УДК 616.149.4 DOI: 10.18699/SSMJ20240308

Оригинальное исследование / Research article

Морфометрические особенности структурных компонентов внутриорганного венозного русла селезенки как фрактальной системы

А.Ш. Дадашев[1], И.С. Милтых[2], О.К. Зенин[2], Э.С. Кафаров[1]

[1] Чеченский государственный университет имени А.А. Кадырова
364093, г. Грозный, ул. Шерипова, 32
[2] Пензенский государственный университет
440026, г. Пенза, ул. Красная, 40

Резюме

Цель исследования – установить морфометрические особенности различного вида структурных компонентов (биюнитов, BU) внутриорганного венозного русла селезенки (ВВРС) у лиц разного пола и возраста. **Материал и методы.** В основу работы положены результаты морфометрического исследования коррозионных препаратов ВВРС 64 человек (32 мужчины, 32 женщины) в возрасте от 21 до 60 лет (32 – первого периода зрелого возраста, 32 – второго периода зрелого возраста), умерших от внезапной смерти и случайных причин. Работа проведена с соблюдением этических принципов, включая Хельсинкскую декларацию Всемирной медицинской ассоциации. Измеряли диаметры (D) и длины (L) венозных сегментов, составляющих BU. ВВРС представляли как систему, состоящую из трех видов BU: 1 BU — диаметр проксимального сегмента (D) меньше суммы диаметров связанных с ним дистальных сегментов (d_{max} и d_{min}), $D < d_{max} + d_{min}$; 0 BU – $D = d_{max} + d_{min}$; 2 BU – $D > d_{max} + d_{min}$. **Результаты.** Установлено присутствие в составе ВВРС всех трех видов BU; наличие достоверной связи между относительным количеством BU разного вида, полом и возрастной группой; определены размеры всех трех видов BU. Наибольшие размеры имеет 1 BU, наименьшие – 0 BU; 0 BU являются самыми симметричными, 2 BU – самыми асимметричными; относительное количество 1 BU уменьшается, 0 BU увеличивается, а 2 BU практически не меняется в направлении от проксимальных участков русла к дистальным. BU 1-го вида обладают наибольшим диаметром проксимальных сегментов, в то время как BU 2-го вида занимают среднее положение в ряду значений исследуемых показателей. Наименьший диаметр принадлежит BU 0-го вида. Что касается длины сегментов L, максимальные значения характерны для 1 BU, минимальные – для 2 BU, среднее положение в ряду занимают 0 BU. **Заключение.** Полученные результаты могут служить фундаментом для создания морфометрического эталона ВВРС и должны учитываться при его численном моделировании.

Ключевые слова: селезенка, морфометрия, венозное русло, структурный компонент.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
Автор для переписки: Зенин О.К., e-mail: zen.olegz@gmail.com
Для цитирования: Дадашев А.Ш., Милтых И.С., Зенин О.К., Кафаров Э.С. Морфометрические особенности структурных компонентов внутриорганного венозного русла селезенки как фрактальной системы. *Сибирский научный медицинский журнал*. 2024;44(3):78–85. doi: 10.18699/SSMJ20240308

Morphometric features of the venous vasculature in spleen as a fractal system

A.Sh. Dadashev[1], I.S. Miltykh[2], O.K. Zenin[2], E.S. Kafarov[1]

[1] Kadyrov Chechen State University
364093, Grozny, Sheripova st., 32
[2] Penza State University
440026, Penza, Krasnaya st., 40

