

Н. А. Юзефович, Т. М. Студеникина, И. А. Мельников

Белорусский государственный медицинский университет, Минск, Республика Беларусь

ОСОБЕННОСТИ ВОЗРАСТНЫХ СТРУКТУРНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ ЭЛАСТИЧЕСКИХ МЕМБРАН СРЕДНЕЙ ОБОЛОЧКИ АОРТЫ

Аннотация. Проведен морфометрический анализ эластических мембран средней оболочки стенки брюшного отдела аорты человека. Изучены такие параметры, как среднее количество мембран, толщина и ширина промежутков между ними, приведены гистограммы их распределения по толщине эластических мембран и ширине промежутков между соседними мембранами, выявлены основные закономерности и характер изменения этих показателей у мужчин и женщин в возрасте с 1 года до 70 лет. Установлены основные этапы изменения структурных характеристик эластических мембран. Определена длительность периода завершения процессов формирования и роста эластических структур, периода стабилизации и периода старения эластических компонентов сосудистой стенки. Установлены отличия в длительности этих периодов у мужчин и женщин. Применение морфометрических методов позволило с большей точностью охарактеризовать структурные изменения эластических мембран средней оболочки брюшного отдела аорты, выявить сроки появления этих изменений, определить отличия по срокам у мужчин и женщин.

Ключевые слова: эластические мембраны, аорта, морфометрический анализ

Для цитирования: Юзефович, Н. А. Особенности возрастных структурных изменений эластических мембран средней оболочки аорты / Н. А. Юзефович, Т. М. Студеникина, И. А. Мельников // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. мед. навук. – 2017. – № 3. – С. 45–55.

N. A. Yuzefovich, T. M. Studenikina, I. A. Melnikov

Belarusian State Medical University, Minsk, Republic of Belarus

AGE FEATURES OF THE STRUCTURAL CHANGES IN ELASTIC MEMBRANES OF THE ABDOMINAL AORTA

Abstract. The morphometric analysis of elastic membranes of the human abdominal aorta was made; such parameters as average values of the number of membranes, the thickness and width of intervals between the adjacent membranes in different age groups of males and females were studied. The histograms of the distribution of the thickness of the elastic membranes and the width of intervals between the adjacent membranes in different-age groups of males and females were analyzed. The main regularities and the nature of changes in the indicators of the number, the thickness of membranes and the width of intervals between the adjacent membranes in norm in patients at the age from 1 to 70 years were studied. The main stages of change in the structural characteristics of the elastic membranes were established. The time of completion of the processes of formation and growth of elastic membranes, the period of stabilization, and the period of aging of the elastic components of a vessel wall were determined. Differences in the duration of these periods for males and females were revealed. The morphometric methods allow one to establish structural changes in the elastic membranes of the human abdominal aorta with a higher accuracy, to reveal the time of appearance of these changes, to determine differences in the time of these periods for males and females.

Keywords: elastic membranes, aorta, morphometric analysis

For citation: Yuzefovich N. A., Studenikina T. M., Melnikov I. A. Age features of the structural changes in elastic membranes of the abdominal aorta. *Vesti Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seriya meditsinskikh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Medical series*, 2017, no. 3, pp. 45–55 (in Russian).

Введение. Средняя оболочка аорты является главной рабочей структурой сосудистой стенки. Ее механические свойства обусловлены в значительной мере особенностями строения эластических мембран, которые определяют морфологическую и функциональную целостность сосудистой стенки [1–4]. Эволютивные и инволютивные изменения эластического каркаса аорты могут не только определять ход физиологического старения сосудистой стенки, но и участвовать в развитии дегенеративных патологических процессов [5–8]. Причины этих изменений остаются во многом не ясными. Встречающиеся в литературе данные о количестве мембран, их толщине и ширине промежутков между ними в средней оболочке брюшного отдела аорты человека

немногочисленны, не систематизированы, не охватывают все возрастные периоды постнатального онтогенеза. Также нет данных по системному изучению этих показателей у мужчин и женщин разных возрастных групп.

Цель исследования – провести морфометрический анализ эластических мембран средней оболочки аорты для выявления закономерностей их изменения с возрастом у мужчин и женщин.

Материалы и методика исследования. Работа выполнена на кафедре гистологии, цитологии и эмбриологии УО «Белорусский государственный медицинский университет». Материалом для исследования послужили гистологические препараты аутопсийного материала стенки брюшного отдела аорты 72 человек мужского и женского пола (30 женщин и 42 мужчин) в возрасте от 1 года до 70 лет, без системных заболеваний соединительной ткани, без установленной в анамнезе патологии сердечно-сосудистой системы, умерших от причин, не связанных с патологией аорты.

Материал фиксировали в 10 %-ном растворе нейтрального формалина в течение суток и заливали в парафин обычным способом. Готовые срезы толщиной 3–4 мкм окрашивали по Вейгерту.

Поскольку, по литературным данным [1, 2], в возрастном периоде от 40 до 60 лет морфометрические параметры стенки аорты характеризуются большим разбросом, данный возрастной период дополнительно был разбит нами на временные отрезки по 5 лет (табл. 1).

