

## Деформационно-прочностные параметры артерий головного мозга во II периоде зрелого возраста

В.Н. Николенко<sup>1,2</sup>, О.А. Фомкина<sup>3</sup>

<sup>1</sup>ФГАОУ ВО «Первый Московский государственный медицинский университет им. И.М. Сеченова» Минздрава России (Сеченовский Университет), г. Москва, Россия;

<sup>2</sup>ФГБОУ ВО «Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова», г. Москва, Россия;

<sup>3</sup>ФГБОУ ВО «Саратовский государственный медицинский университет им. В.И. Разумовского» Минздрава России, г. Саратов, Россия

### Аннотация

**Цель исследования** – выявить особенности биомеханических параметров артерий головного мозга во II периоде зрелого возраста.

**Материалы и методы.** Изучены образцы передних (ПМА), средних (СМА), задних мозговых (ЗМА), задних соединительных (ЗСА), базилярных артерий (БА) и внутричерепные части позвоночных артерий (ПА), изъятых при аутопсии 40 трупов мужчин и женщин 35–60 лет. В эксперименте на продольное растяжение на разрывной машине Tira Test изучали общую прочность, предел прочности, максимальную относительную деформацию и модуль Юнга стенок.

**Результаты.** В работе описаны средние значения и параметры вариабельности изученных биомеханических параметров артерий. Представлены результаты сравнительного анализа со средними значениями, характерными для популяции взрослых людей 21–90 лет.

**Заключение.** Биомеханические свойства артерий головного мозга характеризуются значительной вариабельностью. Наименее изменчивой является общая прочность стенки артерий. Полученные данные отличаются от средних значений, характерных для популяции взрослых людей в возрасте 21–90 лет. Наибольшие различия установлены для предела прочности сосудистой стенки. Во II периоде зрелого возраста данный параметр у СМА, ЗМА, БА, ПМА и ПА на 8–15% больше, а у ЗСА на 22% меньше средней величины.

**Ключевые слова:** артерии головного мозга, деформационно-прочностные свойства, пожилой возраст.

**Для цитирования:** Николенко В.Н., Фомкина О.А. Деформационно-прочностные параметры артерий головного мозга во II периоде зрелого возраста. Сеченовский вестник. 2019; 10 (1): 41–46. DOI: 10.26442/22187332.2019.1.41-46

### КОНТАКТНАЯ ИНФОРМАЦИЯ:

**Фомкина Ольга Александровна**, д-р мед. наук, доцент кафедры анатомии человека ФГБОУ ВО «Саратовский государственный медицинский университет им. В.И. Разумовского» Минздрава России

Адрес: 410012, Россия, г. Саратов, ул. Б. Казачья, 112

Тел.: (8452) 669-765

E-mail: oafomkina@mail.ru

Статья поступила в редакцию: 23.10.2018

Статья принята к печати: 01.03.2019

## Deformation-strength parameters of arteries of the brain in the II period of mature age

Vladimir N. Nikolenko<sup>1,2</sup>, Olga A. Fomkina<sup>3</sup>

<sup>1</sup>I.M. Sechenov First Moscow State Medical University (Sechenov University), Moscow, Russia;

<sup>2</sup>M.V. Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia;

<sup>3</sup>V.I. Razumovsky Saratov State Medical University, Saratov, Russia

### Abstract

**The aim** of research – to identify the features of the biomechanical parameters of the arteries of the brain in the II period of adulthood.

**Materials and methods.** The samples of anterior (ACA), middle (MCA), posterior cerebral (PCA), posterior connective (PCoA), basilar arteries (BA) and intracranial parts of vertebral arteries (VA) seized at autopsy of 40 corpses of men and

women aged 35–60 years were studied. In the longitudinal tension experiment on the tensile testing machine Tira Test studied the overall strength, tensile strength, maximum relative deformation and young's modulus of walls.

