

УДК 612.117.1:[611.835.81+.87]

**И. В. Бочкарева**

## **СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПРОЧНОСТНЫХ ПАРАМЕТРОВ БОЛЬШЕБЕРЦОВОГО И ОБЩЕГО МАЛОБЕРЦОВОГО НЕРВОВ В ЗРЕЛОМ ВОЗРАСТЕ**

**Аннотация.** Представлены результаты анализа прочностных параметров большеберцового и общего малоберцового нервов в зрелом возрасте. Анализ показал, что во всех возрастных нагрузках абсолютная нагрузка больше у большеберцового нерва, относительная нагрузка почти одинакова в обоих нервах, разрывная нагрузка больше у большеберцового нерва, а предел прочности в обоих нервах повторяет динамику разрывной нагрузки.

**Ключевые слова:** анализ, большеберцовый нерв, малоберцовый нерв, деформация, нагрузка.

### ***Введение***

В последние годы резко увеличилось количество повреждений (разрывов) периферических нервов при боевых ранениях и бытовых травмах нижних конечностей, что особенно характерно для большеберцового (ББН) и общего малоберцового (ОМБН) нервов ввиду их малого поперечного сечения [1–4]. Это вызвало увеличение микрохирургической оперативной активности на этих нервах, связанной с механическими воздействиями при их воссоединении [5]. Однако механические свойства ББН и ОМБН остаются до настоящего времени малоизученными, хотя хирургическое вмешательство требует точного знания их прочностных свойств в различные возрастные периоды. Данные литературы о деформативно-прочностных свойствах ББН и ОМБН немногочисленны, отрывочны, противоречивы и зачастую получены при проведении хирургических операций на этих нервах [2, 5]. К тому же большинство исследований в этой области проведены на образцах нервов, взятых от животных [6]. В литературе также крайне немногочисленны сведения о характере и закономерностях возрастной изменчивости и о взаимосвязи между одинаковыми механическими параметрами ББН и ОМБН [7, 8].

Цель настоящего исследования – сравнительный анализ прочностных параметров ББН и ОМБН человека в зрелом возрасте.

### ***Материал и методы исследования***

Материалом исследования послужили большеберцовые и общие малоберцовые нервы 78 трупов взрослых людей обоего пола в возрасте от 21 до 60 лет, причина смерти которых была не связана с травмой или заболеванием периферической нервной системы. Материал исследования был разделен на четыре возрастные группы: 1) 21–30 лет; 2) 31–40 лет; 3) 41–50 лет; 4) 51–60 лет. Образцы для исследования брали из обоих нервов на уровне подколенной ямки не позднее 14–15 ч после наступления смерти и помещали в изотонический раствор натрия хлорида. Эксперименты проводили в день взятия материала не позднее 12 ч после аутопсии. Образцы нервов длиной 20 мм растягивали в продольном направлении со скоростью 20 мм/мин до момента полного разрыва на разрывных машинах с графической регистрацией зависимости «нагрузка-деформация». Прочностные параметры нервов исследовали на трех уровнях растяжения: при малой (10 %-й), боль-

шой (25 %-й) деформации и в момент разрыва. Определяли абсолютную и относительную (процентное отношение абсолютной нагрузки при данном уровне деформации к общей прочности) нагрузку и коэффициент жесткости при 10 %-м и 25 %-м удлинении, общую прочность (разрывную нагрузку), максимальную относительную деформацию и коэффициент жесткости (модуль Юнга) в момент разрыва. Полученные количественные данные обрабатывали вариационно-статистическими методами.

### Результаты исследования и их обсуждение

Исследование показало, что в зрелом возрасте одноименные деформативно-прочностные показатели БН и ОМБН имеют относительно однонаправленную динамику с большей или меньшей степенью интенсивности (табл. 1).

Абсолютная нагрузка для 10 %-й деформации нервов пропорциональна их общей прочности и площади поперечного сечения, причем во всех возрастных группах она больше у БН (см. табл. 1) и возрастает у БН в 1,4 раза, а у ОМБН – в 1,63 раза. Прирост ее у ОМБН в 1,16 раза интенсивнее, но во всех возрастных группах для растяжения БН требуется почти в 2 раза большее усилие, чем для ОМБН. Относительная нагрузка при 10 %-й деформации у обоих нервов во всех возрастных группах примерно одинакова, но до 40 лет величина ее у ОМБН в 1,08 раза больше, чем у БН. В изученный период времени относительная нагрузка возрастает у БН в 2,4 раза, а у ОМБН – в 2,2 раза. К 60 годам относительная нагрузка у обоих нервов становится практически одинаковой.