Т а б л и ц а 1. **Количественный состав исследуемого материала**

Table 1. **Quantitative composition of the studied material**

Возраст, лет	Пол		К-во случаев в группе	К-во сканирующих линий на 1 случай	К-во сканирующих линий в возрастной группе
	Мужчины	Женщины			
1–10	3	9	12	50	600
11–20	5	3	8	50	400
21–30	7	3	10	50	500
31–40	10	3	13	50	650
41–45	3	2	5	50	250
46–50	3	3	6	50	300
51–55	2	2	4	50	200
56–60	3	2	5	50	250
61–70	6	3	9	50	450
Всего	42	30	72	–	3600

С помощью программы ImageJ определяли количество эластических мембран, их толщину и ширину промежутков между соседними мембранами. Для этого был разработан алгоритм для полуавтоматического анализа изображения поперечного среза стенки аорты, реализованный в виде макроса или плагина (plugin) для программы ImageJ.

В каждом случае исследование проводили по 50 сканирующим линиям. Учитывая, что распределение количественных параметров в большинстве выборок отличалось от нормального, для описательной статистики и выявления достоверности различий использовали непараметрические методы статистической обработки данных [6]. Полученные результаты обрабатывали в программе STATISTICA 10 и представляли в виде медианы (Me) и интерквартильного размаха между 25-м и 75-м перцентилями. Достоверность различий оценивали по коэффициенту Манна–Уитни. Для наглядного отображения распределения выборки данные представляли в виде гистограмм распределения мембран по толщине и межмембранных промежутков по ширине, достоверность различий между ними оценивали по коэффициенту Колмогорова–Смирнова. Поскольку количество мембран – это счетный, а не мерный признак, его динамика отображена нами на точечном графике.

Результаты и их обсуждение. На светомикроскопическом уровне эластические мембраны средней оболочки аорты в возрасте до 30 лет хорошо выражены, толстые, имеют извилистый ход вдоль всей стенки аорты, прослеживаются на значительном протяжении, количество разрывов в мембранах практически не определяется, соседние мембраны расположены друг от друга на небольшом расстоянии (рис. 1, а).

В возрасте от 30 до 50 лет мембраны также хорошо выражены, сохраняется их толщина, хотя извилистость может уменьшаться на значительном протяжении. Иногда наблюдаются участки небольшой длины с видимым расслоением эластических мембран и увеличение ширины межмембранных промежутков. Участки с хорошо выраженными толстыми извилистыми эластическими мембранами и небольшими промежутками между соседними мембранами чередуются с участками, где мембраны тонкие, имеют прямой ход, содержат значительное количество разрывов, из-за которых образуются широкие межмембранные промежутки (рис. 1, *b*).

В возрасте от 51 до 70 лет эластические мембраны тонкие, не имеют извилистости, выглядят практически гладкими. Они не прослеживаются на большом протяжении, имеют много разрывов, промежутки между соседними мембранами увеличены (рис. 1, *c*).

Если в крайних возрастных группах различия в качественных характеристиках мембран и межмембранных промежутков при световой микроскопии определяются довольно легко, то средний возрастной период характеризуется большим разнообразием этих характеристик. На одном поперечном срезе аорты в средней оболочке выявляются как зоны с более толстыми эластическими мембранами, расположенными близко друг к другу, так и участки, в которых мембраны тонкие, прерывистые, а расстояния между соседними мембранами увеличены. Такое качественное разнообразие признаков не всегда позволяет составить точное представление о характере, степени изменений эластического каркаса, возрасте, в котором эти изменения становятся закономерными. Поэтому для получения объективных данных, характеризующих возрастные изменения, нами применялись морфометрические методы.

Анализ морфометрических показателей выявил, что у человека от рождения до 30 лет происходит увеличение количества эластических мембран в стенке аорты, а с 30 до 45 лет интенсивность этого процесса уменьшается (табл. 2).

Таблица 2. Среднегрупповые показатели количества мембран у мужчин и женщин, Ме (25%–75%)

Table 2. Middle-group indices of the number of membranes of males and females, Me (25%–75%)

Возраст, лет	Среднее к-во мембран	
	Мужчины	Женщины
1–10	49,18 (44,08–55,02)	41,66 (34,30–47,84)
11–20	59,18 (54,84–60,60)	53,46 (52,18–57,38)
21–30	67,16 (65,36–77,60)	61,38 (58,46–69,38)
31–40	71,73 (56,06–77,74)	64,00 (60,82–71,20)
41–45	71,0 (67,22–80,08)	66,11 (56,56–75,66)
46–50	58,5 (47,86–76,44)	61,14 (59,98–63,2)
51–55	55,98 (48,94–63,02)	62,07 (61,9–62,24)
56–60	63,36 (51,22–74,62)	68,41 (68,42–72,0)
61–70	51,14 (46,68–67,28)	44,34 (42,76–56,06)

У мужчин после 45 лет отмечается тенденция к снижению этого показателя с небольшой стабилизацией его значения в возрасте 56–60 лет. У женщин и после 45 лет этот показатель остается стабильным, а его снижение отмечается только после 60 лет. На протяжении всех возрастных периодов у мужчин наблюдается большой размах значений количества мембран, в то время как у женщин этот показатель изменяется в небольшом диапазоне и имеет более стабильные значе-

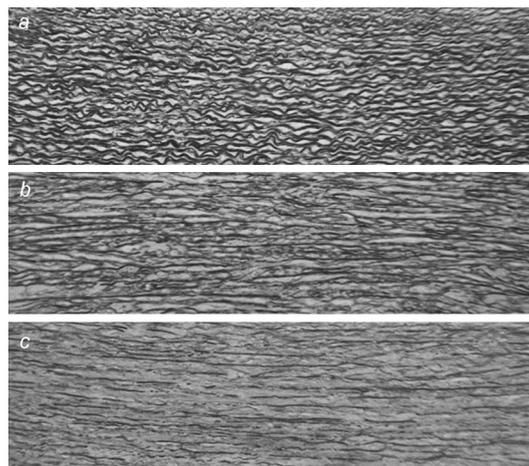


Рис. 1. Фрагмент средней оболочки аорты у пациентов 9 (*a*), 48 (*b*) и 64 (*c*) лет. Окраска по Вейгерту, $\times 10$