**Results.** The paper describes the average values and variability parameters of the studied biomechanical parameters of arteries. The results of the comparative analysis with the average values typical for the population of adults aged 21–90 years are presented.

**Conclusion.** Biomechanical properties of cerebral arteries are characterized by significant variability. The least changeable is the overall strength of the artery wall. The data obtained differ from the average values typical for the population of adults aged 21–90 years. The greatest differences were found for the ultimate strength of the vascular wall. In the II period of adulthood, this parameter in MCA, PCA, BA, ACA and BA is 8–15% more, and in PCoA is 22% less than the average value.

**Key words:** the arteries of the brain, the deformation-strength properties, advanced age.

**For citation:** Nikolenko V.N., Fomkina O.A. Deformation-strength parameters of arteries of the brain in the II period of mature age. Sechenov Medical Journal. 2019; 10 (1): 41–46. DOI: 10.26442/22187332.2019.1.41-46

#### CONTACT INFORMATION:

**Olga A. Fomkina**, Doctor of Medical Sciences, Associate Professor of the Department of Human Anatomy, V.I. Razumovsky Saratov State Medical University

**Address:** 112, B. Kazachya str., Saratov, 410012, Russia

**Tel.:** +7 (8452) 669-765

**E-mail:** oafomkina@mail.ru

**The article received:** 23.10.2018

**The article approved for publication:** 01.03.2019

## ВВЕДЕНИЕ

Роль сосудистой патологии в структуре заболеваний центральной нервной системы во всем мире с каждым годом возрастает. При этом наибольшее развитие цереброваскулярной патологии приходится на возраст 35–60 лет. По принятой для морфологических исследований периодизации (Москва, 1965) этот возрастной диапазон соответствует II периоду зрелого возраста. Так, например, острые нарушения мозгового кровообращения у значительного числа людей развиваются в возрасте 40–45 лет [1, 2]. Аневризма артерий головного мозга может обнаружиться в любом возрасте: преимущественно у взрослых, причем у женщин несколько чаще, чем у мужчин. Однако жизнеугрожающее осложнение данного заболевания (разрыв аневризмы с последующим субарахноидальным кровоизлиянием) чаще всего развивается в возрасте 55–60 лет [3]. Вследствие того, что под угрозой оказывается контингент людей наиболее трудоспособной части общества, становится очевиден значительный социально-экономический ущерб от заболеваний артерий головного мозга. В структуре ущерба среди всех болезней системы кровообращения на цереброваскулярные заболевания в 2016 г. пришлось свыше 560 млрд руб. [4].

Технический прогресс на современном этапе развития медицины ознаменовался внедрением компьютерных технологий, которые позволяют повысить качество диагностики и лечения различных патологических состояний. С помощью специального программного обеспечения и привлечения

к работе специалистов, математиков и программистов, стало возможным получение статических и динамично-вращаемых 3D-моделей различных органов и систем, в том числе артерий головного мозга. Такие модели позволяют рассчитывать объемный кровоток, касательные и эффективные напряжения, а также поля давления крови в кровоснабжающих головной мозг артериях. В этом плане моделирование кровотока по артериям головного мозга для конкретного больного позволит прогнозировать развитие некоторой патологии, например аневризмы, и поможет оптимизировать реконструктивные операции на этих артериях [5].

При построении индивидуальной модели мозгового кровотока необходимо учитывать гемодинамические параметры течения крови, анатомию и геометрию артерий, деформационно-прочностные свойства сосудистой стенки [6]. Сведения о строении, особенностях хода (геометрии) артерий и гемодинамических параметрах могут быть получены по результатам используемых современных методов инструментальной диагностики (ультразвуковая доплерография, компьютерная томография, магнитно-резонансная томография). Определить деформационно-прочностные свойства сосудов человека при жизни на сегодняшний день не представляется возможным. В связи с этим изучение этих свойств на аутопсийном материале приобретает неопределимое значение. Известно, что механические свойства тканей в течение 24 ч после смерти меняются незначительно, что позволяет использовать их в ходе моделирования при математических расчетах [7].