Таблица 1

Параметры деформативно-прочностных свойств БН и ОМБН

Показатель	Возрастная группа, лет	БН		ОМБН		БН/ОМБН
		$M \pm m$	Динамика, %	$M \pm m$	Динамика, %	
1	2	3	4	5	6	7
Абсолютная нагрузка при 10 %-й деформации, Н	21–30	38,2±1,4	–	17,5±0,3	–	2,19
	31–40	41,0±1,8	7,6	18,8±0,5	7,8	2,17
	41–50	44,0±1,3	7,2	20,2±0,5	7,0	2,18
	51–60	53,4±11,1	21,3	28,5±0,6	41,3	1,87
Относительная нагрузка при 10 %-й деформации, %	21–30	9,47±0,14	–	10,2±0,14	–	0,93
	31–40	12,24±0,20	29,3	13,0±0,19	27,5	0,94
	41–50	17,82±10,18	45,6	17,7±0,19	36,1	1,01
	51–60	22,5±0,4	26,3	22,9±0,4	29,5	0,98
Коэффициент упругости при 10 %-й деформации, Н/мм <sup>2</sup>	21–30	18,9±1,0	–	15,5±0,3	–	1,22
	31–40	19,1±0,8	0,8	16,7±0,4	7,4	1,15
	41–50	20,6±0,6	8,1	17,4±0,5	4,6	1,18
	51–60	23,6±0,7	14,4	24,2±0,7	38,6	0,98
Абсолютная нагрузка при 25 %-й деформации, Н	21–30	237±18	–	101,1±2,0	–	2,30
	31–40	219±19	–6,1	92,2±2,5	–8,8	2,37
	41–50	186±6	–15,0	86,0±2,2	–6,7	2,16
	51–60	195±14	4,8	102,2±1,8	18,8	1,90
Относительная нагрузка при 25 %-й деформации, %	21–30	58,1±10,6	–	58,8±0,4	–	0,99
	31–40	65,3±10,7	12,3	63,3±0,5	7,8	1,03
	41–50	75,1±0,6	15,1	75,2±0,4	18,8	1,00
	51–60	81,6±10,7	8,7	81,9±0,3	8,9	1,00

Окончание табл. 1

1	2	3	4	5	6	7
Коэффициент упругости при 25 %-й деформации, Н/мм <sup>2</sup>	21–30	46,0±12,2	–	35,9±0,8	–	1,28
	31–40	40,8±1,6	–11,5	32,7±0,9	–9,0	1,25
	41–50	34,8±1,0	–14,6	29,8±1,0	–8,8	1,17
	51–60	34,4±10,9	–1,1	34,5±0,9	15,9	1,00
Общая прочность, Н	21–30	404±10	–	172±3	–	2,34
	31–40	339±10	–16,2	146±4	–15,4	2,32
	41–50	249±8	–26,6	115±3	–21,5	2,17
	51–60	239±15	–3,7	124,8±2,3	8,9	1,92
Максимальная относительная деформация, %	21–30	39,88±0,18	–	39,55±0,13	–	1,03
	31–40	38,51±0,13	–3,4	37,95±0,15	–4,1	1,01
	41–50	35,0±50,26	–9,0	35,09±0,21	–7,5	1,00
	51–60	31,03±0,25	–11,5	30,8±70,22	–12,0	1,01
Коэффициент жесткости, Н/мм <sup>2</sup>	21–30	50,5±2,8	–	38,7±0,9	–	1,31
	31–40	41,01±1,9	–18,8	34,0±1,0	–12,2	1,21
	41–50	33,0±0,9	–19,5	28,0±1,0	–16,7	1,17
	51–60	34,01±0,8	3,0	34,0±1,0	21,1	0,99
Предел прочности, Н/мм <sup>2</sup>	21–30	19,83±1,05	–	15,3±0,49	–	1,3
	31–40	15,77±0,07	–20,5	12,9±0,37	–15,7	1,22
	41–50	11,6±0,33	–26,4	9,9±0,32	–23,3	1,17
	51–60	10,57±0,29	–8,9	10,54±0,27	6,1	1,003