Fig. 1. Fragment of the human abdominal aorta: *a* – 9 years, *b* – 48 years, *c* – 64 years. Weygert coloring, $\times 10$

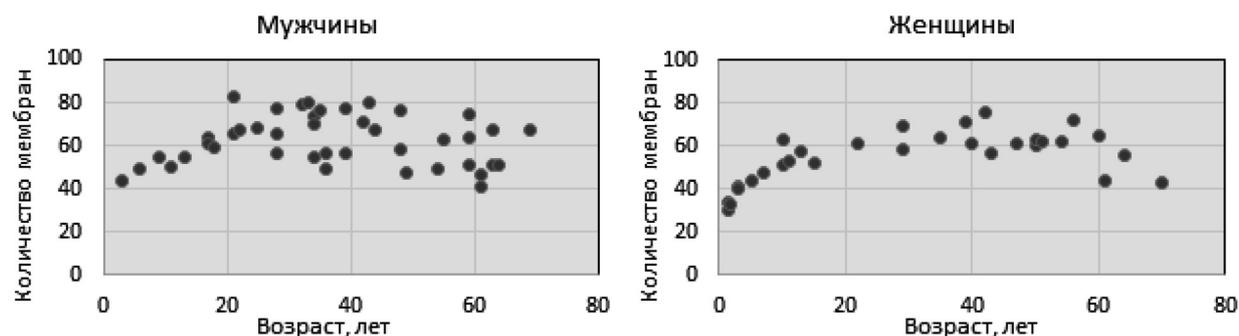


Рис. 2. Средние значения количества мембран в средней оболочке аорты у мужчин и женщин

Fig. 2. Average value of the number of membranes in the abdominal aorta of males and females

ния (рис. 2). Вместе с тем никаких достоверных различий в количестве эластических мембран между соседними возрастными группами по критерию Манна–Уитни ни в мужской, ни в женской группе не отмечается.

Изменение другого показателя – толщины эластических мембран – носит волнообразный характер (табл. 3). Начиная с периода рождения толщина мембран имеет тенденцию к уменьшению, что, вероятно, связано с процессами становления эластических структур сосудистой стенки и увеличением диаметра аорты. У мужчин этот период длится до 30 лет, после чего отмечается период стабилизации и небольшого роста толщины мембран. После 45 лет происходит постепенное уменьшение их толщины. У женщин толщина мембран уменьшается к 20 годам, после чего отмечается увеличение их толщины и сохранение стабильности этого показателя вплоть до 55 лет. Максимальный разброс значений толщины мембран у мужчин приходится на первые годы жизни, у женщин этот показатель имеет более широкий диапазон значений в возрасте 40–50 лет.

Таблица 3. Среднегрупповые показатели толщины мембран у мужчин и женщин, мкм (Me (25%–75%))

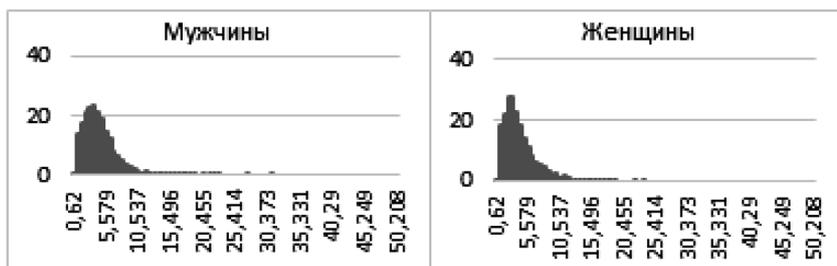
Table 3. Middle-group indices of the thickness of the membranes of males and females, mcm (Me (25%–75%))

Возраст, лет	Средняя толщина мембран	
	Мужчины	Женщины
1–10	3,712 (3,217–4,412)	3,681 (3,663–4,075)
11–20	3,562 (3,397–3,757)	2,817 (2,738–2,981)
21–30	3,485 (3,419–3,507)	3,320 (3,097–3,586)
31–40	3,678 (3,458–3,784)	3,647 (3,615–3,649)
41–45	3,672 (3,451–3,995)	3,346 (3,039–3,653)
46–50	3,253 (3,118–3,537)	3,503 (2,795–4,150)
51–55	3,113 (2,807–3,418)	3,923 (3,896–3,950)
56–60	2,949 (2,692–3,284)	3,459 (3,177–3,741)
61–70	2,744 (2,457–3,032)	2,985 (2,765–3,086)

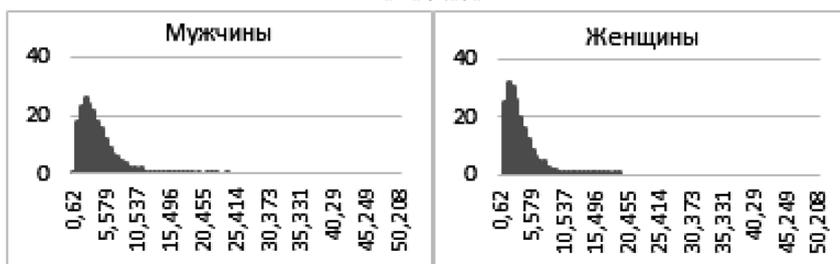
Как видно из анализа медиан, достоверных различий между соседними возрастными группами не выявляется. При анализе гистограмм распределения мембран по толщине получены дополнительные сведения (рис. 3).