Abstract

The aim of the study is to determine the morphometric features of splenic vasculature structural components (biounits, BU) of various kinds in individuals of different sex and age. **Material and methods.** The paper is based on the results of morphometric study of corrosion casts of splenic venous vasculature of 64 people (32 men, 32 women) at the age of 21 to 60 years (32 first period of adulthood, 32 second period of adulthood), deceased from sudden death and accidental causes. The study was conducted in compliance with ethical principles, including the World Medical Association's Declaration of Helsinki. The diameters (D) and lengths (L) of the venous segments constituting BU were measured. Splenic venous vasculature was represented as a system consisting of three types of BU: 1 BU – the proximal segment diameter (D) is less than the sum of the diameters of distal segments (d_{max} and d_{min}) associated with it, $D < d_{max} + d_{min}$; 0 BU – $D = d_{max} + d_{min}$; 2 BU – $D > d_{max} + d_{min}$. **Results.** All three kinds of BUs were identified; there was a significant relationship between the relative number of BUs of different kinds, sex and age group; the sizes of all three kinds of BUs were determined; 1 BU was the largest and 0 BU was the smallest; 0 BU was the most symmetrical and 2 BU was the most asymmetrical; the relative number of 1 BU decreased, 0 BU increased, and 2 BU practically did not change in the direction from proximal to distal parts of the channel. BUs of the 1st kind have the largest diameter of proximal segments, while 2 BUs occupy the middle position in the range of values of the investigated parameters. The smallest diameter belongs to 0 BU. As for the length of segments L, the maximum values are typical for 1 BU, the minimum – for 2 BU, and the middle position in the series is occupied by 0 BU. **Conclusions.** The results obtained can serve as a foundation for the creation of a morphometric standard of splenic venous vasculature, and should be considered in its numerical modelling.

Key words: spleen, morphometry, venous bed, structural component.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Correspondence author: Zenin O.K., e-mail: zen.olegz@gmail.com

Citation: Dadashev A.Sh., Miltykh I.S., Zenin O.K., Kafarov E.S. Morphometric features of the venous vasculature in spleen as a fractal system. *Sibirskij nauchnyj medicinskij zhurnal = Siberian Scientific Medical Journal.* 2024;44(3):78–85. [In Russian]. doi: 10.18699/SSMJ20240308

Введение

В связи с ростом травматических повреждений селезенки, особенно у лиц социально активного возраста – первого и второго периодов зрелого возраста (от 21 до 60 лет), остро стоит вопрос о разработке и проведении органсберегающих (частичная резекция поврежденных тканей) операций [1]. Кроме того, активно обсуждается проблема ранней объективной диагностики патологии селезенки, основанной на поиске количественных критериев нормы. Разработка подобного рода методик невозможна без основательного теоретического изучения, каковым является морфологическое исследование внутриорганного сосудистого (артериального и венозного) русла селезенки [2, 3]. Следует добавить, что исследованию внутриорганного венозного русла селезенки (ВВРС) уделяется незаслуженно мало внимания.

В современной морфологии наметилось перспективное направление — исследование внутриорганных сосудистых русел различных органов человека как фрактальной или квазифрактальной системы [4, 5]. Предложены концептуальные модели, позволяющие количественно описывать особенности сосудистых русел. По мнению авторов работы [6], такой подход будет способствовать созданию морфометрического эталона внутриорганного сосудистого русла, что поможет объективной диагностике возможных отклонений от нормального строения. Одной из моделей описания особенностей сосудистых русел является дихотомическая, т.е. представление русла как структуры, состоящей из взаимосвязанных бифуркаций. Применительно к венозному руслу, в частности к ВВРС, его можно представить как систему, состоящую из взаимосвязанных дистальных и проксимальных сосудистых сегментов. По аналогии с дихотомической моделью артериальных русел, венозное русло состоит из отдельных структурных компонентов, «двойных объединений» (биюнитов (BU), от лат. bi – двойной, unitum – объединенный) венозных сегментов, т.е. структур, состоящих из двух дистальных сегментов (корней), одного проксимального (вновь образовавшегося венозного сегмента) и точки их объединения. При этом под венозным сегментом подразумевается участок венозного русла между ближайшими точками соединения (объединения).

Можно предположить, что ВВРС неоднородно по составу своих морфологических компонентов и состоит из структурно различных BU. Умозрительно их можно разделить на три вида: 1-й вид – величина внутреннего диаметра проксимального сегмента (D) меньше суммы внутренних диаметров дистальных сегментов (d_{max} и d_{min}), $D < d_{max} + d_{min}$; 0-й вид – $D = d_{max} + d_{min}$; 2-й вид – $D > d_{max} + d_{min}$. Исследование морфометрических

особенностей различного вида этих структурных компонентов ВВРС у лиц разного пола и возраста и явилось целью данного исследования.

