

<https://doi.org/10.29001/2073-8552-2022-797>

УДК 611.08

Зенин Олег Константинович, e-mail: zen.olegz@gmail.com.

Исследование функциональных характеристик различных типов бифуркаций внутриорганных артерий селезенки

А.Ш. Дадашев¹, Э.С. Кафаров¹, О.К. Зенин², И.С. Милтых²

¹ Чеченский государственный университет имени А.А. Кадырова (ЧГУ им. А.А. Кадырова),

364093, Российская Федерация, Чеченская Республика, Грозный, ул. Шерипова, 32

² Пензенский государственный университет (ПГУ),

440026, Российская Федерация, Пенза, ул. Красная, 40

Обоснование. Исследование с помощью численного моделирования функциональных характеристик (проводящая, распределительная, опорная) цифровых моделей 4 типов бифуркаций внутриорганных артерий селезенки (ВАС) является ценным инструментом для поиска их морфометрического эталона и в последующем критерия нормы.

Цель: установить функциональные характеристики разных типов бифуркаций ВАС путем их численного моделирования, основанного на результатах морфометрии.

Материал и методы. Моделирование осуществляли на основании ранее полученных морфометрических характеристиках разных типов бифуркаций ВАС: 1-й тип – диаметр материнского (проксимального) сегмента (D) не равен диаметрам большего ($d_{\max}$) и меньшего ($d_{\min}$) дочерних (дистальных) сегментов – $D \neq d_{\max} \neq d_{\min}$; 2-й тип – $D = d_{\max}$, $D \neq d_{\min}$; 3-й тип – $D \neq d_{\max}$, $d_{\min} = d_{\max}$; 4-й тип – $D = d_{\max} = d_{\min}$. Для расчетов величин показателей бифуркации ВАС,

характеризующих проводящую и опорную функции, использовали компьютерную программу ANSYS Student, для описания распределительной функции – компьютерную программу Vasculograph.

Результаты. Установлено, что величина показателя бифуркации ВАС разного типа характеризует: 1) проводящую функцию – убывает в направлении 1-го типа - полная асимметрия, 2-го типа - боковая асимметрия, 4-го типа - полная симметрия, 3-го типа - односторонняя симметрия; 2) распределительную функцию – убывает в направлении 1-го типа - полная асимметрия, 2-го типа - боковая асимметрия, 3-го типа - односторонняя симметрия, 4-го типа - полная симметрия; 3) опорную функцию – убывает в направлении 1-го типа - полная асимметрия, 2-го типа - боковая асимметрия, 3-го типа - односторонняя симметрия, 4-го типа - полная симметрия.

Заключение. Полученные результаты свидетельствуют о том, что бифуркации ВАС разного типа ориентированы на выполнение различных функций. Это следует учитывать при поиске эталона и морфометрического критерия нормы ВАС, что будет способствовать выявлению различных вариантов мальформаций внутриорганных сосудов селезенки, в том числе имеющих клиническое значение.

Ключевые слова: численное моделирование; селезенка; внутриорганные артерии; бифуркации.

Финансирование: исследование выполнено без финансовой поддержки.

Соответствие принципам этики: исследование одобрено локальным этическим комитетом при Медицинском институте ФГБОУ ВО «Чеченский государственный университет им. А.А. Кадырова», протокол № 258/24-77 от 16.10.2023 г.

Для цитирования: Дадашев А.Ш., Кафаров Э.С., Зенин О.К., Милтых И.С. Исследование функциональных характеристик различных типов бифуркаций внутриорганных артерий селезенки. *Сибирский журнал клинической и экспериментальной медицины.*

Study of functional properties of different bifurcation types of the splenic vasculature

Ali Sh. Dadashev¹, Edgar S. Kafarov¹, Oleg K. Zenin², Ilia S. Milykh²

¹ Kadyrov Chechen State University,
32, Sheripova st., Grozny, 364093, Russian Federation

² Penza State University,
40, Krasnaya str., Penza, 440026, Russian Federation

Background. The study using numerical modeling of functional properties (conductive, distributive, pillar) of digital models of 4 types of bifurcations of the intraorgan arterial vasculature is a valuable tool to find its morphometric reference and subsequently the criterion of normality.

Aim: To establish the functional properties of different types of splenic arterial bifurcations through their numerical modeling based on morphometry results.

Material and Methods. Modelling was carried out on the basis of previously obtained morphometric characteristics of different types of splenic arterial bifurcations: type 1, the diameter of the parent (*proximal*) segment (D) is not equal to the diameters of the larger (d_{max}) and smaller (d_{min}) subsidiary branches (*distal segments*) $D \neq d_{max} \neq d_{min}$; type 2, $D = d_{max}$, $D \neq d_{min}$; type 3, $D \neq d_{max}$, $d_{min} = d_{max}$; type 4, $D = d_{max} = d_{min}$. The ANSYS Student computer software was used to calculate the values of splenic arterial bifurcation indices characterizing the conductive and support functions, and the Vasculograph computer software was used to calculate the distribution function.

Results. It was found that the value of the bifurcation parameter of splenic arterial bifurcations of different types characterizing: 1) conductive function decreases in the order of type 1 complete asymmetry, type 2 lateral asymmetry, type 4 complete symmetry and type 3 unilateral symmetry; 2) the distributive function decreases in

the direction of type 1 complete asymmetry, type 2 lateral asymmetry, type 3 unilateral symmetry, and type 4 complete symmetry 3) the pillar function decreases in the direction of type 1 complete asymmetry, type 2 lateral asymmetry, type 3 unilateral symmetry, and type 4 complete symmetry.

Conclusion. The obtained results indicate that different types of splenic arterial bifurcations are oriented to fulfil heterogeneous functions. This should be taken into account when seeking a reference and subsequently a morphometric criterion of splenic vasculature norm, which can be used for radial diagnostics.

Keywords: numerical modeling; spleen; arterial bed; bifurcations.

Funding: the study was carried out without financial support from grants, public, non-profit, commercial organizations and structures.

Compliance with ethical standards: this study was approved by the local ethical committee at the Medical Institute of the A.A. Kadyrov Chechen State University, Protocol No. 258/24-77 of 16.10.2023.

For citation: Dadashev A. Sh., Kafarov E.S., Zenin O.K., Milytkh I.S. Study of functional properties of different bifurcation types of the splenic vasculature. *Siberian Journal of Clinical and Experimental Medicine*.