У мужчин в возрастных группах от 1 до 45 лет гистограммы не имели достоверных различий (табл. 4). Начиная с возрастного периода 45–50 лет в мужской группе наблюдались достоверное сужение гистограммы и рост ее вершины, прогрессирующие в более старших возрастных группах, что свидетельствует об истончении эластических мембран у мужчин после 45 лет. Эта тенденция сохранялась до окончания срока наблюдения.

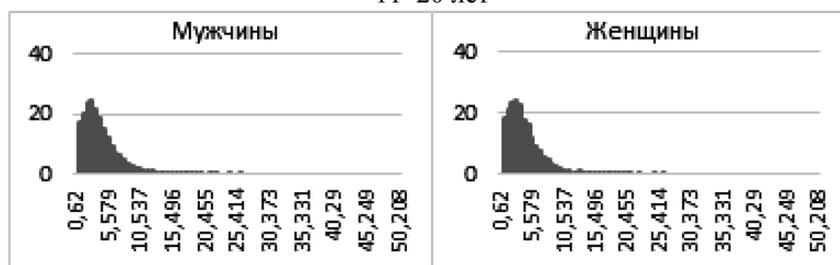
У женщин отмечались достоверные колебания этого признака в молодом возрасте (табл. 4): истончение в группе 11–20 лет по сравнению с группой 1–10 лет и вновь утолщение в возрасте после 21 года, что, очевидно, связано со становлением гормонального фона и его влиянием



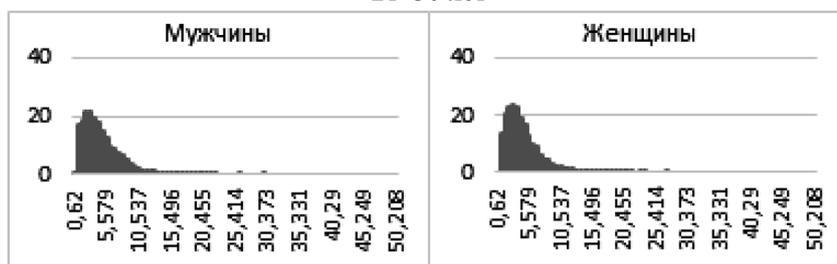
1–10 лет



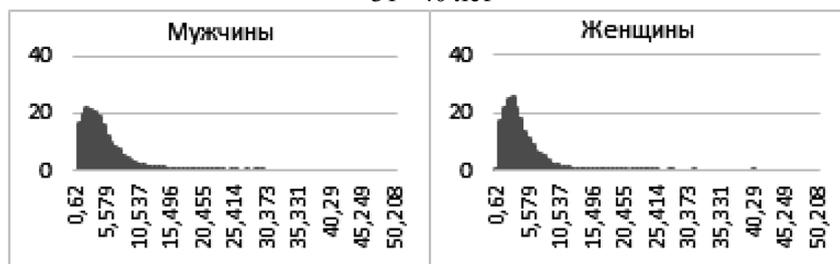
11–20 лет



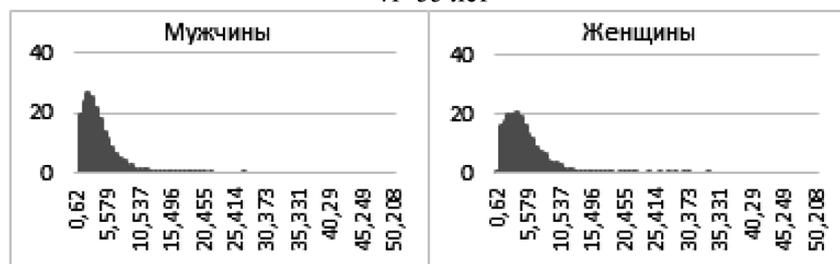
21–30 лет



31–40 лет



41–55 лет



46–50 лет

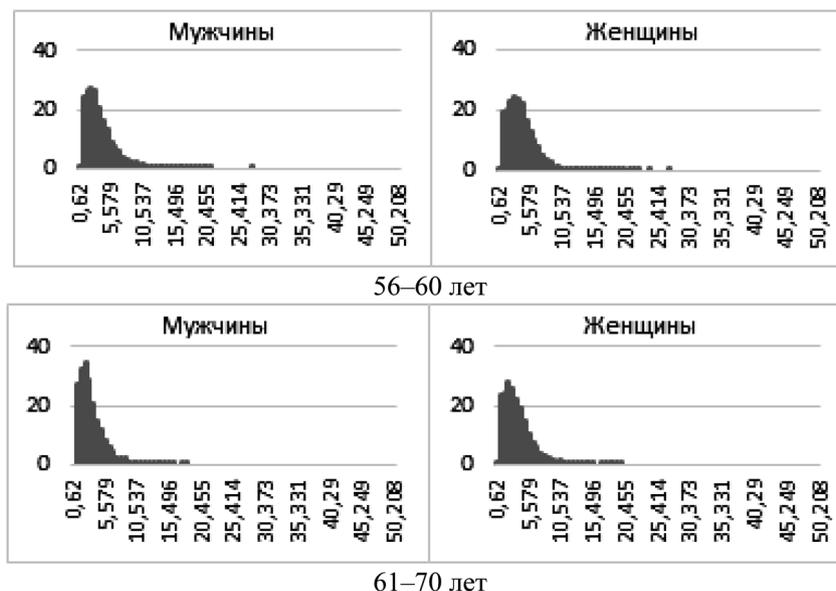


Рис. 3. Гистограммы распределения эластических мембран по толщине. По оси абсцисс – значения толщины, мкм; по оси ординат – частота встречаемости признака, %