Материал и методы

На коррозионных препаратах исследованы ВВРС 64 человек, умерших от внезапной смерти и случайных причин в возрасте от 21 до 60 лет. Работа проведена с соблюдением этических принципов, включая Хельсинкскую декларацию Всемирной медицинской ассоциации (экспертная оценка локального этического комитета при Медицинском институте ФГБОУ ВО «Чеченский государственный университет им. А.А. Кадырова», протокол № 258/24-77 от 16.10.2023). Использована возрастная периодизация, принятая на VII Всесоюзной конференции по проблемам возрастной морфологии, физиологии и биохимии в 1965 г.

Для изготовления коррозионных препаратов забор секционного материала проводили в соответствии со следующими критериями: селезенки, полученные на аутопсии 64 человек (32 мужчин, 32 женщин) в возрасте от 21 до 60 лет (32 – первого периода зрелого возраста, 32 – второго периода зрелого возраста), умерших от внезапной смерти и случайных причин, не связанных с патологией селезенки и сосудистого русла; масса селезенки 150–190 г, отсутствие внешних повреждений. Критерии исключения: возраст пострадавших меньше 21 и больше 60 лет; механические повреждения органа; в анамнезе заболевания селезенки, крови, органов кроветворения и иные системные заболевания и/или состояния; визуально обнаруженные деформации и аномалии сосудистого русла. Регистрировали пол, возраст, дату смерти, причину смерти, номер протокола вскрытия, дату вскрытия, дату эксперимента, массу органа. Коррозионные препараты ВВРС изготавливали по стандартной методике: после установления факта смерти в течение 24 ч, во время вскрытия ВВРС промывали через селезеночную вену 0,9%-м раствором NaCl в течение 40–45 минут под давлением 80–90 мм рт. ст. и затем помещали в сосуд, заполненный 0,9%-м раствором NaCl, чтобы предотвратить деформацию органа под действием силы тяжести. В венозное русло вводили рентгеноконтрастную смесь, контейнер с селезенкой инкубировали при температуре 36 °C в течение 24 ч, затем погружали в раствор полноводной щелочи на 3–4 дня в термостат при температуре 36 °C. После этого промывали коррозионный слепок водопроводной водой до полного удаления возможных остатков мягких тканей [7].

Русло было представлено в виде связанных графов, где вершины соответствовали точкам объединения (слияния), а ребра – венозным сегментам. Вершины графа нумеровали произвольно и одинаково для всех исследованных случаев [6]. Для каждого венозного сегмента коррозионных препаратов ВВРС были измерены диаметр (D) сегмента в его центральной части (на середине расстояния между ближайшими точками объединения) и длина (L), определяемая как кратчайшее расстояние между двумя ближайшими точками объединения, с точностью измерения до 0,01 мм. Минимальный диаметр слепков сегментов, измеренный по данной методике, составил 0,1 мм. Полученные данные заносились в специальные таблицы, в которых фиксировали номер протокола, возрастную группу (первый или второй период зрелого возраста), пол, условный адрес начала сегмента, условный адрес конца сегмента, D (мм) и L (мм).

Слепки ВВРС сканировали на микротомографе SkyScan 1178 (Bruker, США) и анализировали с помощью программного пакета blender с надстройкой NeuroMorph Measuring tools [8]. Для характеристики конструкции на основании данных морфометрии определяли величины следующих показателей [6]:

– Gr – номер генерации – порядковый номер вновь образовавшейся группы вен, к которой относится данный сегмент (под «веной» подразумевали линейную конструкцию, состоящую из дистальных сегментов с большим внутренним диаметром);

– i – уровень деления – вновь образовавшийся ряд венозных сегментов;

– FF1 – фактор формы, $FF1 = \frac{2L}{D}$

– η – коэффициент ветвления, $\eta = \frac{d_{\max}^2 + d_{\min}^2}{D^2}$;

– γ – коэффициент асимметрии, $\gamma = \left(\frac{d_{\min}}{d_{\max}}\right)^2$.

Для получения представительной выборки использовали методику многоэтапной гнездовой выборки по Г.Г. Автандилову [9].

