81.
6. Карпман В.Л., Орёл В.Р. Импеданс артериальной системы и сердечная деятельность // *Физиология человека*. 1985. № 4. С. 628–633.
7. Журавлева И.Ю., Ляшенко М.М., Шаданов А.А., Сирота Д.А., Чернявский А.М. Quo vadimus? Фундаментальные проблемы разработки гибридных протезов грудной аорты // *Ангиология и сосудистая хирургия*. 2021. Т. 27, № 4. С. 103–112. doi: 10.33529/ANGIO2021412
8. Усов В.Ю., Игнатенко Г.А., Берген Т.А., и др. Вычислительная оценка механоэластических свойств и парамагнитного контрастного усиления стенки восходящей аорты при остром инфаркте и некоронарных повреждениях миокарда, по данным динамической ЭКГ-синхронизированной МР-томографии (МР-эластометрии) // *Трансляционная медицина*. 2021. Т. 8, № 6. С. 43–58. doi: 10.18705/2311-4495-2021-6-43-58
9. Усов В.Ю., Игнатенко Г.А., Максимова А.С., и др. Взаимосвязи структурных изменений стенки восходящей аорты и миокарда, по данным МР-томографии с контрастным усилением у пациентов после инфаркта миокарда // *Регионарное кровообращение и микроциркуляция*. 2023. Т. 22, № 1. С. 41–51. doi: 10.24884/1682-6655-2023-22-1-41-51
10. Пурина Б.А., Касьянов В.А. Биомеханика крупных кровеносных сосудов человека. Рига : Зинатне, 1980.
11. Каро К., Педли Т., Шротер Р., Сид У. Механика кровообращения. Москва : Мир, 1981.
12. Скрипник А.Ю., Фокин В.А., Мирончук Р.Р., и др. Оценка эластических характеристик стенки восходящего отдела аорты при помощи компьютерно-томографической ангиографии в режиме электрокардиографической синхронизации с расширенной постпроцессорной обработкой данных // *Российский кардиологический журнал*. 2019. Т. 24, № 12. С. 48–54. doi: 10.15829/1560-4071-2019-12-48-54
13. Зельдович Я.Б. Высшая математика для начинающих. Москва : Наука, 1963.
14. Дудко В.А., Карпов П.С. Атеросклероз сосудов сердца и головного мозга. Томск : STT, 2002.
15. Kolipaka A., Woodrum D., Araoz P.A., Ehman R.L. MR elastography of the in vivo abdominal aorta: a feasibility study for comparing aortic stiffness between hypertensives and normotensives // *J Magn Reson Imaging*. 2012. Vol. 35, N 3. P. 582–586. doi: 10.1002/jmri.22866
16. Damughatla A.R., Raterman B., Sharkey-Toppen T., et al. Quantification of aortic stiffness using MR elastography and its comparison to MRI-based pulse wave velocity // *J Magn Reson Imaging*. 2015. Vol. 41, N 1. P. 44–51. doi: 10.1002/jmri.24506
17. Kolipaka A., Araoz P.A., McGee K.P., Manduca A., Ehman R.L. Magnetic resonance elastography as a method for the assessment of effective myocardial stiffness throughout the cardiac cycle // *Magn Reson Med*. 2010. Vol. 64, N 3. P. 862–870. doi: 10.1002/mrm.22467
18. Dresner M.A., Rose G.H., Rossman P.J., et al. Magnetic resonance elastography of skeletal muscle // *J Magn*

- Reson Imaging. 2001. Vol. 13, N 2. P. 269–276. doi: 10.1002/1522-2586(200102)13:2<269::aid-jmri1039>3.0.co;2-1
19. Hrabak-Paar M., Kircher A., Al Sayari S., et al. Variability of MRI Aortic Stiffness Measurements in a Multicenter Clinical Trial Setting: Intraobserver, Interobserver, and Intracenter Variability of Pulse Wave Velocity and Aortic Strain Measurement // Radiol Cardiothorac Imaging. 2020. Vol. 2, N 2. P. e190090. doi: 10.1148/ryct.2020190090
20. Woodrum D.A., Romano A.J., Lerman A., et al. Vascular wall elasticity measurement by magnetic resonance imaging // Magn Reson Med. 2006. Vol. 56, N 3. P. 593–600. doi: 10.1002/mrm.20991
21. Кобелев Е., Шаданов А.А., Сирота Д.А., и др. Объёмный анализ компьютерно-томографической ангиографии при лечении расслоения грудной аорты на примере с семилетним периодом наблюдения // Медицинская визуализация. 2022. Т. 26, № 3. С. 46–56. doi: 10.24835/1607-0763-1060
22. Кобелев Е., Берген Т.А., Таркова А.Р., и др. Новый взгляд на структурные изменения корня аорты при стенозе аортального клапана // Современные технологии в медицине. 2022. Т. 14, № 2. С. 51–58. doi: 10.17691/stm2022.14.2.05
23. Непомнящих Л.М. Морфогенез важнейших общепатологических процессов в сердце. Новосибирск : Наука, 1991.
24. Усов В.Ю., Беличенко О.И., Максимова А.С., и др. Магнитно-резонансная томография аортальной стенки с парамагнитным контрастным усилением в оценке тяжести её атеросклеротического поражения и прогнозировании окклюзионно-тромботических артериальных осложнений // Терапевт. 2017. Т. 128, № 9. С. 55–62.
25. Badji A., Sabra D., Bherer L., et al. Arterial stiffness and brain integrity: A review of MRI findings // Ageing Res Rev. 2019. Vol. 53. doi: 10.1016/j.arr.2019.05.001
26. Lechner I., Reindl M., Tiller C., et al. Determinants and prognostic relevance of aortic stiffness in patients with recent ST-elevation myocardial infarction // Int J Cardiovasc Imaging. 2022. Vol. 38, N 1. P. 237–247. doi: 10.1007/s10554-021-02383-0
27. Прибылов С.А., Яковлева М.В., Прибылов В.С., и др. Артериальная ригидность у пациентов с острым коронарным синдромом без стойкого подъёма сегмента ST в сочетании с хронической болезнью почек и артериальной гипертензией и её коррекция на фоне антигипертензивной терапии // Человек и его здоровье. 2022. Т. 25, № 1. С. 19–27. doi: 10.21626/vestnik/2022-1/03
28. Сойнов И.А., Журавлева И.Ю., Кулябин Ю.Ю., и др. Тканевая инженерия в сердечно-сосудистой хирургии: эволюция и современное состояние проблемы // Вестник экспериментальной и клинической хирургии. 2019. Т. 12, № 1. С. 71–80. doi: 10.18499/2070-478X-2019-12-1-71-80
29. Журавлева И.Ю., Тимченко Т.П., Владимиров С.В., и др. Ab ovo: факторы, влияющие на радиальную жёсткость стент-графтов грудного отдела аорты // Современные технологии в медицине. 2021. Т. 13, № 1. С. 17–26. doi: 10.17691/stm2021.13.1.02
30. Васильева М.Б., Кузнецова Е.В., Русакова Я.Л., и др. Механические свойства нативной и децеллюляризованной стенки аорты после длительного хранения в биоцидных растворах // Вестник трансплантологии и искусственных органов. 2021. Т. 23, № 4. С. 86–94. doi: 10.15825/1995-1191-2021-4-86-94