Коэффициент упругости (1-й секущий модуль упругости) при 10 %-м удлинении возрастает у ББН в 1,25 раза и у ОМБН в 1,6 раза (см. табл. 1). В 1, 2 и 3-й возрастных группах ББН имеет больший коэффициент упругости, а в 4-й возрастной группе величина этого параметра становится у него меньшей (см. табл. 1). Темп его прироста с возрастом увеличивается, особенно после 50 лет у ОМБН. До 50 лет ББН обладает в 1,15–1,22 раза большей жесткостью, а после 50 лет эта разница незначительна, с небольшим преобладанием уже у ОМБН.

Абсолютная нагрузка при 25 %-й деформации у обоих нервов в зрелом возрасте изменяется почти параллельно и пропорциональна их общей прочности и общей площади поперечного сечения (ППС). При 25 %-м растяжении от 1-й до 3-й возрастной группы она уменьшается у ББН в 1,2 раза и у ОМБН в 1,15 раза, а после 50 лет она, наоборот, увеличивается у обоих нервов соответственно в 1,04 и 1,19 раза. При этом, если у ББН после 50 лет тенденция к увеличению этого параметра только намечается, то у ОМБН его величина достигает уровня, характерного для 1-й возрастной группы. В 4-й группе интенсивность роста этого механического параметра у ОМБН в 3,92 раза выше, чем у ББН (см. табл. 1). Во всех возрастных группах для растяжения ББН на 25 % его первоначальной длины требуется большее усилие в 2,3 раза в 1-й и в 1,9 раза во 2-й группах, чем для такой же деформации в этих возрастных группах у ОМБН.

Относительная нагрузка при 25 %-й деформации в группе зрелого возраста у обоих нервов мало отличается и увеличивается примерно одинаково – в 1,4 раза (см. табл. 1).

Коэффициент упругости при 25 %-й деформации (2-й секущий модуль упругости) у ББН к 60 годам с замедлением темпа снижается в 1,25 раза. У ОМБН характер изменения этого показателя иной. Он уменьшается от 1-й группы до 3-й в 1,17 раза, а затем после 50 лет снова возрастает в 1,16 раза (см. табл. 1). До 50 лет ББН обладает большей

упругостью, чем ОМБН. В 4-й возрастной группе в силу разнонаправленной динамики этого параметра разница в упругости становится несущественной.

Известно, что общая прочность (разрывная нагрузка) характеризует механическую устойчивость органа как целостного образования. Поэтому ББН, как более крупный по сравнению с ОМБН, во всех возрастных группах прочнее: в 2,34 раза – в 1-й, в 2,32 – во 2-й, в 2,17 – в 3-й и в 1,92 раза – в 4-й, но с возрастом эта разница постепенно сокращается (см. табл. 1). Общая прочность ББН в период зрелого возраста непрерывно уменьшается, в общей сложности в 1,41 раза. Она снижается от 1-й до 3-й группы у ОМБН в 1,34 раза, а затем к 60 годам ее величина у него снова возрастает в 1,09 раза, т.е. динамика изменения данного параметра у ОМБН разнополярная. До 50 лет общая прочность у всех нервов снижается, а в 4-й группе она или стабилизируется, как у ББН, или даже начинает снова возрастать, как у ОМБН.

Коэффициент жесткости (модуль упругости при разрыве) характеризует способность органа противостоять деформирующему усилию. Так как разрыв нерва происходит в условиях растяжения тех же структур, что и при большой степени деформации, величина и возрастная динамика коэффициента жесткости в общих чертах сходны с таковыми 2-го секущего модуля упругости. При разрыве этот параметр уменьшается до 50 лет от 1-й к 3-й группе: у ББН – в 1,38 раза и у ОМБН – в 1,29 раза. Затем к 60 годам он возрастает в 1,03 раза у ББН и в 1,21 раза – у ОМБН, т.е. имеет разнонаправленную динамику. В 1-й группе этот коэффициент в 1,3 раза больше у ББН, а к 60 годам он становится одинаковым у обоих нервов, что связано с большей в 7 раз интенсивностью роста коэффициента жесткости в 4-й возрастной группе у ОМБН.