Для определения характера распределения величин исследуемых показателей использовали критерий Колмогорова – Смирнова, для оценки различий в группах – критерий Краскела – Уоллиса для независимых выборок. В ходе работы определяли медиану (Me), ее 95%-й доверительный интервал ([95 % ДИ]) и относительное количество категориальных величин на разных генерациях и уровнях деления. Статистический анализ проведен с использованием языка R [10].

Результаты и их обсуждение

Общее число исследованных BU ВВРС (рис. 1) составило 6917, они располагались на 24 уровнях деления и составляли 9 генераций. Установлено, что характер распределения величин всех изучаемых показателей, абсолютных (*D* и *L*) и относительных (FF1, η, γ), отличается от нормального.

Затем в соответствии с целью исследования все BU были разделены на три вида, как указано выше. Установлено, что в структуре ВВРС (рис. 2, *а*) преобладают BU 0-го вида, менее всего представлены BU 2-го вида, промежуточное положение занимают BU 1-го вида. Относительное количество BU 1-го и 2-го вида в составе ВВРС мужчин несколько больше, чем в составе ВВРС женщин, в отличие от числа BU 0-го вида (рис. 2, *б*). BU 1-го и 2-го вида преобладают в составе ВВРС лиц 2-го зрелого возраста в сравнении с ВВРС лиц 1-го зрелого возраста, тогда как относительное количество BU 0-го вида больше в составе ВВРС лиц 1-го зрелого возраста, чем в составе ВВРС лиц 2-го зрелого возраста (рис. 2, *в*). Полученные результаты убедительно свидетельствуют о наличии всех трех видов BU ВВРС. Установлена связь между относительным количеством BU разного вида, полом и возрастной группой.

На следующем этапе исследования были определены величины изучаемых морфометрических показателей различных видов BU ВВРС. Наибольшим диаметром проксимальных сегментов обладают BU 1-го вида (0,8 [0,8; 0,9] мм; среднее положение в ряду значений исследуемых показателей занимают BU 2-го вида (0,6 [0,6; 0,8] мм); наименьшее значение у BU 0-го вида (0,3 [0,3; 0,4] мм) (p = 0,0001, здесь и далее по тексту пользовались критерием Краскела – Уоллиса для независимых выборок). Максимальные значения длин сегментов *L* характерны для BU 1-го вида (3,1 [3,1; 3,2] мм), минимальные – для BU 2-го вида (2,8 [2,7; 3,0] мм), среднее положение в ряду занимают BU 0-го вида (3,0 [3,0; 3,1] мм) (p = 0,0001). Наибольшая величина фактора формы FF1 у BU 0-го вида, средняя – у BU 2-го вида, наименьшая характерна для BU 1-го вида (16,67 [16,40; 17,5], 7,81 [7,33; 8,33], 7,75 [7,43; 8,00] соответственно, p = 0,0001). В ряду значений η максимальной величиной обладают BU 1-го вида, среднее положение занимают BU 0-го вида, минимальное значение характерно для BU 2-го вида (0,89 [0,89; 0,91], 0,50 [0,50; 0,50] и 0,31 [0,31; 0,35] соответственно, p = 0,0001). Наибольшая величина коэффициента симметрии характерна для BU 0-го вида, среднее значение – у BU 1-го вида, а наименьшее – у BU 2-го вида (1,00 [1,00; 1,00], 0,51 [0,47; 0,56] и 0,25 [0,25; 0,44] соответственно, p = 0,0001). Таким образом, самые большие размеры имеет BU 1-го вида, а самые маленькие – BU 0-го вида. При этом BU 0-го вида являются самыми симметричными, а BU 2-го вида – самыми асимметричными. Установленные факты следует использовать при численном моделировании ВВРС человека и создании морфометрического эталона нормы рассматриваемого объекта.