Fig. 3. Histograms of the thickness distribution of elastic membranes. The axis of abscissa is the thickness, mcm; the axis of ordinates is the frequency of occurrence of a sign, %

Таблица 4. Достоверность различий гистограмм распределения эластических мембран по толщине
Table 4. Reliability of the differences in the histograms of the thickness distribution of elastic membranes

Сравниваемые возрастные группы, лет		Значения p для коэффициента Колмогорова–Смирнова	
		Мужчины	Женщины
1–10	11–20	>0,05	0,003
11–20	21–30	>0,05	0,0035
21–30	31–40	>0,05	>0,05
31–40	41–45	>0,05	>0,05
41–45	46–50	0,043	>0,05
46–50	51–55	0,002	>0,05
51–55	56–60	0,0017	0,04
56–60	60–70	0,007	0,0069

на стенку аорты в пубертатном периоде. Начиная с 21 года и до 55 лет значения этого показателя стабильны. Лишь после 55 лет отмечались достоверное сужение гистограммы и рост ее вершины, что говорит об истончении мембран до окончания периода наблюдения. Таким образом, анализ толщины эластических мембран показал, что у мужчин процессы возрастных изменений наступают раньше, чем у женщин.

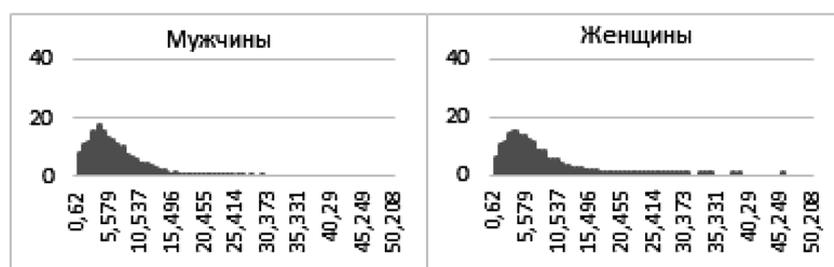
Анализ ширины межмембранных промежутков показал, что динамика данного параметра (табл. 5) носит колебательный характер, тем не менее с рождения до 60 лет тенденция к увеличению межмембранных промежутков отмечается и у мужчин, и у женщин. После 60 лет наблюдается их уменьшение. Более широкий размах значений этого показателя отмечается у женщин в возрасте 51–55 лет, у мужчин – в возрасте 46–50 лет. Но достоверных различий в ширине межмембранных промежутков между соседними возрастными группами по критерию Манна–Уитни ни в мужской, ни в женской группе не выявлено.

При анализе гистограмм распределения межмембранных промежутков по ширине (рис. 4) у мужчин до 50 лет, у женщин до 55 лет отмечаются достоверные различия между отдельными возрастными группами (табл. 6). Этот показатель, очевидно, является наиболее нестабильным по той причине, что отражает активность синтеза экстрацеллюлярного матрикса и подвержен максимальным индивидуальным колебаниям.

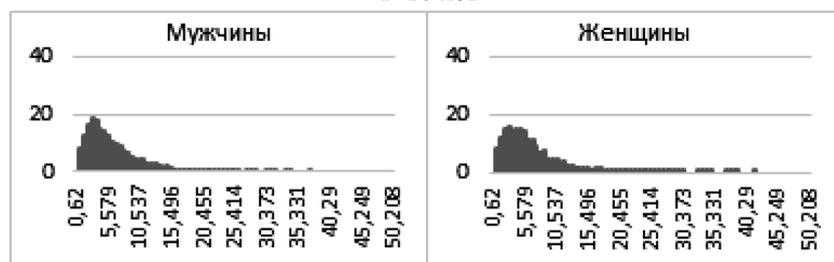
Таблица 5. Среднегрупповые показатели ширины межмембранных промежутков у мужчин и женщин, мкм (Me (25%–75%))

Table 5. Middle-group indices of the thickness of the intervals between adjacent membranes of males and females, mcm (Me (25%–75%))

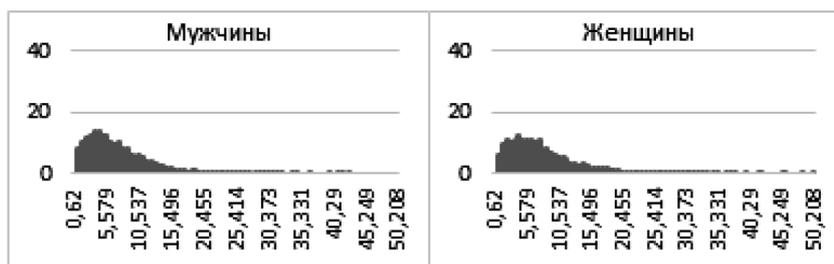
Возраст, лет	Средняя ширина межмембранных промежутков	
	Мужчины	Женщины
1–10	4,731 (4,684–5,966)	5,626 (5,217–5,828)
11–20	5,975 (5,844–6,307)	5,634 (4,846–5,636)
21–30	5,580 (4,585–6,586)	6,847 (5,884–7,339)
31–40	6,473 (6,097–6,863)	6,844 (5,909–7,349)
41–45	6,364 (5,510–6,840)	6,643 (6,554–6,731)
46–50	6,991 (6,009–8,153)	7,130 (6,929–7,131)
51–55	8,028 (7,703–8,352)	7,809 (6,521–9,096)
56–60	7,176 (6,558–7,937)	8,268 (7,894–8,641)
61–70	6,866 (6,247–7,740)	6,218 (6,058–7,277)