Предел прочности обоих нервов повторяет динамику разрывной нагрузки и уменьшается к 50 годам в 1,47 раза у ББН и в 1,35 раза у ОМБН, а затем к 60 годам его величина уменьшается всего в 1,09 раза у ББН, а у ОМБН, наоборот, возрастает в 1,06 раза.

Максимальная относительная деформация у обоих нервов практически равна во всех возрастных группах и в течение исследованного возрастного периода снижается в 1,27 раза со сходной динамикой (см. табл. 1). Различия между нервами по величине данного параметра во всех группах несущественные. Вследствие того, что данная возрастная динамика растяжимости наблюдается на обоих нервах, ее можно считать закономерной.

Выявленная динамика деформативно-прочностных свойств ББН и ОМБН в течение периода зрелого возраста связана с возрастными изменениями их нейрофиброархитектоники. Известно, что на начальной стадии деформация нерва происходит преимущественно за счет сглаживания волн извилистости самого нерва в перинервии, отдельных его пучков в стволе, выпрямления складок нервных волокон и растяжения соединительнотканых, в основном эластических волокон [3, 6, 7]. Поэтому динамика абсолютной нагрузки и коэффициента упругости при 10 %-й деформации связана преимущественно с изменением структуры, качественного и количественного состава соединительной ткани нервов из-за накопления в них коллагена и жировой ткани, уменьшения содержания эластина и снижения деформационных резервов [7, 8]. С возрастом происходит склерозирование нерва, вследствие чего утолщаются его оболочки и увеличивается содержание соединительной ткани в нерве [6, 7, 9]. При больших (15 % и более) деформациях растяжение нерва происходит за счет всех его компонентов: и нервных, и соединительнотканых, преимущественно коллагеновых [6–8]. В обоих нервах до 50 лет уменьшение количества нервных волокон компенсируется накоплением соединительной ткани (коллагена), которая и поддерживает прочность на примерно одинаковом уровне с небольшими колебаниями в сторону увеличения или уменьшения. В ББН дегенерация нервных воло-

кон идет примерно с той же скоростью, что и в ОМБН, а накопление соединительной ткани отстает. Кроме того, в ББН более интенсивно накапливается жировая ткань. Все это в комплексе вызывает значительное снижение прочности его нервного ствола. После 50 лет дальнейшее количественное накопление соединительной ткани приводит к качественным изменениям. В результате перестройки молекулярной структуры соединительной ткани происходит увеличение ее жесткости [3, 7] и, следовательно, жесткости и прочности нервов. В совокупности это ведет к разнополярной динамике и разному темпу изменения деформирующей нагрузки у изученных нервов в период зрелого возраста. Характер изменений коэффициента жесткости в 4-й группе у ББН можно связать с тем, что в нем находится больший объем соединительной ткани, чем в ОМБН. Поэтому структурная перестройка коллагена, склерозирование ББН и накопление в нем жировой ткани в большей степени влияют на величину его жесткостных параметров, чем в ОМБН.

Проведенный корреляционный анализ показал, что наибольшее влияние на величину абсолютной нагрузки ББН и ОМБН оказывают толщина оболочек нервов ( $h = 0,50-0,55$ ), абсолютная и относительная ППС соединительной ткани ( $h = 0,60-0,67$ ). Коэффициент упругости при 10 %-й деформации в наибольшей степени также связан с относительным содержанием соединительной ткани в стволе нервов ( $h = 0,62$ ). Так как деформация нервов при большой степени удлинения (25 %) и при разрыве происходит за счет одних и тех же структур, то большинство механических параметров имеют в течение периода зрелого возраста при этих двух различных степенях удлинения сходную динамику.