**Таблица 1. Деформационно-прочностные свойства артерий, кровоснабжающих головной мозг, у людей в возрасте 35–60 лет****Table 1. Deformation-strength properties of arteries supplying blood to the brain in people aged 35–60 years**

Параметр	Артерия	Количество наблюдений	Min-max	M±m	σ	Cv
Общая прочность, Н	ПМА	80	1,2–4,6	2,5±0,1	0,7	29,8
	СМА	80	1,2–4,6	2,6±0,1	0,7	25,1
	ЗМА	80	1,1–4,4	2,6±0,1	0,7	26,9
	БА	40	2,4–6,5	4,0±0,1	0,9	21,7
	ПА	80	2,7–10,5	5,5±0,2	1,3	24,2
Предел прочности, Н/мм <sup>2</sup>	ПМА	80	0,7–3,2	1,4±0,1	0,5	36,7
	СМА	80	0,5–1,8	1,1±0,1	0,4	33,3
	ЗМА	80	0,6–2,4	1,3±0,1	0,4	31,4
	БА	40	0,8–2,2	1,3±0,1	0,3	25,7
	ПА	80	1,1–4,3	2,1±0,1	0,6	29,2
Максимальная относительная деформация, %	ПМА	80	12,3–47,3	25,8±0,9	8,2	31,7
	СМА	80	18,2–77,8	43,3±1,5	13,3	30,7
	ЗМА	80	14,7–75,0	40,95±1,6	14,1	34,4
	БА	40	21,3–55,5	36,4±1,5	9,4	25,8
	ПА	80	25,0–105,0	48,5±1,4	12,5	25,8
Модуль Юнга, Н/мм <sup>2</sup>	ПМА	80	2,2–9,8	4,7±0,3	1,7	36,3
	СМА	80	0,8–6,6	2,7±0,1	1,1	44,7
	ЗМА	80	1,3–10,6	3,5±0,2	1,8	49,3
	БА	40	1,9–7,6	3,8±0,2	1,3	25,0
	ПА	80	1,4–9,7	4,5±0,2	1,6	36,2

**Цель исследования** – выявить особенности деформационно-прочностных свойств стенок артерий головного мозга во II периоде зрелого возраста (35–60 лет).

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Материалом исследования послужили образцы прекоммуникационных частей передних (ПМА) и задних мозговых артерий (ЗМА), клиновидной части средних мозговых артерий (СМА), задних соединительных (ЗСА), базилярных артерий (БА) и внутричерепных частей позвоночных артерий (ПА). Материал получен при аутопсии 40 трупов взрослых людей, умерших по причинам, не связанным с острой сосудистой патологией головного мозга, в возрасте 35–60 лет. Деформационно-прочностные свойства были получены экспериментально на разрывной машине Tira Test 28005 (Германия), с нагрузочной ячейкой 100 Н. Ко всем образцам артерий было применено одноосное продольное растяжение. Определяли предел прочности и общую прочность артерий, рассчитывали максимальную относительную деформацию и модуль Юнга артериальной стенки.

Протокол исследования одобрен Этическим комитетом ФГБОУ ВО «Саратовский ГМУ им. В.И. Разумовского» Минздрава России.

Полученный количественный материал обрабатывали вариационно-статистическим методом с

предварительной проверкой на соответствие закону нормального распределения с использованием теста Колмогорова–Смирнова. В случаях нормального распределения рассчитывали среднюю арифметическую ( $M$ ) и ее ошибку ( $m$ ), минимальное ( $min$ ) и максимальное ( $max$ ) значения, коэффициент вариации ( $Cv$ , %) и стандартное отклонение ( $\sigma$ ). В случаях, когда распределение параметра было отличным от нормального закона распределения, рассчитывали медиану ( $Me$ ) и квартильный диапазон ( $Q25\%$ ;  $Q75\%$ ).