На заключительном этапе был проведен анализ расположения различных видов BU на разных номерах генераций и уровнях деления ВВРС (рис. 3). С увеличением номера генерации относительное количество BU 1-го вида заметно уменьшается, BU 0-го вида увеличивается, а BU

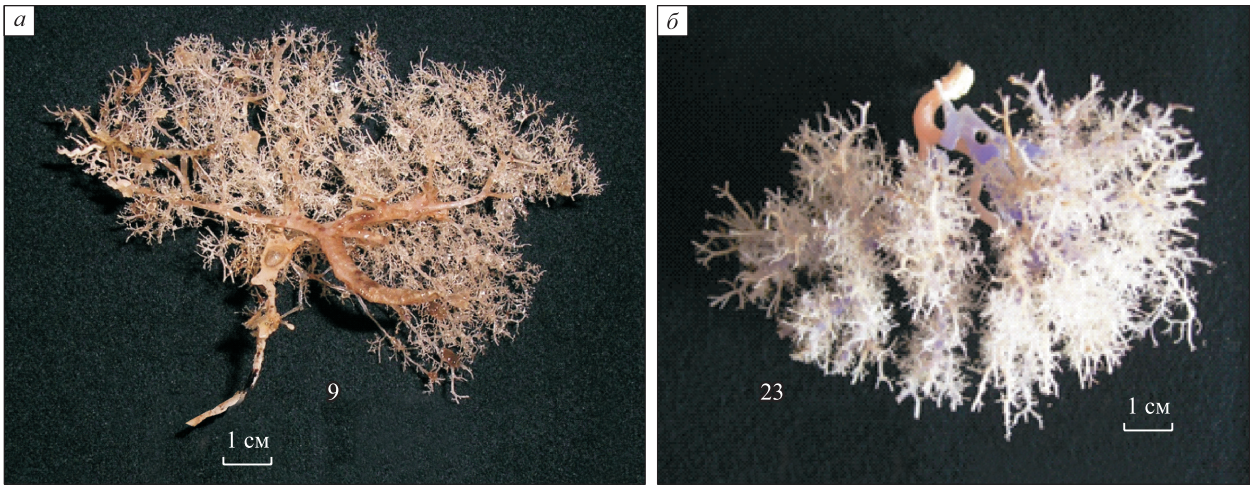

Рис. 1. *Коррозионные препараты внутриорганного венозного русла селезенки мужчин (а) и женщин (б) первого зрелого возраста*

Fig. 1. *Corrosion cast of splenic venous vasculature of men (a) and women (б) of first period of adulthood*