Установлено, что в период зрелого возраста общее количество нервных волокон снижается в ББН на 34,4 % и в ОМБН на 29,1 % [5]. Плотность нервных волокон на 1 мм<sup>2</sup> поперечного сечения пучков также уменьшается в тот же период в обоих нервах на 8,2–8,3 %. Отставание динамики 2-го параметра связано с тем, что дегенерация нервных волокон компенсируется прогрессивным сжатием пучков в течение всего периода зрелого возраста. В связи с отмеченным калибр пучков уменьшается с возрастом в среднем на 31 %. Возрастная физиологическая дегенерация нервных волокон приводит к уменьшению относительной площади поперечного сечения пучков в 1,32 раза в ББН и в 1,39 раза в ОМБН и, следовательно, к снижению способности нерва противостоять растягивающим усилиям [3, 7, 8]. До 50 лет накопление коллагена и уменьшение эластина в соединительнотканых оболочках почти не компенсирует этого падения прочности и жесткости, так как депонирующаяся в эпиневррии жировая ткань, что особенно характерно для ББН, нейтрализует в значительной степени увеличение жесткости коллагена вследствие разрыва соединительнотканых волокон. Увеличение концентрации коллагена и повышение его жесткости в результате структурной перестройки особенно выражены после 50 лет. Это вызывает постепенное нарастание жесткости соединительной ткани [7, 8, 10] и, следовательно, увеличение жесткости и прочности оболочек нерва и всего нерва в целом. Однако процесс склерозирования нервов в этом возрасте еще не достигает своей полной выраженности. Поэтому снижение растяжимости нервов в этом возрастном периоде связано, во-первых, с возрастанием жесткости нервного ствола в силу указанных выше причин, а во-вторых, со снижением компенсационных резервов структуры нерва.

Корреляционный анализ подтвердил (табл. 2), что параметры прочности и упругости наиболее тесно связаны положительной корреляцией с абсолютной и относительной ППС пучков нервных волокон ( $h = 0,34-0,79$ ), общим количеством и плотностью нервных волокон ( $h = 0,42-0,70$ ).

Таблица 2

## Корреляционные отношения морфологических и механических параметров ББН и ОМБН

Параметр	Абсолютная нагрузка при 10 %-й деформации	Коэффициент упругости при 10 %-й деформации	Абсолютная нагрузка при 25 %-й деформации	Коэффициент упругости при 25 %-й деформации	Общая прочность	Максимальная относительная деформация	Коэффициент жесткости
Абсолютная ППС пучков	-0,55	-0,67	0,48	0,34	0,65	0,77	0,40
Абсолютная ППС соединительной ткани	0,60	0,39	-0,37	-0,56	-0,53	-0,68	-0,64
Относительная ППС пучков	-0,67	-0,62	0,52	0,60	0,79	0,93	0,73
Относительная ППС соединительной ткани	0,67	0,62	-0,52	-0,60	-0,79	-0,93	-0,73
Толщина эпиневерия	0,55	0,38	-0,47	-0,60	-0,65	-0,64	-0,69
Толщина периневерия	0,50	0,39	-0,40	-0,47	-0,44	-0,54	-0,45
Количество нервных волокон	-0,57	-0,68	0,53	0,43	0,70	0,83	0,48
Плотность нервных волокон	-0,55	-0,39	0,42	0,50	0,48	0,57	0,54

Примечание. Жирным шрифтом выделены коэффициенты нелинейной корреляционной связи.

В большинстве случаев связь между морфологическими и прочностными параметрами нелинейная. Нелинейность корреляции свидетельствует о том, что на разных стадиях деформации прочностные параметры нервов определяются не одним, а множеством морфологических факторов, но всегда можно выделить один или два доминирующих, которые в большей степени влияют на тот или иной механический параметр нерва. Важная роль соединительнотканых и нервных компонентов в формировании прочностных свойств нервных стволов на разных стадиях их деформации подтверждена сравнением нервов между собой. Различие в динамике и величине одноименных механических параметров ББН и ОМБН связано, в первую очередь, с их ППС и разным содержанием нервного и соединительнотканного компонентов (см. табл. 2).

Имея большую площадь поперечного сечения (в 1,8–1,9 раза), ББН требует большего усилия при растяжении и разрыве, чем ОМБН. Возрастная дегенерация нервных волокон приводит после 50 лет к примерному выравниванию относительного содержания нервного и соединительнотканного компонентов в обоих нервах и, следовательно, к уравниванию упругости и жесткости обоих нервов на стадиях деформации и разрыва. Отсутствие различий между нервами по величинам относительной нагрузки при растяжении и максимальной относительной деформации и параллелизм изменения механических свойств с возрастом свидетельствуют об общих закономерностях взаимосвязи механических свойств и внутривольной структуры и о единых механизмах возрастной перестройки нервных стволов [4, 6, 7].