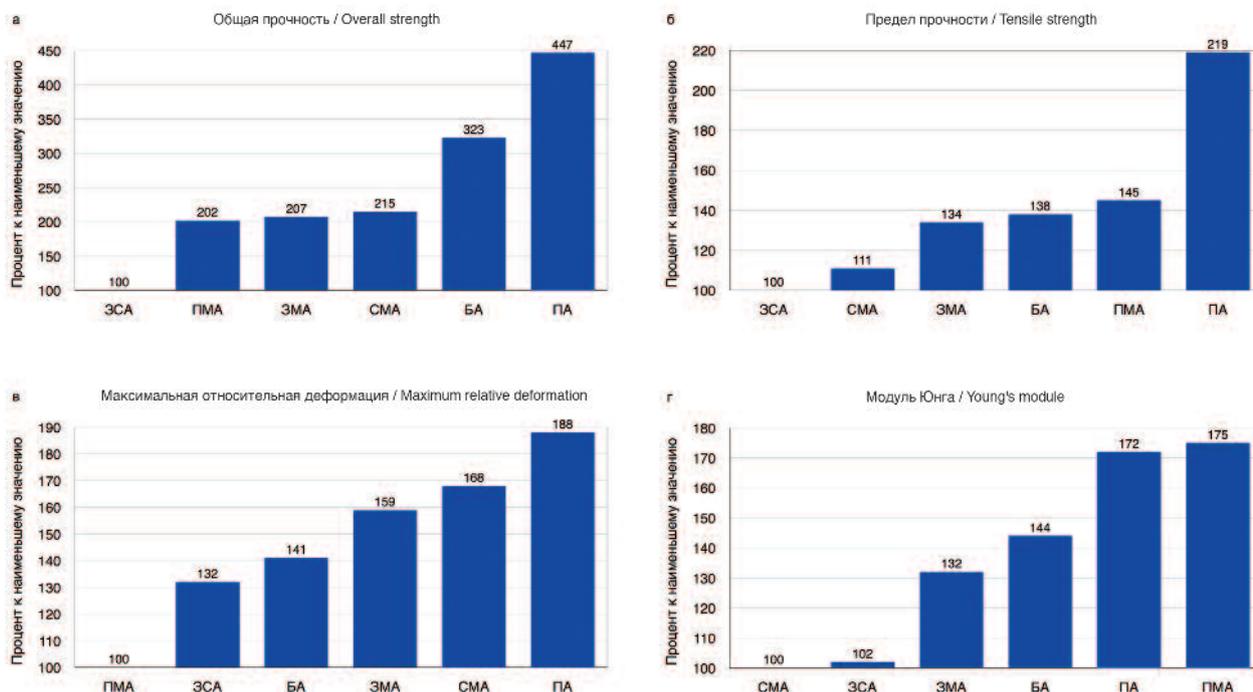
Для оценки значимости различий средних величин использовали параметрические ( $t$ -критерий Стьюдента) и непараметрические ( $U$ -критерий Манна–Уитни) статистические критерии. Различия считали значимыми при 99% ( $p < 0,01$ ) и 95% ( $p < 0,05$ ) порогах вероятности. Все расчеты были проведены при помощи пакета прикладных программ Statistica 10.0.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Деформационно-прочностные свойства артерий правого и левого полушарий головного мозга у людей в возрасте 35–60 лет близки по своей величине ( $p > 0,05$ ) и в большинстве случаев характеризуются значительной вариабельностью ( $Cv$  укладывается в диапазон от 25 до 50%). Сравнительный анализ величин коэффициентов вариации изученных параметров позволил выделить наиболее стабильный

**Таблица 2. Деформационно-прочностные свойства ЗСА взрослых людей в возрасте 35–60 лет**  
**Table 2. Deformation-strength properties of PCoA in adults aged 35–60 years**

Параметр	Количество наблюдений	Me	Q <sub>25</sub>	Q <sub>75</sub>
Общая прочность, Н	20	1,2	0,9	1,4
Предел прочности, Н/мм <sup>2</sup>	20	1	0,6	1,3
Максимальная относительная деформация, %	20	33,9	29,5	39,0
Модуль Юнга, Н/мм <sup>2</sup>	20	2,7	2,3	3,8



**РИС.** Результаты сравнительного анализа деформационно-прочностных свойств артерий головного мозга у людей во II периоде зрелого возраста: *a* – общая прочность; *b* – предел прочности; *в* – максимальная относительная деформация; *г* – модуль Юнга.