Введение

Большое количество исследований посвящено изучению внутриорганных артерий селезенки (ВАС), поскольку селезенка является органом, который обильно кровоснабжается. Перспективным направлением современной морфологии является исследование внутриорганных арборизации сосудов разных органов человека как фрактальной системы. Ранее были предложены концептуальные модели (сегментарная, дихотомическая, стволовая), позволяющие количественно описывать особенности структуры внутриорганных сосудистого русла. Такой подход позволит найти морфометрический эталон и базирующийся на нем количественный критерий нормы строения внутриорганных сосудистого русла. Это поможет объективно диагностировать отклонения от нормального строения в клинических условиях

с использованием современных цифровых методов исследования [1]. Дихотомическая (бифуркационная) модель представляет сосудистые ветвления как квазифрактальные структуры, состоящие из взаимосвязанных дихотомий (бифуркаций), участков сосудистого русла, состоящих из одного материнского (проксимального) сегмента (D), двух дочерних (дистальных) ($d_{\max}$ и $d_{\min}$) сегментов и точки их соединения. Выделяют различные группы бифуркаций: «оптимальные» ($\xi = 2,55-3,02$) и «неоптимальные» ($\xi \neq 2,55-3,02$) в соответствии с уравнением C.D. Murray:

$$D^{\xi} = d_{\max}^{\xi} + d_{\min}^{\xi} \quad (1).$$

Виды артериальных бифуркаций: 1-й вид – открытый – $D < d_{\max} + d_{\min}$; 0 вид – нейтральный – $D = d_{\max} + d_{\min}$; 2-й вид – закрытый – $D > d_{\max} + d_{\min}$. Типы: 1-й тип (полная асимметрия) диаметр материнского (проксимального) сегмента (D) не равен диаметрам большего ($d_{\max}$) и меньшего ($d_{\min}$) дочерних (дистальных) сегментов – $D \neq d_{\max} \neq d_{\min}$; 2-й тип (боковая асимметрия) – $D = d_{\max}$, $D \neq d_{\min}$; 3-й тип (односторонняя симметрия) – $D \neq d_{\max}$, $d_{\min} = d_{\max}$; 4-й тип (полная симметрия) – $D = d_{\max} = d_{\min}$.

Возникает закономерный вопрос: какие из бифуркаций разных групп, видов и / или типов являются «нормальными» в понимании «оптимальными» [2]? При этом под «нормальным» строением подразумевают такую структуру внутриорганный сосудистого русла, которая обеспечивает оптимальное функционирование органа, т. е. функционирование с минимальными затратами нутриентов и энергии, необходимое для осуществления жизнедеятельности. Ответить на этот вопрос без знаний особенностей их функционирования невозможно, что и определило цель данного исследования.

Цель: установить функциональные характеристики разных типов бифуркаций ВАС путем их численного моделирования, основанного на результатах морфометрии.

Материал и методы

В качестве объектов для исследования использовали виртуальные (цифровые) модели разного типа бифуркаций ВАС (рис. 1), основанные на их морфометрических характеристиках, полученных ранее [3]. Выделяли бифуркации ВАС 4 типов (табл. 1): 1-й тип (полная асимметрия) - диаметр материнского (проксимального) сегмента (D) не равен диаметрам большего ($d_{\max}$) и меньшего ($d_{\min}$) дочерних (дистальных) сегментов – $D \neq d_{\max} \neq d_{\min}$; 2-й тип (боковая асимметрия) – $D = d_{\max}$, $D \neq d_{\min}$; 3-й тип (односторонняя симметрия) – $D \neq d_{\max}$, $d_{\min} = d_{\max}$; 4-й тип (полная симметрия) – $D = d_{\max} = d_{\min}$.

Таблица 1. Величины показателей, характеризующих морфометрические и функциональные (проводящая, распределительная, опорная) особенности бифуркаций внутриорганных артерий селезенки разного типа ($n = 67$)

Table 1. Values of indices characterizing morphometric and functional (conducting, distributing, pilar) parameters of splenic arterial bifurcations of different types ($n = 67$)

Показатель	Значение показателя (N , относительное количество бифуркаций)			
	Бифуркация 1-го типа (полная асимметрия) ($N = 61\%$)	Бифуркация 2-го типа (боковая асимметрия) ($N = 4\%$)	Бифуркация 3-го типа (односторонняя симметрия) ($N = 34\%$)	Бифуркация 4-го типа (полная симметрия) ($N = 1\%$)
Величины морфометрических показателей (Me)				
D , мм	0,7	0,3	0,20	0,10
$d_{\max}$, мм	0,5	0,3	0,10	0,10
$d_{\min}$, мм	0,2	0,1	0,10	0,10
L , мм	3,00	2,90	2,70	2,10
$l_{\max}$, мм	2,50	2,40	2,00	1,80
$l_{\min}$, мм	2,30	2,00	2,00	1,40
Величины показателей, характеризующих проводящую, распределительную и опорную функции				
Z , Па/м	1672057	1907531	14914176	10830660
$ПОП$, мм ²	14,54	12,00	10,90	8,37
Rb , Н/м	2331,2	408,2	340,8	214,1

Примечание: D – диаметр проксимального сегмента; $d_{\max}$ – диаметр большего дистального сегмента; $d_{\min}$ – диаметр меньшего дистального сегмента; L – длина проксимального сегмента; $l_{\max}$ – длина большего дистального сегмента; $l_{\min}$ – длина меньшего дистального сегмента; Z – показатель гемодинамического сопротивления; $ПОП$ – площадь области покрытия; Rb – показатель жесткости конструкции; N – относительное количество бифуркаций; n – количество исследованных коррозионных препаратов.

Для анализа проводящей функции (гемодинамического сопротивления) виртуальных моделей бифуркаций ВАС разного типа применяли компьютерную программу ANSYS Student (см. рис. 1). Стенки ВАС считались неупругими. Для численного моделирования нестационарного ламинарного потока использовали уравнения непрерывности и Навье – Стокса. Считали, что коэффициент вязкости не является константой, а зависит от градиента скорости сдвига.