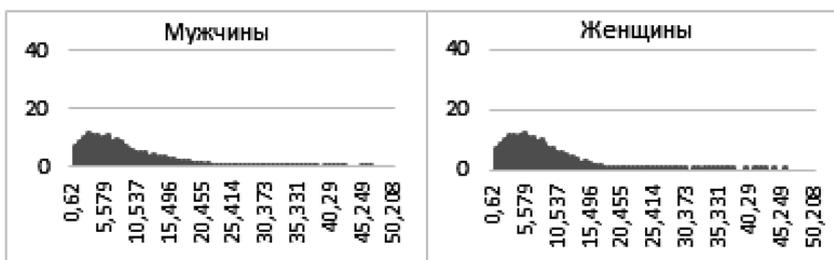
1–10 лет



11–20 лет



21–30 лет



31–40 лет

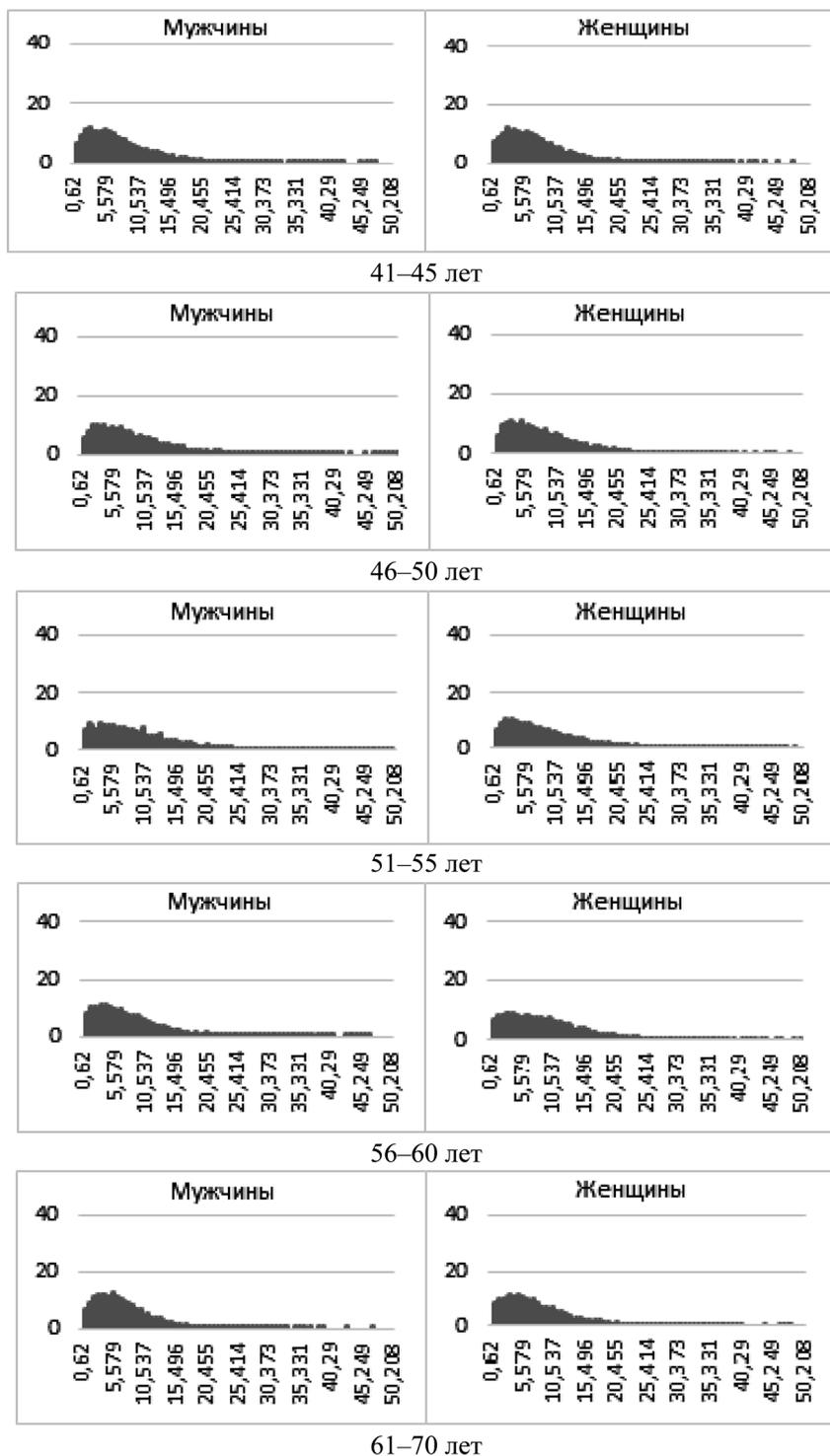


Рис. 4. Гистограммы распределения межмембранных промежутков по ширине. По оси абсцисс – значения ширины промежутков между мембранами, мкм; по оси ординат – частота встречаемости признака, %

Fig. 4. Histograms of the width distribution of adjacent membranes. The axis of abscissa is the width of the intervals between adjacent membranes, μm ; the axis of ordinates is the frequency of occurrence of a sign, %

При анализе гистограмм распределения межмембранных промежутков по ширине (рис. 4) и у мужчин, и у женщин в возрастных группах до 40 лет четкого направления изменений исследуемого признака не отмечалось. В возрасте с 41 года и до 60 лет наблюдалось уплощение вершин гистограмм и некоторое их смещение в сторону больших значений, что свидетельствует об увеличении ширины межмембранных промежутков и у мужчин, и у женщин, в том числе,

вероятно, и из-за увеличения количества разрывов эластических мембран (сканирующая линия «читает» разрыв в мембране как ее отсутствие). Уменьшение данного показателя в возрастной группе 61–70 лет и у мужчин, и у женщин, вероятно, свидетельствует о происходящих процессах деградации межклеточного вещества в ходе физиологического старения сосудистой стенки, из-за чего и отмечается уменьшение объема экстрацеллюлярного матрикса, а также о нарушении непрерывности эластических мембран.