**FIG.** The results of comparative analysis of deformation-strength properties of cerebral arteries in people in the 2nd period of adult: *a* – overall strength; *b* – tensile strength; *c* – maximum relative deformation; *d* – Young's module.

биомеханический параметр артерий головного мозга – это общая прочность, характеризующаяся наименьшей вариабельностью. Самой большой вариабельностью при сравнении всех изученных артерий характеризуются параметры ПМА, СМА и ЗМА; вариабельность параметров БА и ПА отличается меньшими значениями.

Средние значения деформационно-прочностных свойств артерий представлены в табл. 1, 2.

По результатам сравнительного анализа деформационно-прочностных свойств артерий при их продольном растяжении самой прочной и растяжимой является ПА (самая большая величина параметров прочности и максимальной относительной деформации); самой эластичной – СМА (наименьшие значения модуля Юнга); наибольшая жесткость свойственна стенке передней мозговой артерии (самые высокие значения модуля Юнга); см. рисунок.

Если в пределах каждого из изученных параметров выделить артерию с наименьшей его величиной и рассчитать диапазон изменчивости по отношению к этой величине, получим следующие результаты: диапазон изменчивости по общей прочности составит 102–347%; пределу прочности – 11–119%; модулю Юнга – 2–75%; максимальной относительной деформации – 32–88%. Иначе говоря, наиболее выражены различия изученных артерий по общей прочности, менее всего артерии мозга различаются по жесткости стенки.

Полученные в ходе настоящего исследования данные мы сравнили со средними значениями тех же параметров, характерных для 100 взрослых людей в возрасте 21–90 лет [8–11]. Установлено, что средние величины общей прочности и предела прочности ЗСА соответственно на 27 и 22% превышают их величину во II периоде зрелого возраста ( $p < 0,05$ ). Общая прочность сосудистой стенки всех

**Таблица 3. Средние величины биомеханических параметров стенок мозговых артерий и коэффициенты их вариаций [12]**  
**Table 3. The medium average values of the biomechanical parameters of the walls of the cerebral arteries and coefficients of their variations [12]**

Артерия	Толщина стенки, мм	Максимальная относительная деформация, %	Модуль Юнга, кгс/мм <sup>2</sup>	Предел прочности, кгс/мм <sup>2</sup>
БА	0,72 (17,1)	21,32 (41,91)	0,52 (37,7)	0,22 (52,4)
СМА	0,74 (21,2)	17,73 (43,1)	1,20 (64,4)	0,35 (44,7)
ПМА	0,75 (17,8)	21,94 (60,7)	1,12 (54,9)	0,37 (58,7)

Примечание. В скобках указан коэффициент вариации.

Note. The coefficient of variation is given in parentheses.

остальных изученных артерий во II периоде зрелого возраста в среднем на 2–8%, а предел прочности на 8–15% больше средних данных ( $p < 0,05$ ). Максимальная относительная деформация практически не отличается от средних для популяции (0–6%;  $p > 0,05$ ), модуль Юнга у всех изученных артерий, кроме ПМА и ЗСА, в представленной возрастной группе на 4–16% больше ( $p > 0,05$ ). ПМА в возрасте 35–60 лет оказалась на 8%, а ЗСА на 6% более эластичной, чем в среднем по популяции ( $p > 0,05$ ).