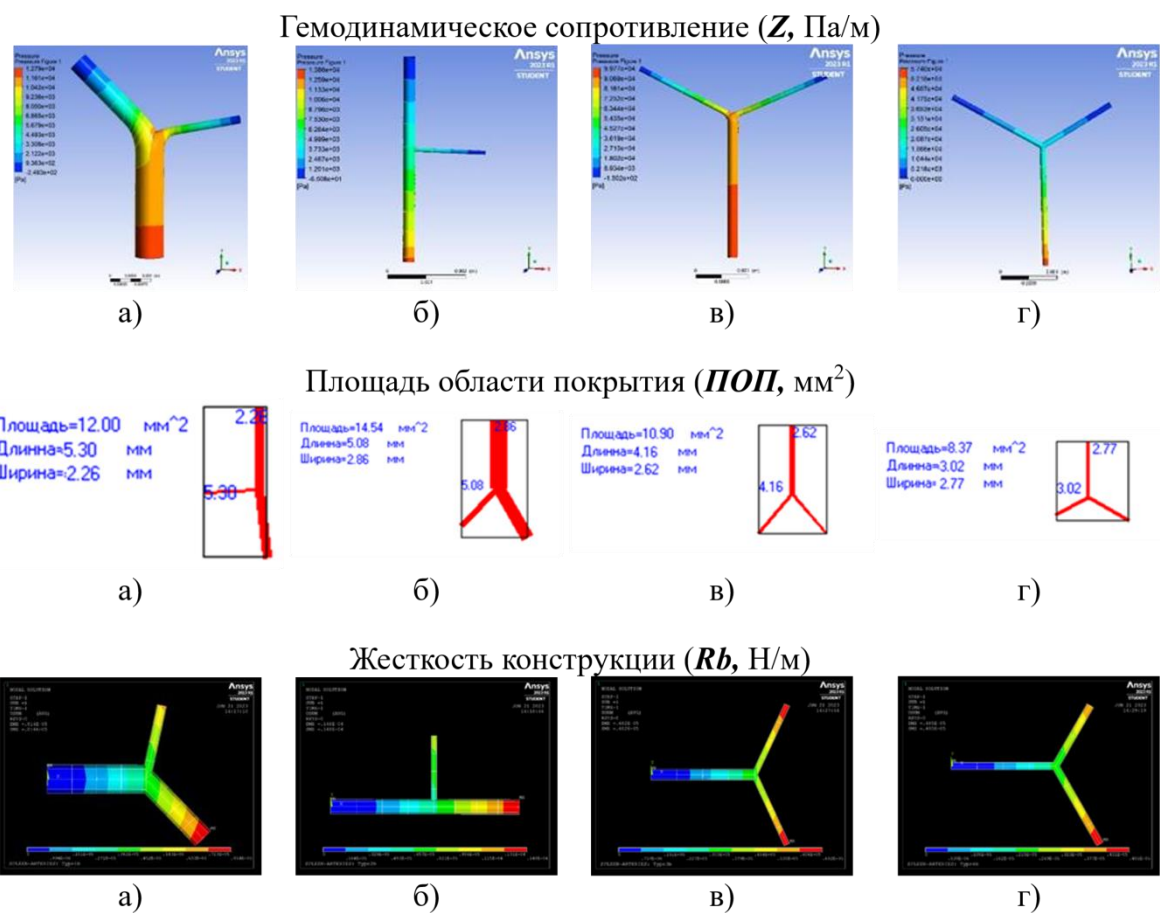


Рис. 1. Результаты виртуальных испытаний проводящей (Z), распределительной ($ПОП$) и опорной (Rb) функций бифуркаций внутриорганной артерии селезенки разных типов: а) бифуркация 1-го типа - полная асимметрия, $D \neq d_{\max} \neq d_{\min}$; б) бифуркация 2-го типа - боковая асимметрия, $D = d_{\max}$ и $d_{\max} \neq d_{\min}$; в) бифуркация 3-го типа - односторонняя симметрия, $D \neq d_{\max}$ и $d_{\max} = d_{\min}$; г) бифуркация 4-го типа - полная симметрия, $D = d_{\max} = d_{\min}$.

Fig. 1. Results of virtual tests of conductive (Z), distributive ($ПОП$) and pillar (Rb) functions of different types of splenic arterial bifurcations: (a) type 1 bifurcation complete asymmetry, $D \neq d_{\max} \neq d_{\min}$; (b) type 2 bifurcation lateral asymmetry, $D = d_{\max}$ and $d_{\max} \neq d_{\min}$; (c) type 3 bifurcation one-sided symmetry, $D \neq d_{\max}$ and $d_{\max} = d_{\min}$; (d) type 4 bifurcation complete symmetry, $D = d_{\max} = d_{\min}$.

Кровь рассматривали как неньютоновскую жидкость с плотностью 1 060 кг/м³ и динамической вязкостью, изменяющейся согласно модели Карро. Для моделирования взаимосвязи скорости и давления применяли систему PISO. Считали скорость на входе постоянной и равной 1,7012 м/с. В данной модели

использовали среднее давление двух фаз (систола, диастола) — 100 мм рт. ст. (около 13332 Па) в качестве статического манометрического давления на выходе. Показатель гемодинамического сопротивления (Z) определяли как отношение разности давления на входе (P_{max}) и выходе (P_{min}) к сумме длин сегментов ($L + l_{max} + l_{min}$) разного типа бифуркаций ВАС:

$$Z = P_{max} - P_{min}[\text{Па}] / L + l_{max} + l_{min}[\text{м}] \quad (2).$$

Для анализа распределительной функции виртуальных моделей бифуркаций ВАС разного типа применяли компьютерную программу Vasculograph [4] (см. рис. 1). В качестве показателя, количественно характеризующего распределительную функцию бифуркации ВАС, использовали величину площади области покрытия ($ПОП$), т. е. область, которую занимает исследуемая бифуркация. Значение показателя $ПОП$ рассчитывали как произведение величин ширины и длины $ПОП$ (мм²).

Для анализа опорной функции виртуальных моделей бифуркаций ВАС разного типа применяли компьютерную программу ANSYS Student (см. рис. 1). Определяли величину жесткости бифуркации. В качестве показателя жесткости бифуркации ВАС рассчитывали величину (Rb), равную отношению значения (F_b) собственного веса и веса крови, которая находится у нее внутри, к величине (Δ) перемещения наиболее удаленной точки бифуркации $Rb = F_b / \Delta$ (Н/м).