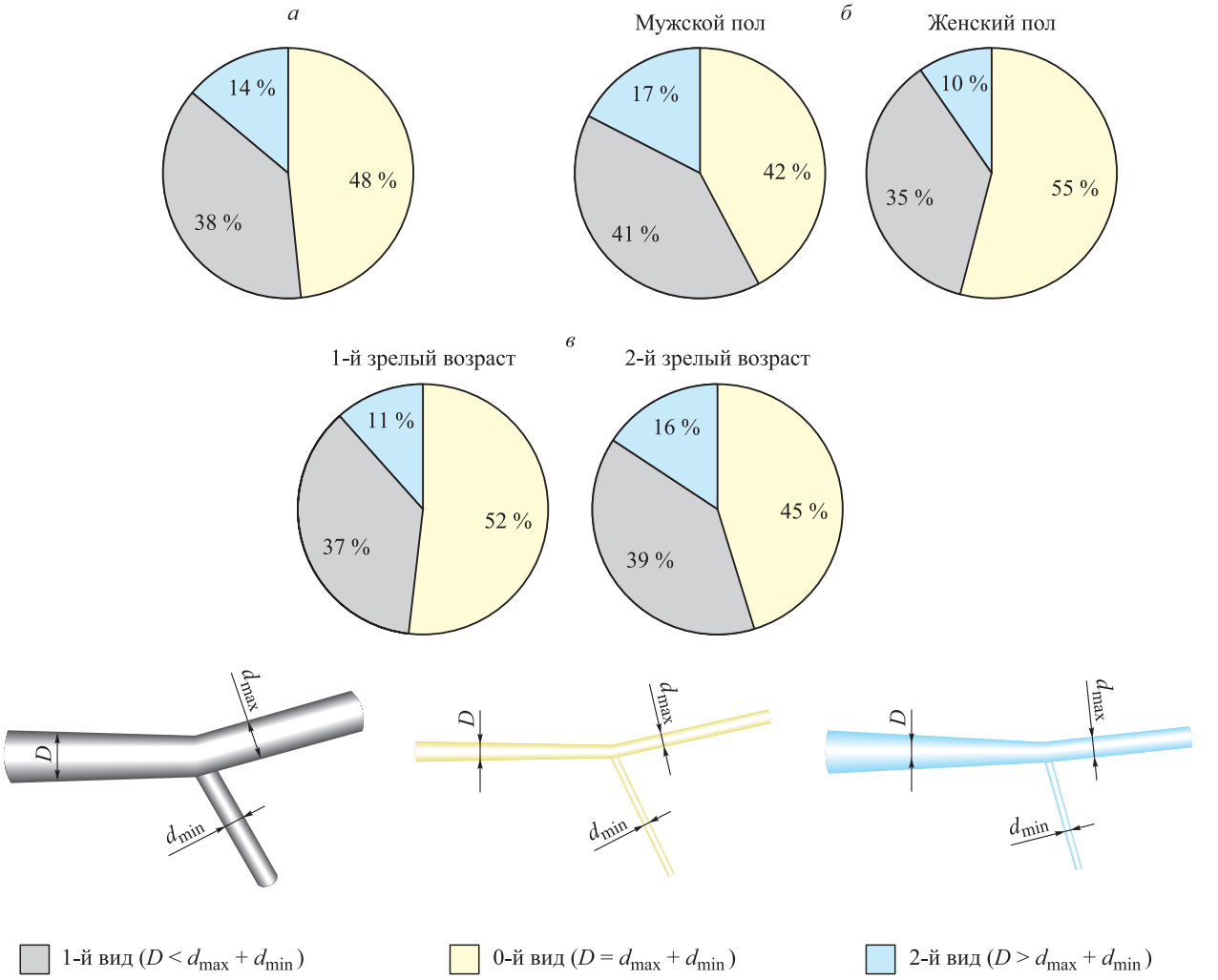

Рис. 2. *Относительное количество разных видов BU, входящих в состав коррозионных препаратов ВВРС (а), по половым (б) и возрастным (в) группам*

Fig. 2. *Relative number of various kinds of BU in splenic venous vasculature corrosion casts (a) in sex (б) and age (в) groups*

2-го вида практически не меняется. Похожая картина наблюдается для расположения BU различного вида до 12–13-го уровня деления. Шестой уровень деления и второй – третий номер генерации, являются «ключевой точкой», где относительное количество BU 1-го и 0-го вида одинаково. По всей видимости, она играет важную роль в функционировании всего ВВРС и может служить в качестве основного диагностического объекта. Морфометрические характеристики BU в данной топографической точке, а также ее расположение, вероятно, можно использовать в качестве морфометрического эталона. Т.е. смещение точки пересечения кривых, описывающих относительное количество BU 1-го и 0-го вида, может быть расценено как отклонение от нормы строения ВВРС.

Проблема поиска морфометрического эталона и, на его основе, морфометрического критерия нормы сосудистых русел внутренних органов человека является одной из ключевых задач современной медицины. Сегодня одним из перспективных направлений поиска является исследование внутриорганных сосудистых русел различных органов человека как фрактальной или квазифрактальной системы [5, 6]. Предложены концептуальные модели, позволяющие количественно описывать их особенности (сегментарная, дихотомическая, стволовая) [5, 6]. Русла рассматривают как систему, состоящую из самоподобных, определенным образом взаимосвязанных структурных компонентов – сосудистых сегментов (сегментарная модель), бифуркаций (дихотомическая), стволов (стволовая). Такой подход позволяет не только определить морфометрический эталон, но и по проксимальным участкам сосудистого русла, т.е. участкам, доступным