Не все полученные в ходе настоящего исследования сведения возможно сравнить с данными других авторов. Биомеханические параметры ЗСА, ЗМА и ПА представлены нами впервые. В работе М.А. Годлевска (1978 г.) приводятся средние данные и коэффициенты вариации максимальной относительной деформации, модуля Юнга и предела прочности для ПМА, СМА и БА у взрослых людей 36–50 лет (табл. 3) [12].

По данным этого автора, СМА характеризуется наименьшей деформативностью и самой высокой жесткостью стенки. По нашим данным, по способности к растяжению СМА уступает только ПА; по эластичности сосудистой стенки она стоит на первом месте среди изученных артерий. Затрудняет сравнение несовпадение возрастного диапазона, изученного данным автором и представленного нами возраста.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Общая прочность, предел прочности, максимальная относительная деформация и модуль Юнга артерий головного мозга в зрелом возрасте характе-

ризуются значительной вариабельностью. Наименее изменчивым признаком является общая прочность артерий, следовательно, это наиболее стабильный биомеханический параметр для кровоснабжающих головной мозг артерий.

Биомеханические параметры артерий у взрослых людей во II периоде зрелого возраста отличаются от средних значений, характерных для взрослых людей в целом. Больше всего различия касаются предела прочности артериальной стенки. У СМА, ЗМА, БА, ПМА и ПА данный параметр во II периоде зрелого возраста на 8–15% больше, а у ЗСА на 22% меньше средней величины, характерной для взрослых людей 21–90 лет.

Полученные в ходе работы результаты значительно расширяют и дополняют имеющиеся сведения по нейроваскулярной биомеханике и должны учитываться при моделировании гемодинамики в артериях головного мозга. Такие модели имеют значение для уточнения этиологии и патогенеза ряда нейроваскулярной патологии и должны учитываться при планировании вмешательств на артериях головного мозга.

**Финансирование.** Работа не имеет финансовой поддержки.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Conflict of interests.** The authors declare that there is not conflict of interests.

## ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Богданов Э.И. Ишемический инсульт в молодом возрасте. Неврологический вестник. Журнал им. В.М.Бехтерева. 2012; 44 (2): 30–40.  
[Bogdanov E.I. Ischemic stroke in young patients. Neurological bulletin. V.M.Bekhterev Journal. 2012; 44 (2): 30–40 (in Russian).]
2. Калашникова Л.А., Добрынина Л.А. Ишемический инсульт в молодом возрасте. Журн. неврологии и психиатрии им. С.С.Корсакова. 2017; 117 (8–2): 3–12.  
[Kalashnikova L.A., Dobrynina L.A. Ischemic stroke in young adults. S.S.Korsakov Journal of Neurology and Psychiatry. 2017; 117 (8–2): 3–12 (in Russian).]
3. Чугунова С.А., Николаева Т.Я. Факторы риска развития и разрыва церебральных аневризм. Якутский мед. журн. 2015; 52 (4): 98–102.  
[Chugunova S.A., Nikolaeva T.Ya. Risk factors for the development and rupture of cerebral aneurysms Point of view. Yakut Medical Journal. 2015; 52 (4): 98–102 (in Russian).]
4. Концевая А.В., Драпкина О.М., Баланова Ю.А. и др. Экономический ущерб от сердечно-сосудистых заболеваний в Российской Федерации в 2016 году. Рациональная фармакотерапия в кардиологии. 2018; 14 (2): 156–66.  
[Kontsevaya A.V., Drapkina O.M., Balanova Yu.A. et al. Economic Burden of Cardiovascular Diseases in the Russian Federation in 2016. Rational pharmacotherapy in cardiology. 2018; 14 (2): 156–66 (in Russian).]
5. Иванов Д.В., Доль А.В., Павлова О.Е., Аристамбекова А.В. Моделирование Виллизиева круга человека в норме и при патологии. Рос. журн. биомеханики. 2013; 17 (3): 49–63.