Собственный вес (F_e) бифуркации определяли как $F_e = m_{\text{бифуркации}} \times g$; $m_{\text{бифуркации}}$ равна сумме масс сегментов артерий, составляющих бифуркацию, где масса сегмента $m_{\text{сегмента}} = \pi (D \times h + h^2) L$ (D — внутренний диаметр артериального сегмента; L — длина артериального сегмента, h — толщина стенки артериального сегмента), собственный вес и вес крови (F_b) внутри бифуркации определяли как $F_b = g (m_{\text{бифуркации}} + m_{\text{крови}})$.

Массу крови $m_{\text{крови}}$, находящейся внутри бифуркации, определяли как сумму масс крови, находящихся в каждом из артериальных сегментов бифуркации, где $m_{\text{крови сегмента}} = 1060 \pi D^2 / 4$; 1000 кг/м³ — плотность воды,

1060 кг/м³ – плотность крови. Значение показателя модуля упругости (E^*) определяли из уравнения:

$$E^* = (k_1 \exp(k_2 r_0) + k_3) / (h / r_0) \quad (3),$$

где эмпирически установленные коэффициенты: $k_1 = 2,00 \times 10^7 \text{ г} \times \text{с}^{-2} \times \text{см}^{-1}$, $k_2 = -22,53 \text{ см}^{-1}$ и $k_3 = 8,65 \times 10^5 \text{ г} \times \text{с}^{-2} \times \text{см}^{-1}$, $r_0 = D/2$ – внутренний радиус артериального сегмента, h – толщина стенки артериального сегмента. Толщину стенки артериального сегмента вычисляли из уравнения [5]:

$$h = 0,2215 \times D^{0,5419} \quad (4),$$

где h – толщина стенки артериального сегмента, D – внутренний диаметр артериального сегмента. Значения углов между материнским и дочерними (большим – $\alpha_{\max}$ и меньшим – $\alpha_{\min}$) сегментами бифуркации ВАС определяли с использованием уравнений C.D. Murray.

Результаты

Анализ морфометрических данных показал наличие в составе ВАС всех 4 типов бифуркаций (см. табл. 1). Относительное количество от общего числа бифуркаций ВАС 1-го типа (полная асимметрия) составляет 61%; 2-го типа (боковая асимметрия) – 4%, 3-го типа (односторонняя симметрия) – 34%, 4-го типа (полная симметрия) – 1%.

Значения медиан диаметров (D , мм) проксимальных сегментов исследуемых бифуркаций ВАС в порядке убывания расположились следующим образом: 1-й тип (полная асимметрия) ($D = 0,7$ мм); 2-й тип (боковая асимметрия) ($D = 0,3$ мм); 3-й тип (односторонняя симметрия) ($D = 0,2$ мм); 4-й тип (полная симметрия) ($D = 0,1$ мм). Значения медиан длин (L , мм) проксимальных сегментов исследуемых бифуркаций ВАС в порядке убывания расположились таким образом: 1-й тип (полная асимметрия) ($L = 3$ мм); 2-й тип (боковая асимметрия) ($L = 2,9$ мм); 3-й тип (односторонняя симметрия) ($L = 2,7$ мм); 4-й тип (полная симметрия) ($L = 2,1$ мм). Величины диаметра (D) и длины (L) максимальны у бифуркаций 1-го типа и минимальны у бифуркаций 4-го типа.

В порядке увеличения значения показателя гемодинамического сопротивления и, следовательно, уменьшения величины показателя бифуркации ВАС разного типа, характеризующего проводящую способность, расположились следующим образом: 1-го типа (полная асимметрия) ($Z = 1672057$ Па/м), 2-го типа (боковая асимметрия) ($Z = 1907531$ Па/м), 4-го типа (полная симметрия) ($Z = 10830660$ Па/м) и 3-го типа (односторонняя симметрия) ($Z = 14914176$ Па/м). Значение гемодинамического сопротивления является максимальным у бифуркации 3-го типа и минимальным у бифуркации 1-го типа. В порядке убывания величины *ПОП* бифуркации ВАС разного типа расположились следующим образом: 1-го типа (полная асимметрия) ($ПОП = 14,54$ мм²), 2-го типа (боковая асимметрия) ($ПОП = 12,00$ мм²), 3-го типа (односторонняя симметрия) ($ПОП = 10,90$ мм²) и 4-го типа (полная симметрия) ($ПОП = 8,37$ мм²).

Значение показателя, характеризующего распределительную функцию ВАС максимально у бифуркации 1-го типа и минимально у бифуркации ВАС 4-го типа. В порядке убывания значения показателя характеризующего опорную функцию бифуркации ВАС расположились следующим образом: 1-го типа (полная асимметрия) ($R_b = 2331,2$ Н/м), 2-го типа (боковая асимметрия) ($R_b = 408,2$ Н/м), 3-го типа (односторонняя симметрия) ($R_b = 340,8$ Н/м), 4-го типа (полная симметрия) ($R_b = 214,1$ Н/м). Т. е. максимальное значение показателя жесткости конструкции зарегистрировано у бифуркации ВАС 1-го типа, минимальное – 4-го типа.

Обсуждение

Появление современных цифровых методов исследования внутриорганных сосудов человека, в том числе и ВАС, открывает новые возможности для прижизненной диагностики их структурных аномалий, выдвигает новые требования к исследованию строения сосудистого русла и превращает классическую (традиционную) анатомию в клиническую дисциплину [6]. В этом ключе математическая морфология [7] является

перспективой для развития классической анатомии. Она позволяет количественно оценить наличие или отсутствие структурных аномалий ВАС (необязательно патологий!), что дает возможность решить ряд актуальных проблем современной медицины, а именно: проводить объективную диагностику, предсказывать исходы малоинвазивных и ангиопластических операций селезенки, создавать 3D-модели ВАС с учетом индивидуальных особенностей, которые можно использовать в педагогической практике [8]. Следует добавить, что цифровое представление морфологических структур является наиболее удачной формой организации анатомических знаний.