### **Заключение**

В результате сравнительного анализа прочностных свойств большеберцового и общего малоберцового нервов установлено, что в зрелом возрасте прочность и упругость у обоих нервов при малых степенях удлинения увеличиваются. С 21 года до 50 лет прочность и жесткость этих нервов при больших деформациях и при разрыве снижаются, в первую очередь, в результате дегенерации их нервных волокон, а после 50 лет, наоборот, увеличиваются в связи с развивающимся склерозом нервных стволов. Изученные нервы имеют одинаковую растяжимость, которая в зрелом возрасте синхронно снижается. Изменение деформативно-прочностных свойств нервов в течение периода зрелого возраста связано с возрастной перестройкой их внутривольной структуры. Отличие механических свойств обоих нервов определяется качественными и количественными особенностями их морфологического строения. Отсутствие различий между нервами по величинам относительной нагрузки при растяжении и максимальной относительной деформации свидетельствует об общих закономерностях взаимосвязи механических свойств и внутривольной структуры и о единых механизмах возрастной перестройки нервных стволов большеберцового и общего малоберцового нервов. У изученных нервов отмечен параллелизм изменения абсолютной нагрузки при 10 и 25 %-й деформации.

### **Список литературы**

1. Бабчин, И. С. Организация нейрохирургической помощи при ранениях периферических нервов на Ленинградском фронте за 3,5 года Отечественной войны / И. С. Бабчин // Лечение огнестрельных ранений периферических нервов. – Л., 1947. – С. 7–18.
2. Дойников, Б. С. Огнестрельные повреждения периферических нервов / Б. С. Дойников // Избранные труды по нейроморфологии и невропатологии. – М. : Медгиз, 1955. – С. 311–365.
3. Ommaya, A. K. Mechanical properties of tissues of the nervoussystem / A. K. Ommaya // J. Biomech. – 1968. – V. 1. – P. 127–138.
4. Ramic, I. Work capacity evaluation in Bosnia war veterans with peripheral nerve injuries in the extremities / I. Ramic, V. Z. Filipovic // Article in Croatian. Med. Arh. – 2002. – V. 56, № 5–6. – P. 289–292.
5. Resection of the sciatic, peroneal, or tibial nerves: assessment of functional status / A. D. Brooks, J. S. Gold, D. Graham et al. // Ann Surg Oncol. – 2002. – Jan.-Feb. – № 9 (1). – P. 41–47.
6. Серов, В. В. Соединительная ткань: функциональная морфология и общая патология / В. В. Серов, А. Б. Шехтер. – М. : Медицина, 1981. – 310 с.
7. Калмин, О. В. Морфологические факторы биомеханической надежности периферических нервов : автореф. дис. ... д-ра мед. наук / Калмин О. В. – Саранск, 1998. – 42 с.
8. Калмин, О. В. Прочностные свойства большеберцового и общего малоберцового нервов в зрелом возрасте / О. В. Калмин // Всероссийская научная конференция с международным участием : материалы. – СПб., 2004. – С. 94–100.
9. Калмин, О. В. Сравнительная характеристика внутривольного строения большеберцового и общего малоберцового нервов в зрелом возрасте / О. В. Калмин, И. В. Паткина // Вестник новых медицинских технологий. – 2007. – Т. XIV, № 3. – С. 38–40.
10. Surgical management and results of 135 tibial nerve lesions at the Louisiana state university health sciences center / D. H. Kim, S. Ryu, R. L. Tiel, D. G. Kline // Neurosurgery. – 2003. – Nov. – V. 53, № 5. – P. 1114–1125.

**Бочкарева Ирина Владимировна**

кандидат медицинских наук, доцент,  
кафедра анатомии человека,  
Пензенский государственный университет  
E-mail: ibochkareva@mail.ru

**Bochkareva Irina Vladimirovna**

candidate of medical sciences, associate professor,  
sub-department of anthropotomy  
Penza State University

УДК 612.117.1:[611.835.81+.87]

**Бочкарева, И. В.**

**Сравнительный анализ прочностных параметров большеберцового и общего малоберцового нервов в зрелом возрасте / И. В. Бочкарева // Вестник Пензенского государственного университета. – 2013. – № 1. – С. 71–77.**