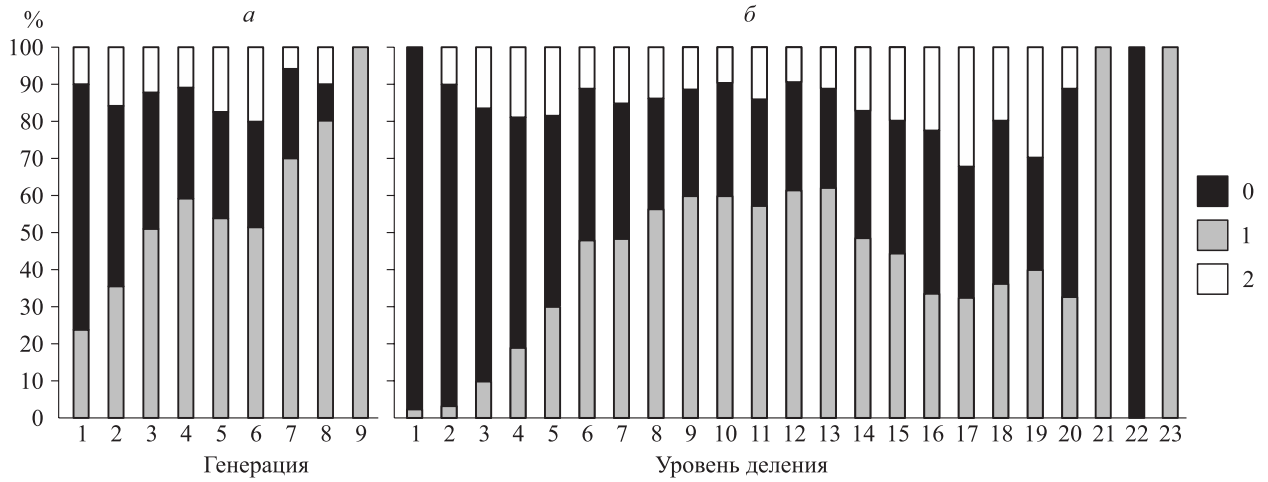

Рис. 3. *Расположение разных видов BU ВВРС по номерам генерации (а) и уровням деления (б), результаты морфометрии коррозионных препаратов: 0, 1, 2 – BU 0-го, 1-го, 2-го вида соответственно*

Fig. 3. *Arrangement of various kinds of splenic venous vasculature's BUs by generation (a) and division level (б) according to corrosion casts morphometry*

для исследования современными лучевыми методами, полностью восстановить путем численного моделирования [11–14] его структуру до дистального – гемомикроциркуляторного – уровня деления. Наибольшее распространение получила дихотомическая модель сосудистого русла. Широко известны работы W. Roux, C.D. Murray, H.B.M. Uylings, M. Zamir, R. Rozen, посвященные этому вопросу [15–19]; будет уместным напомнить, что авторы вышеназванных работ рассматривали сосудистое русло, а точнее артериальное, как систему, состоящую из идеальных («оптимальных») бифуркаций, ориентированных на проведение крови с минимальными затратами [20]. В настоящей работе сделана попытка использовать подобную методику для исследования ВВРС. Известно, что дистальные артериальные сегменты формируются путем деления проксимальных, в то время как венозные проксимальные сегменты образуются путем объединения (слияния) дистальных венозных. Поэтому мы сочли возможным рассматривать в качестве структурных компонентов (фракталов) не разветвления сосудистых сегментов – бифуркации (дихотомии), а их объединения, которые мы назвали биюнитами (BU).

Описанные факты, возможно, характерны только для ВВРС человека. Известно, что различные паренхиматозные органы выполняют разные функции, и, следовательно, структура внутриорганных русел и составляющих их структурных элементов может быть различна. Умозрительно можно предположить, что самым высоким сопротивлением току крови обладают BU ВВРС 1-го вида, а самым низким – BU ВВРС 2-го или 0-го вида, и что функции, выполняемые BU ВВРС разных видов, не ограничиваются только проведением крови с наименьшими затратами. Проверить истинность сделанных предположений могло бы помочь специальное исследование. Сказанное нацеливает на проведение сравнительного количественного анализа всего возможного спектра выполняемых BU разных видов функций. Это может быть проведение и распределение крови, а также функция опоры. Необходимо осуществить подобные исследования в отношении внутриорганных венозных русел других паренхиматозных органов, например, почки и печени. Результаты настоящей работы могут помочь при разработке новых методов диагностики и лечения заболеваний селезенки, благодаря детальному пониманию структуры его внутриорганного венозного русла. Морфометрический эталон ВВРС может быть использован для создания морфометрического критерия нормы строения ВВРС, что будет способствовать объективной диагностике патологии селезенки. Кроме того, полученные результаты будут способствовать созданию более точных компьютерных (виртуальных) моделей ВВРС и их использованию в научных исследованиях и педагогическом процессе.