Ключевым понятием медицины является понятие «нормы» – состояния объекта (субъекта), при котором достигается оптимум его функционирования, т. е. когда с наименьшими затратами обеспечивается необходимый эффект. Считается, что нормальные (оптимальные) объекты (случаи) составляют большинство от всех исследуемых объектов (случаев), исходя из формального предположения о том, что они наилучшим образом приспособлены к данным условиям существования. Это положение лежит в основе практически всех медицинских исследований, направленных на поиск «нормы» строения и функционирования человеческого организма в целом, его систем и структурно-функциональных элементов (СФЭ) этих систем. Природа, найдя оптимальное решение, начинает его тиражировать, создавая сложные комплексы из более простых СФЭ.

Сторонники сказанного считают, что для обнаружения морфометрического эталона и формулировки критерия нормального строения, достаточно провести точные измерения исследуемых структур и их статистический анализ. В этом ключе для анализа сосудистого русла как нельзя лучше подходит теория фрактальных (самоподобных) систем Бенуа Мандельброта. Термин «фрактал» введен им в 1975 г. и получил широкую известность с выходом в 1977 г. его книги «Фрактальная геометрия природы». Особую популярность фракталы обрели с развитием компьютерных технологий, позволивших эффектно их визуализировать. Авторы ряда работ

использовали фрактальную теорию для практических целей диагностики отклонений от нормального строения внутриорганных сосудистого русла [9–12]. При этом в качестве морфометрического эталона нормы использовали значение фрактальной размерности – характеристики, которая описывает сложность и степень заполненности пространства объектом, который не подчиняется традиционным представлениям о размерностях [13].

Несколько иной подход, но тоже базирующийся на теории фракталов или точнее псевдофракталов, использовали сторонники концептуальных моделей ветвлений сосудов (сегментарная, стволовая, дихотомическая) для поиска морфометрического эталона нормы строения внутриорганных сосудистого русла. Они представляли русло как систему взаимосвязанных СФЭ: сегментарная модель – сегменты, стволовая – стволы, дихотомическая – дихотомии (бифуркации) [14–16]. Наибольшее распространение получила дихотомическая модель, когда сосудистое русло трактовалось как система взаимосвязанных сосудистых разветвлений, состоящих из проксимального (материнского) сегмента, дистальных (дочерних) сегментов и точки их объединения. Основоположниками этого направления считаются Вильгельм Ру (W. Roux) и Сесил Мюррей (C.D. Murray) [17].

В. Ру считал, что нормальное сосудистое русло состоит из отдельных бифуркаций, построенных в соответствии с принципом оптимальности – «минимальных затрат», т. е. затрат биологического материала, израсходованного на построение бифуркации, и минимальной работы, необходимой для продвижения по ней крови. При этом бифуркации артерий под влиянием гемодинамического фактора принимают конфигурации, которые для данных условий являются наилучшими из всех возможных, т. е. оптимальными. С. Мюррей в своей работе подвел математический аппарат под эмпирические положения правил В. Ру. В дальнейшем предпринимались многочисленные попытки для того, чтобы на основании этих теорий найти универсальный морфометрический показатель, который можно использовать в

качестве морфометрического эталона и критерия нормального строения внутриорганный сосудистого русла [18].

В предыдущих работах на большом фактическом материале показано, что положение о том, что сосудистое русло построено в соответствии с принципом минимизации затрат пластического материала и энергии в реальных условиях, не всегда выполняется. Данный принцип не объясняет наличия магистральной и рассыпной форм; лепто- и эвриареального типов; «оптимальных» и «неоптимальных» дихотомий (бифуркаций); различных типов дихотомий и др.

С нашей точки зрения, основной ошибкой авторов вышеприведенных работ является то, что они не учитывали всех функций бифуркации как СФЭ сосудистого русла. Следовательно, найти морфометрический эталон и критерий нормы бифуркации ВАС, следуя данным принципам, не представляется возможным. Умозрительно можно предположить, что функции ВАС не ограничиваются только проведением крови с минимальными затратами. ВАС и их СФЭ служат также для распределения крови внутри органа и создания его «мягкого скелета» [19, 20], т. е. кроме проводящей они выполняют распределительную и опорную функции. Поэтому искать морфометрический эталон и критерий «нормы» строения бифуркации ВАС (в понимании оптимальности строения и функционирования СФЭ) следует с учетом всех возможных выполняемых ею функций, а именно: проводящей, распределяющей и опорной. Данное исследование призвано установить функциональные характеристики (проводящая, распределяющая, опорная) разных типов бифуркаций ВАС.

Анализ относительного количества бифуркаций ВАС разного типа показал (см. табл. 1), что наиболее многочисленной группой являются бифуркации 1-го типа (полная асимметрия) (61%) и 3-го типа (односторонняя симметрия) (34%). Общее относительное количество оставшихся типов бифуркаций 2-го типа (боковая асимметрия - 4%), 4-го типа (полная симметрия - 1%) составляет 5%. Вследствие этого логично предположить, что основная роль в выполнении функций по проведению и распределению крови внутри

селезенки, а также обеспечению опоры (созданию «мягкого скелета» органа) принадлежит бифуркациям ВАС 1-го типа, и в качестве морфометрического эталона нормы следует рассматривать характеристики этого типа бифуркации. Сказанное подтверждается последующим, более детальным анализом.

Обнаружено, что наибольшие размеры диаметров и длин проксимальных сегментов артерий характерны для бифуркаций 1-го типа (полная асимметрия), наименьшие – для 4-го типа (полная симметрия). Приведенные факты заставляют усомниться в том, что оптимальными (исходя из принципа минимальных затрат) являются бифуркации 1-го типа, поэтому далее была проведена сравнительная оценка значений показателей, количественно характеризующих проводящую, распределительную и опорную функции бифуркаций ВАС разного типа.

Сравнительный анализ величин гемодинамического сопротивления бифуркаций ВАС разного типа показал, что максимальной величиной проводящей способности обладают бифуркации ВАС 1-го (полная асимметрия) и 2-го типов (боковая асимметрия), минимальной – бифуркации 3-го (односторонняя симметрия) и 4-го типов (полная симметрия). Установленные факты не противоречат известному положению, которое вытекает из уравнения Хагена – Пуазейля (Hagen – Poiseuille) – трубка (в нашем случае сегмент артерии) с большим внутренним диаметром обладает меньшим сопротивлением току жидкости в сравнении с трубкой, имеющей меньший внутренний диаметр. При этом суммарное относительное количество бифуркаций 1-го и 2-го типов составляет 65% ($61\% + 4\% = 65\%$), а 3-го и 4-го типов - 35% ($34\% + 1\% = 35\%$), т. е. в 1,9 раза больше. Суммарная величина показателя гемодинамического сопротивления (обратная значению показателя, характеризующего проводящую функцию) бифуркаций 1-го и 2-го типов ($Z = 1672057 + 1907531 = 3\,579\,588$ Па/м), меньше значения соответствующего показателя бифуркаций 3-го и 4-го типов ($Z = 14914176 + 10830660 = 25\,744\,836$ Па/м) в 7,2 раза. Хотя подобного рода расчеты и не совсем правильные, можно предположить, что проведение крови внутри ВАС с минимальным гемодинамическим

сопротивлением является не единственной важной функцией бифуркации артерий.