- [Ivanov D.V., Dol A.V., Pavlova O.E., Arystanbekova A.V. Modeling Willisau circle of the person in norm and at a pathology. Russian journal of biomechanics. 2013; 17 (3): 49–63 (in Russian).]
6. *Watton PN, Selimovic A, Raberger NV et al.* Modelling evolution and the evolving mechanical environment of saccular cerebral aneurysms. *Biomech Model Mechanobiol* 2011; 10: 109–32.
  7. *Пурина Б.А., Касьянов В.А.* Биомеханика крупных кровеносных сосудов человека. Рига: Зинатне, 1980.  
[Purinia B.A., Kas'ianov V.A. The biomechanics of large human blood vessels. Riga: Zinatne, 1980 (in Russian).]
  8. *Иванов Д.В., Фомкина О.А.* Определение механических свойств артерий виллизиевого многоугольника. *Рос. журн. биомеханики.* 2008. 12 (4): 75–83.  
[Ivanov D.V., Fomkina O.A. Determination of mechanical properties of arteries of a polygon. Russian journal of biomechanics. 2008. 12 (4): 75–83 (in Russian).]
  9. *Фомкина О.А., Николенко В.Н.* Индивидуальная изменчивость морфологических и биомеханических характеристик задней мозговой артерии взрослых людей. *Курский научно-практический вестн. Человек и его здоровье.* 2012; 2: 21–6.  
[Fomkina O.A., Nikolenko V.N. Individual variability of morphological and biomechanical characteristics of the back brain artery of adult people. *Kursk scientific and practical Bulletin. Man and his health.* 2012; 2: 21–6 (in Russian).]
  10. *Фомкина О.А., Николенко В.Н.* Возрастно-половая изменчивость морфобиомеханических параметров базилярной артерии взрослых людей. *Саратовский научно-медицинский журн.* 2009; 5 (2): 159–63.  
[Fomkina O.A., Nikolenko V.N. Age-sex variability morpho-biochemical parameters of the basilar artery of adult people. *Saratov journal of medical scientific research.* 2009; 5 (2): 159–63 (in Russian).]
  11. *Николенко В.Н., Фомкина О.А., Неклюдов Ю.А., Алексеев Ю.Д.* Морфобиомеханические закономерности строения средней мозговой артерии взрослых людей. *Саратовский научно-медицинский журн.* 2012; 8 (1): 9–14.  
[Nikolenko V.N., Fomkina O.A., Neklyudov Yu.A., Alekseev Yu.D. Morphobiochemical the structure of middle cerebral artery adult. *Saratov journal of medical scientific research.* 2012; 8 (1): 9–14 (in Russian).]
  12. *Годлевская М.А.* Свойства артерий головного мозга в возрастной динамике и при цереброваскулярных заболеваниях (клиническое, биомеханическое и биохимическое сопоставления). Дис. ... канд. мат. наук. Рига, 1978.  
[Godlewska M.A. Properties of cerebral arteries in age dynamics and cerebrovascular diseases (clinical, biomechanical and biochemical comparison). PhD diss. Riga, 1978 (in Russian).]

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Фомкина Ольга Александровна**, д-р мед. наук, доцент кафедры анатомии человека ФГБОУ ВО «Саратовский государственный медицинский университет им. В.И. Разумовского» Минздрава России.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1516-0504>

**Николенко Владимир Николаевич**, д-р мед. наук, профессор, заслуженный работник Высшей школы РФ, зав. кафедрой анатомии человека ФГБОУ ВО «Первый Московский государственный медицинский университет им. И.М. Сеченова» Минздрава России; ФГБОУ ВО «Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова».

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9532-9957>

**Olga A. Fomkina**, Doctor of Medical Sciences, Associate Professor of Human Anatomy Department, V.I. Razumovsky Saratov State Medical University.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1516-0504>

**Vladimir N. Nikolenko**, Doctor of Medical Sciences, Professor, I.M. Sechenov First Moscow State Medical University, Head of Department of Anatomy; M.V. Lomonosov Moscow State University.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9532-9957>