Таблица 6. Достоверность различий гистограмм распределения межмембранных промежутков по ширине

Table 6. Reliability of the differences in the histograms of the width distribution of adjacent elastic membranes

Сравниваемые возрастные группы, лет		Значения <i>p</i> для коэффициента Колмогорова–Смирнова	
		Мужчины	Женщины
1–10	11–20	0,0001	0,0001
11–20	21–30	0,0001	0,0001
21–30	31–40	0,01	0,016
31–40	41–45	0,03	0,02
41–45	46–50	0,025	0,016
46–50	51–55	0,03	>0,05
51–55	56–60	>0,05	0,04
56–60	60–70	>0,05	0,038

На основании качественных и количественных признаков, описывающих состояние эластических структур средней оболочки аорты, нами выделено три основных возрастных периода изменений эластического каркаса: период завершения процессов формирования и роста эластических структур, период стабилизации и период старения эластических компонентов сосудистой стенки.

Для более четкого определения возрастных границ этих периодов данные тех групп, между которыми не существует достоверных различий, были объединены. На основании морфологических данных и коэффициента Колмогорова–Смирнова, данных критерия Манна–Уитни по объединенным группам (табл. 7) первый период длится от рождения до 30 лет и у мужчин, и у женщин.

Второй период у мужчин заканчивается к 45 годам, о чем свидетельствует достоверное отличие от предыдущей возрастной группы по критерию Манна–Уитни по всем измеряемым морфометрическим параметрам (табл. 7). У женщин период стабильности длится дольше, до 55 лет, что подтверждается морфологическими изменениями, коэффициентом Колмогорова–Смирнова (табл. 7).

Таблица 7. Критерий Манна–Уитни для сравнения трех возрастных групп у мужчин и женщин, Me (25%–75%)

Table 7. Mann–Whitney criterion for three age groups of males and females, Me (25%–75%)

Признак	Возрастные группы у мужчин, лет		Уровень значимости (<i>p</i>)	Возрастные группы у женщин, лет		Уровень значимости (<i>p</i>)
	1–30	31–45		1–30	31–55	
К-во мембран	60,60 (54,84–67,16)	71,00 (56,64–77,74)	>0,05	51,44 (40,72–58,46)	62,07 (60,82–64,0)	0,002
Толщина мембран	3,487 (3,397–3,712)	3,672 (3,458–3,784)	>0,05	3,586 (2,981–3,874)	3,648 (3,503–3,896)	>0,05
Ширина межмембранных промежутков	5,844 (4,684–6,307)	6,382 (6,097–6,840)	>0,05	5,636 (5,217–6,253)	6,887 (6,554–7,131)	0,001
Признак	Возрастные группы у мужчин, лет		Уровень значимости (<i>p</i>)	Возрастные группы у женщин, лет		Уровень значимости (<i>p</i>)
	31–45	46–70		31–55	56–70	
К-во мембран	71,00 (56,64–77,74)	54,91 (48,94–67,28)	0,016	62,07 (60,82–64,0)	56,06 (44,34–64,82)	>0,05
Толщина мембран	3,672 (3,458–3,784)	2,991 (2,728–3,253)	0,0002	3,648 (3,503–3,896)	3,086 (2,985–3,177)	>0,05
Ширина межмембранных промежутков	6,382 (6,097–6,840)	7,281 (6,345–7,937)	0,037	6,887 (6,554–7,131)	7,277 (6,218–7,894)	>0,05

Выводы

1. Изучение эластических мембран средней оболочки аорты с помощью морфологических и морфометрических методов исследования позволило выявить закономерности возрастных изменений эластического каркаса аорты у мужчин и женщин и выделить три основных периода, касающихся изменений структурных характеристик эластических мембран: период завершения процессов формирования и роста эластических структур, период стабилизации и период старения эластических компонентов сосудистой стенки.

2. Период завершения процессов формирования и роста эластических структур характеризуется увеличением количества эластических мембран, уменьшением их толщины, постепенным увеличением ширины межмембранных промежутков. У мужчин и женщин этот период длится в среднем до 30 лет.

3. Период стабилизации эластических компонентов сосудистой стенки характеризуется стабильностью количества и толщины мембран, а также постепенным увеличением ширины межмембранных промежутков. Этот период у мужчин охватывает возраст с 30 до 45 лет, у женщин – с 30 до 55 лет.

4. Третий период – старения эластических компонентов сосудистой стенки – характеризуется тенденцией к уменьшению количества эластических мембран, их истончению и увеличением ширины межмембранных промежутков. Этот период у мужчин отмечается с 45 лет, у женщин – с 55 лет.