Сказанное нацеливает на исследование величин показателей, характеризующих выполнение бифуркациями дополнительных функций. Умозрительно можно предположить, что таковыми являются распределительная и опорная функции. Путем сравнительного анализа значений показателей, характеризующих распределительную функцию, установлено, что бифуркации ВАС 1-го и 2-го типов распределяют кровь на большей площади, чем 3-го и 4-го типов. Суммарная *ПОП* бифуркаций 1-го и 2-го типов ($ПОП = 14,54 + 12,00 = 26,54 \text{ мм}^2$) примерно в 1,4 раза больше, чем величина соответствующего показателя 3-го и 4-го типов ($ПОП = 10,90 + 8,37 = 19,27 \text{ мм}^2$).

Результаты сравнительного анализа величин, характеризующих жесткость бифуркаций ВАС разного типа, свидетельствуют о том, что основную опорную функцию ВАС выполняют бифуркации 1-го типа, а бифуркации 2-го, 3-го и 4-го типов в данном случае играют вспомогательную роль. Значение показателя жесткости конструкции бифуркации 1-го типа ($Rb = 2331,2 \text{ Н/м}$) превосходит суммарную величину этого показателя бифуркаций 2-го, 3-го и 4-го типов ($Rb = 408,2 + 340,8 + 214,1 = 963,1 \text{ Н/м}$) в 2,4 раза.

Приведенные факты подтверждают то, что бифуркации ВАС разного типа ориентированы не только на проведение крови с минимальными затратами энергии. Не все бифуркации ВАС в равной степени принимают участие в выполнении различных функций (проводящая, распределительная и опорная). По всей видимости, основная роль в выполнении проводящей, распределительной и опорной функций принадлежит бифуркациям ВАС 1-го типа.

В порядке дискуссии

С целью поиска оптимальных (нормальных) бифуркаций ВАС был проведен сравнительный анализ рейтинговых значений показателей, количественно характеризующих массу, проводящую, распределительную и опорную функции бифуркаций ВАС разного типа (табл. 2).

Рейтинги составляли в порядке убывания для значений массы (m -р) и гемодинамического сопротивления (Z -р) и в порядке возрастания для величин, характеризующих $ПОП$ ($ПОП$ -р) и опорную функцию (Rb -р). Т. е. бифуркациям ВАС, имеющим минимальные значения m и Z , присваивали максимальный рейтинг (4), а самый низкий рейтинг (1) присваивали бифуркациям ВАС, имеющим наибольшие значения показателей массы и гемодинамического сопротивления. Бифуркациям ВАС с наибольшим значением показателей $ПОП$ и Rb присваивали наивысший рейтинг (4), с наименьшим значением – самый низкий рейтинг (1).

Делали это, руководствуясь следующими правилами:

1. В соответствии с принципом В. Ру (принцип минимальных затрат), оптимальные (нормальные) бифуркации должны иметь наименьшие значения массы и гемодинамического сопротивления.
2. К этому принципу добавили предположение о том, что оптимальные (нормальные) бифуркации должны иметь наибольший размер $ПОП$ и наибольшие величины показателя, характеризующего опорную функцию (жесткость конструкции).

Бифуркации ВАС разного типа были ранжированы в соответствии с принципом оптимальности В. Ру. Величину показателя, характеризующего «оптимальность Ру», рассчитывали как сумму рейтинговых оценок (рейтинг оптимальности Ру): $POP = Z\text{-р} + m\text{-р}$. Бифуркации ВАС, которые имеют более высокие значения показателя POP , считали более оптимальными (нормальными). В этом контексте наиболее оптимальными являются бифуркации ВАС 4-го типа ($POP = 6$), наименее оптимальными – 3-го типа ($POP = 4$). Значения POP бифуркаций 1-го и 2-го типов одинаковы и равны 5.

В последующем с учетом второго пункта рассуждений, приведенных выше, бифуркации ВАС разных типов были ранжированы в соответствии с суммарным рейтингом оптимальности (*CPO*) (см. табл. 2). Величину параметра *CPO* рассчитывали как сумму рейтинговых оценок: $CPO = POP + ПОП\text{-}p + R_b\text{-}p$. Бифуркации ВАС, имеющие большие значения *CPO*, считали наиболее оптимальными (нормальными). В соответствии с величиной *CPO*, наиболее оптимальными являются бифуркации ВАС 1-го типа ($CPO = 13$), наименее оптимальными - бифуркации ВАС 3-го ($CPO = 8$) и 4-го типов ($CPO = 8$), промежуточное положение в ряду величин исследуемых показателей занимает бифуркация ВАС 2-го типа со значением $CPO = 11$.

Таблица 2. Рейтинговые и абсолютные значения показателей, характеризующих функции (проводящая, распределительная, опорная) разных типов бифуркаций внутриорганных артерий селезенки

Table 2. Rating and absolute values of parameters characterising functions (conducting, distributive, pillar) of different types of splenic arterial vasculature

Типы бифурка- ции ВАС	Величины абсолютных и рейтинговых показателей									
	Масса бифуркации		Гемодинамическое сопротивление		<i>POP</i>	<i>ПОП</i>		Жесткость конструкции		<i>CPO</i>
	<i>m</i> (кг)	<i>m</i> -р	<i>Z</i> (Па/м)	<i>Z</i> -р		<i>ПОП</i> (мм ²)	<i>ПОП</i> -р	<i>R_b</i> (Н/м)	<i>R_b</i> -р	
ВАС 1-й тип	0,00024	1	1672057	4	5	14,54	4	29,8	4	13
ВАС 2-й тип	0,00006	2	1907531	3	5	12	3	3,8	3	11
ВАС 3-й тип	0,00002	3	14914176	1	4	10,9	2	2,5	2	8
ВАС 4-й тип	0,00001	4	10830660	2	6	8,37	1	1,6	1	8