AUTHORS' INFO

Wladimir Yu. Ussov, MD, Dr. Sci. (Medicine), Professor;
address: 15 Rechkunovskaya Str., Novosibirsk, 630090, Russia;
ORCID: 0000-0001-7978-5514;
eLibrary SPIN: 1299-2074;
e-mail: ussov1962@yandex.ru

Alexander V. Friedman, MD;
ORCID: 0000-0002-2300-2418;
eLibrary SPIN: 9508-8975;
e-mail: fridman_a@meshalkin.ru

Tatiana A. Bergen, MD, Dr. Sci. (Medicine);
ORCID: 0000-0003-1530-1327;
eLibrary SPIN: 5467-7347;
e-mail: tbergen@yandex.ru

Dmitry A. Sirota, MD, Cand. Sci. (Medicine);
ORCID: 0000-0002-9940-3541;
eLibrary SPIN: 4706-7549;
e-mail: d_sirota@meshalkin.ru

Boris N. Kozlov, MD, Dr. Sci. (Medicine);
ORCID: 0000-0002-0217-7737;
eLibrary SPIN: 9265-9432;
e-mail: kbn@cardio-tomsk.ru

Irina Yu. Zhuravleva, MD, Dr. Sci. (Medicine), Professor;
ORCID: 0000-0002-1935-4170;
eLibrary SPIN: 7322-1480;
e-mail: zhuravleva_i@meshalkin.ru

ОБ АВТОРАХ

Усов Владимир Юрьевич, д-р мед. наук, профессор;
адрес: Россия, Новосибирск, 630090, ул. Речкуновская, 15;
ORCID: 0000-0001-7978-5514;
eLibrary SPIN: 1299-2074;
e-mail: ussov1962@yandex.ru

Фридман Александр Владимирович;
ORCID: 0000-0002-2300-2418;
eLibrary SPIN: 9508-8975;
e-mail: fridman_a@meshalkin.ru

Берген Татьяна Андреевна, д-р мед. наук;
ORCID: 0000-0003-1530-1327;
eLibrary SPIN: 5467-7347;
e-mail: tbergen@yandex.ru

Сирота Дмитрий Андреевич, канд. мед. наук;
ORCID: 0000-0002-9940-3541;
eLibrary SPIN: 4706-7549;
e-mail: d_sirota@meshalkin.ru

Козлов Борис Николаевич, д-р мед. наук;
ORCID: 0000-0002-0217-7737;
eLibrary SPIN: 9265-9432;
e-mail: kbn@cardio-tomsk.ru

Журавлева Ирина Юрьевна, д-р мед. наук, профессор;
ORCID: 0000-0002-1935-4170;
eLibrary SPIN: 7322-1480;
e-mail: zhuravleva_i@meshalkin.ru

* Corresponding author / Автор, ответственный за переписку

Alexandra R. Tarkova, MD, Cand. Sci. (Medicine);
ORCID: 0000-0002-4291-6047;
eLibrary SPIN: 8547-4380;
e-mail: a_tarkova@meshalkin.ru

Alexander M. Chernyavskiy, MD, Dr. Sci. (Medicine), Professor,
Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences;
ORCID: 0000-0001-9818-8678;
eLibrary SPIN: 5286-6950;
e-mail: a_cherniavsky@meshalkin.ru

Таркова Александра Романовна, канд. мед. наук;
ORCID: 0000-0002-4291-6047;
eLibrary SPIN: 8547-4380;
e-mail: a_tarkova@meshalkin.ru

Чернявский Александр Михайлович, д-р мед. наук, профес-
сор, член-корреспондент РАН;
ORCID: 0000-0001-9818-8678;
eLibrary SPIN: 5286-6950;
e-mail: a_cherniavsky@meshalkin.ru