Список использованных источников

1. Mechanical contribution of lamellar and interlamellar elastin along the mouse aorta / T. E. Clark [et al.] // *J. of Biomechanics*. – 2015. – Vol. 48, iss. 13. – P. 3599–3605.
2. Farand, P. Structure of large arteries: Orientation of elastin in rabbit aortic internal elastic lamina and in the elastic lamellae of aortic media / P. Farand, A. Garon, G. E. Plante // *Microvasc. Res.* – 2007. – Vol. 73, iss. 2. – P. 95–99.
3. Investigation of the biomechanical integrity of decellularized rat abdominal aorta / M. Katsimpoulas [et al.] // *Transplantation Proc.* – 2015. – Vol. 47, iss. 4. – P. 1228–1233.
4. Yunjie, Wang. Arterial mechanics considering the structural and mechanical contributions of ECM constituents / Yunjie Wang, Shahrokh Zeinali-Davarani, Yanhang Zhang // *J. of Biomechanics*. – 2016. – Vol. 49, iss. 12. – P. 2358–2365.
5. Новикова, Е. Г. Морфологические особенности возрастных изменений в стенке аорты при расслаивающей аневризме / Е. Г. Новикова, И. Е. Галанкина // *Архив патологии*. – 2015. – Т. 77, № 1. – С. 18–22.
6. Blomgren, Bo. A novel method for quantification of the folding of elastic laminae in elastic arteries / Bo Blomgren, Camilla Göktürk // *Micron*. – 2008. – Vol. 39, iss. 5. – P. 623–630.
7. Humphrey, J. D. Mechanics, mechanobiology, and modeling of human abdominal aorta and aneurysms / J. D. Humphrey, G. A. Holzapfel // *J. of Biomechanics*. – 2012. – Vol. 45, iss. 5. – P. 805–814.
8. Martufi, G. Histo-mechanical modeling of the wall of abdominal aorta aneurysms / G. Martufi, T. C. Gasser // *IFAC Proc. Volumes*. – 2012. – Vol. 45, iss. 2. – P. 1035–1040.

References

1. Clark T. E., Lillie M. A., Vogl A. W., Gosline J. M., Shadwick R. E. Mechanical contribution of lamellar and interlamellar elastin along the mouse aorta. *Journal of Biomechanics*, 2015, vol. 48, iss. 13, pp. 3599–3605. doi. org/10.1016/j.jbiomech.2015.08.004.
2. Farand P., Garon A., Plante G. E. Structure of large arteries: Orientation of elastin in rabbit aortic internal elastic lamina and in the elastic lamellae of aortic media. *Microvascular Research*, 2007, vol. 73, iss. 2, pp. 95–99. doi. org/10.1016/j.mvr.2006.10.005.
3. Katsimpoulas M., Morticelli L., Michalopoulos E., Gontika I., Stavropoulos-Giokas C., Kostakis A., Haverich A., Korossis S. Investigation of the biomechanical integrity of decellularized rat abdominal aorta. *Transplantation Proceedings*, 2015, vol. 47, iss. 4, pp. 1228–1233. doi. org/10.1016/j.transproceed.2014.11.061.
4. Yunjie Wang, Shahrokh Zeinali-Davarani, Yanhang Zhang. Arterial mechanics considering the structural and mechanical contributions of ECM constituents. *Journal of Biomechanics*, 2016, vol. 49, iss. 12, pp. 2358–2365. doi. org/10.1016/j.jbiomech.2016.02.027.
5. Novikova E. G., Galankina I. E. Age-related morphological changes in the aortic wall in dissecting aneurysm. *Arkhiv patologii* [Archive of Pathology], 2015, vol. 77, no. 1, pp. 18–22. (in Russian).
6. Blomgren Bo, Göktürk Camilla. A novel method for quantification of the folding of elastic laminae in elastic arteries. *Micron*, 2008, vol. 39, iss. 5, pp. 623–630. doi. org/10.1016/j.micron.2007.03.010.

7. Humphrey J. D., Holzapfel G. A. Mechanics, mechanobiology, and modeling of human abdominal aorta and aneurysms. *Journal of Biomechanics*, vol. 45, iss. 5, pp. 805–814. doi. org/10.1016/j. jbiomech.2011.11.021.

8. Martufi G., Gasser T. C. Histo-mechanical modeling of the wall of abdominal aorta aneurysms. *IFAC Proceedings Volumes*, 2012, vol. 45, iss. 2, pp. 1035–1040. doi. org/10.3182/20120215–3-AT-3016.00183.

Информация об авторах

Юзефович Наталья Анатольевна – аспирант. Белорусский государственный медицинский университет (пр. Дзержинского, 83, 220116, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: doc2881@mail. ru.

Студеникина Татьяна Михайловна – канд. мед. наук, доцент, заведующий кафедрой. Белорусский государственный медицинский университет (пр. Дзержинского, 83, 220116, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: histology@bsmu. by.

Мельников Игорь Александрович – ст. преподаватель. Белорусский государственный медицинский университет (пр. Дзержинского, 83, 220116, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: melnicov@bsmu. by.

Information about the authors

Natallia A. Yuzefovich – Postgraduate student. Belarusian State Medical University (83, Dzerzhynskiy Ave., 220116, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: doc2881@mail. ru.

Tatiana M. Studenikina – Ph. D. (Med.), Assistant Professor, Head of the Department. Belarusian State Medical University (83, Dzerzhynskiy Ave., 220116, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: histology@bsmu. by.

Igor A. Melnikov – Senior Lecturer. Belarusian State Medical University (83, Dzerzhynskiy Ave., 220116, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: melnicov@bsmu. by.