Примечание: ВАС 1-й тип, полная асимметрия, $D \neq d_{\max} \neq d_{\min}$; ВАС 2-й тип, боковая асимметрия, $D = d_{\max}$ и $d_{\max} \neq d_{\min}$; ВАС 3-й тип, односторонняя симметрия, $D \neq d_{\max}$ и $d_{\max} = d_{\min}$; ВАС 4-й тип, полная симметрия, $D = d_{\max} = d_{\min}$; *m*, масса бифуркации (кг); *m*-р, рейтинговая оценка массы бифуркации; *Z*, гемодинамическое сопротивление (Па/м); *Z*-р, рейтинговая оценка гемодинамического сопротивления бифуркации; *POP*, рейтинговая оценка оптимальности бифуркации в соответствии с принципом Вильгельма Ру; *ПОП*, площадь области покрытия бифуркации (мм²); *ПОП*-р, рейтинговая оценка *ПОП* бифуркации; *R_b*, показатель жесткости под действием собственного веса и веса крови, которая находится внутри бифуркации (Н/м); *R_b*-р, рейтинговая оценка *R_b* бифуркации; *CPO*, суммарный рейтинг оптимальности бифуркации, $CPO = POP + ПОП\text{-}p + R_b\text{-}p$.

Если принять во внимание тот факт, что исследовали ВАС практически здоровых людей, критерии, которые были приняты во внимание при определении принципов оптимальности строения бифуркаций ВАС, практически в полной степени отражают выполняемые ими функции, а именно: проведение крови с минимальным гемодинамическим сопротивлением, максимально возможная площадь покрытия, максимальная жесткость конструкции, а также минимальная масса тканей, которая пошла на построение бифуркации. Морфофункциональные принципы оптимальности не являются универсальными для бифуркаций ВАС разного типа.

Выводы

1. Бифуркации ВАС разного типа в неравной степени принимают участие в выполнении проводящей, распределяющей и опорной функций.
2. Основная роль в выполнении функций по проведению и распределению крови внутри селезенки, а также обеспечению опоры принадлежит бифуркациям 1-го типа.
3. В качестве морфометрического эталона нормы ВАС можно использовать относительное количество бифуркаций разного типа, а также значения морфометрических показателей, характеризующих бифуркации 1-го типа.

Литература / References

1. Kopylova V., Boronovskiy S., Nartsissov Y. Approaches to vascular network, blood flow, and metabolite distribution modeling in brain tissue. *Biophys. Rev.* 2023;15(5):1335–1350. DOI: 10.1007/s12551-023-01106-0.
2. Мелькумянц А.М. О принципах оптимальности при построении сети артериальных сосудов скелетных мышц. *Успехи физиологических наук.* 2018;49(4):3–11. DOI: 10.7868/S030117981804001X.

Mel'kumyants A.M. On the principles of optimality in constructing a network of arterial vessels of skeletal muscles. *Advances in Physiological Sciences*. 2018;49(4):3–11. (In Russ). DOI: 10.7868/S030117981804001X.

3. Кафаров Э. С., Дадашев А. Ш., Милтых И. С., Зенин О. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2023620288. Российская Федерация. Количественная анатомия внутриорганный артериального русла селезенки : заявл. 23.12.2022 : опубли. 19.01.2023.

Kafarov E.S., Dadashev A.Sh., Milytkh I.S., Zenin O. Quantitative anatomy of the intraorgan arterial bed of the spleen. Certificate of state registration of the database No. 2023620288, 2022.

4. Зенін О.К., Нікітін О.В., Чвала О.О., Бешуля О.О., Томаш Д.С. Спеціальна комп'ютерна система моделювання артеріального кровоносного русла людини («Vasculograph»). Свідотство про реєстрацію авторського права на твір № 29585, 2009.

Zenin O.K., Nikitin O.V., Chvala O.O., Beshulya O.O., Tomas D.S. A special computer system for modeling the human arterial blood vessel ("Vasculograph"). Certificate of copyright registration for the work No. 29585, 2009. (In Ukr.).

5. Zheng C.H., Xu M., Huang C.M., Li P., Xie J.W., Wang J.B. et al. Anatomy and influence of the splenic artery in laparoscopic spleen-preserving splenic lymphadenectomy. *World J. Gastroenterol.* 2015;21(27):8389–8397. DOI: 10.3748/wjg.v21.i27.8389.

6. Cieri R.L., Turner M.L., Carney R.M., Falkingham P.L., Kirk A.M., Wang T. et al. Virtual and augmented reality: New tools for visualizing, analyzing, and communicating complex morphology. *J. Morphol.* 2021;282(12):1785–1800. DOI: 10.1002/jmor.21421.

7. Глотов В.А. Структурный анализ кровеносных сосудистых сетей: функциональная анатомия внутреннего просвета кровеносных сосудистых сетей, роль гемодинамического фактора и сил поверхностного натяжения в его формировании, аксиоматический подход. *Морфологический альманах имени В.Г. Ковешникова*. 2022;20(3):25–29.

- Glotov V.A. Structural analysis of blood vessel networks: functional anatomy of the inner lumen of blood vessel networks, the role of haemodynamic factor and surface tension forces in its formation, axiomatic approach. *Morphological Almanac named after V.G. Koveshnikov*. 2022;20(3):25–29. (In Russ.).
8. Owen B., Bojdo N., Jivkov A., Keavney B., Revell A. Structural modelling of the cardiovascular system. *Biomech. Model. Mechanobiol.* 2018;17(5):1217–1242. DOI: 10.1007/s10237-018-1024-9
 9. Che Azemin M.Z., Ab Hamid F., Aminuddin A., Wang J.J., Kawasaki R., Kumar D.K. Age-related rarefaction in retinal vasculature is not linear. *Exp. Eye Res.* 2013;116:355–358. DOI: 10.1016/j.exer.2013.10.010.
 10. Bassoli E., Denti L., Gatto A., Spaletta G., Sofroniou M., Parrilli A. et al. A planar fractal analysis of the arterial tree of the human thyroid gland: Implications for additive manufacturing of 3D ramified scaffolds. In: Bartolo P.J., Soares de Lemos A.C., Pereira A.M.H., Santos Mateus A.R., Ramos C., Santos C. et al., editors. *High Value Manufacturing. Advanced Research in Virtual and Rapid Prototyping*. London: Taylor & Francis Group; 2014:423–428.
 11. Bassoli E., Denti L., Gatto A., Spaletta G., Sofroniou M., Parrilli A. et al. Towards additive manufacturing of ramified scaffolds of the thyroid vascular system: A preliminary fractal analysis. *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*. 2018;9(8):429–437. <https://iaeme.com/Home/journal/IJMET> (13.09.2024).
 12. Wang R., Li P., Pan Q., Li J.K.J., Kuebler W.M., Pries A.R. et al. Investigation into the diversity in the fractal dimensions of arterioles and venules in a microvascular network – A quantitative analysis. *Microvasc. Res.* 2019;125:103882. DOI: 10.1016/j.mvr.2019.103882.
 13. Bandt C. Introduction to fractals. In: Bandt C., Barnsley M., Devaney R., Falconer K., Kannan V., Kumar P.B., V. (eds.). *Fractals, Wavelets, and their Applications*. Springer Proceedings in Mathematics & Statistics. Vol. 92. Springer, Cham.; 2014:3–19. DOI: 10.1007/978-3-319-08105-2_1.

14. Arciero J.C., Causin P., Malgaroli F. Mathematical methods for modeling the microcirculation. *Biophysics*. 2017;4(3):362–399. DOI: 10.3934/biophy.2017.3.362
15. Blanco P.J., de Queiroz R. A., Feijóo R.A. A computational approach to generate concurrent arterial networks in vascular territories. *Int. J. Numer. Method. Biomed. Eng.* 2013;29(5):601–614. DOI: 10.1002/cnm.2547.
16. Augustin C.M., Gsell M.A.F., Karabelas E., Willemen E., Prinzen F.W., Lumens J., Vigmond E.J. et al. A computationally efficient physiologically comprehensive 3D–0D closed-loop model of the heart and circulation. *Comput. Meth. Appl. Mech. Eng.* 2021;386:114092. DOI: 10.1016/j.cma.2021.114092.
17. Murray C.D. The physiological principle of minimum work applied to the angle of branching of arteries. *J. Gen. Physiol.* 1926;9(6):835–841. DOI: 10/dq9qn9.
18. Hagmeijer R., Venner C.H. Critical review of Murray’s theory for optimal branching in fluidic networks. arXiv. Published online; 2018. DOI: 10.48550/arXiv.1812.09706.
19. Crandall C.L., Lin C.J., Wagenseil J.E. Major vascular ECM components, differential distribution supporting structure, and functions of the vasculome. In: Galis Z.J. (ed.) *The Vasculome: From Many, One*. Elsevier; 2022:77–86. DOI: 10.1016/B978-0-12-822546-2.00010-1.
20. Valaris S., Kostourou V. Cell–Extracellular Matrix Adhesions in Vascular Endothelium. In: Papadimitriou E., Mikelis C.M. (eds.). *matrix pathobiology and angiogenesis*. Vol. 12. *Biology of extracellular matrix*. Springer International Publishing; 2023:175–204. DOI: 10.1007/978-3-031-19616-4_7.

Информация о вкладе авторов

Дадашев А.Ш. – разработка дизайна исследования, написание текста.

Кафаров Э.С. – анализ результатов работы, взаимодействие со структурными подразделениями, написание текста.

Зенин О.К. – литературный обзор, анализ современного состояния проблемы (фундаментальная часть), написание текста.

Милтых И.С. – воплощение представленного метода моделирования, написание текста.

Information on the author's contribution

Dadashev A.S. – research design, writing the manuscript.

Kafarov E.S. – analysis of work results, interaction with structural units, writing the manuscript.

Zenin O.K. – literature review, analysis of the current state of the problem (fundamental part), writing the manuscript.

Miltykh I.S. – embodiment of the presented modeling method, writing the manuscript.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of Interests: authors declare no conflict of interests.

Сведения об авторах

Дадашев Али Шарудиевич, аспирант кафедры «Нормальная и топографическая анатомия с оперативной хирургией», ассистент, ЧГУ, Грозный, <http://orcid.org/0000-0001-8502-0841>.

E-mail: mukulatura95@mail.ru.

Кафаров Эдгар Сабирович, д-р мед. наук, доцент, заведующий кафедрой «Нормальная и топографическая анатомия с оперативной хирургией», ЧГУ, Грозный, <http://orcid.org/0000-0001-9735-9981>.

E-mail: Edgar-kafaroff@yandex.ru.

Зенин Олег Константинович, д-р мед. наук, профессор, профессор кафедры «Анатомия человека», ПГУ, Пенза, <http://orcid.org/0000-0002-5447-1989>.

E-mail: zen.olegz@gmail.com.

Милтых Илья Сергеевич, студент, Медицинский институт ПГУ, Пенза.

<http://orcid.org/0000-0002-9130-3255>.

E-mail: i.miltykh@pnzgu.ru.

Зенин Олег Константинович, e-mail: zen.olegz@gmail.com.

Information about the authors

Ali S. Dadashev, Graduate Student, Department of Normal and Topographical Anatomy with Operative Surgery, Assistant, CSU, Grozny, Russian Federation, <http://orcid.org/0000-0001-8502-0841>.

E-mail: mukulatura95@mail.ru.

Edgar S. Kafarov, Dr. Sc. (Med.), Associate Professor, Head of the Department of Normal and Topographical Anatomy with Operative Surgery, CSU, Grozny, Russian Federation, <http://orcid.org/000-0001-9735-9981>.

E-mail: Edgar-kafaroff@yandex.ru.

Oleg K. Zenin, Dr. Sc. (Med.), Professor, Department of Human Anatomy, PSU, Penza, Russian Federation. <http://orcid.org/0000-0002-5447-1989>.

E-mail: zen.olegz@gmail.com.

Ilia S. Miltykh, Student, Medical Institute, PSU, Penza, Russian Federation, <http://orcid.org/0000-0002-9130-3255>.

E-mail: i.miltykh@pnzgu.ru.

Поступила 21.06.2024;
рецензия получена 09.09.2024;
принята к публикации.

Received 21.06.2024;
review received 09.09.2024;
accepted for publication.