Важно отметить, что настоящая работа является лишь первым шагом на пути изучения количественной анатомии и функционирования ВВРС как фрактальной или квазифрактальной системы, состоящей из взаимосвязанных структурных компонентов – венозных BU. Дальнейшие исследования необходимы для подтверждения или

отрицания гипотезы о функциональном различии разных видов венозных BU, а также других аспектов строения и функции ВВРС человека.

Заключение

Результаты исследования количественной анатомии ВВРС человека как системы взаимосвязанных структурных компонентов различного вида у лиц обоего пола, первого и второго периодов зрелого возраста расширяют научные представления о морфометрических особенностях этого органа иммунной системы, что позволяет сделать важный шаг на пути создания морфометрического эталона нормы рассматриваемого объекта. Показано, что в структуре ВВРС человека наиболее распространены BU 0-го вида, составляющие 48 % от общего числа, реже всего встречаются BU 2-го вида (14 %), а BU 1-го вида занимают промежуточное положение (38 %). BU 1-го вида обладают наибольшим диаметром проксимальных сегментов, BU 2-го вида занимают среднее положение, наименьший диаметр принадлежит BU 0-го вида. Что касается длины сегментов *L*, максимальные значения характерны для BU 1-го вида, минимальные – для BU 2-го вида, промежуточные – для BU 0-го вида. Также обнаружено, что распределение BU различается в зависимости от пола и возраста: BU 1-го и 2-го вида чаще встречаются у мужчин, в то время как BU 0-го преобладают у женщин; BU 1-го и 2-го вида более характерны для лиц 2-го зрелого возраста, а BU 0-го вида – для лиц 1-го зрелого возраста.

Список литературы / References

1. Costi R., Castro Ruiz C., Romboli A., Wind P., Violi V., Zarzavadjian Le Bian A. Partial splenectomy: Who, when and how. A systematic review of the 2130 published cases. *J. Pediatr. Surg*. 2019;54(8):1527–1538. doi: 10.1016/j.jpedsurg.2018.11.010

2. Redmond H.P., Redmond J.M., Rooney B.P., Duignan J.P., Bouchier-Hayes D.J. Surgical anatomy of the human spleen. *Br. J. Surg*. 1989;76(2):198–201. doi: 10.1002/bjs.1800760230

3. Kothari P., Kumar A., Deshmukh A., Meisheri I. Splenic artery embolisation for portal hypertention in children. *Afr. J. Paediatr. Surg*. 2010;7(2):86. doi: 10.4103/0189-6725.62854

4. Dokoumetzidis A., Macheras P. A model for transport and dispersion in the circulatory system based on the vascular fractal tree. *Ann. Biomed. Eng*. 2003;31(3):284–293. doi: 10.1114/1.1555627

5. Dmitriev A., Dovgiallo Y., Zenin O. Conceptional models of the tree-shape arterial bed. *Scr. Sci. Medica*. 2008;40:47–49.

6. Зенин О.К., Милтых И.С., Дмитриев А.В., Юрченко О.О. Морфометрический анализ применимости уравнений Murray C.D. для численного моделирования сосудистых дихотомий почки человека. *Sib. J. Life Sci. Agric*. 2021;13(3):170–192. doi: 10.12731/2658-6649-2021-13-3-170-192

Zenin O.K., Miltykh I.S., Dmitriev A.V., Iurchenko O.O. Morphometric analysis of C.D. Murray`s law appliance for numerical modeling of vascular dichotomies of kidneys. *Sib. J. Life Sci. Agric*. 2021;13(3):170–192. [In Russian]. doi: 10.12731/2658-6649-2021-13-3-170-192

7. Kafarov E.S., Miltykh I., Dmitriev A.V., Zenin O.K. Anatomical variability of kidney arterial vasculature based on zonal and segmental topography. *Heliyon*. 2023;9(4):e15315. doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e15315

8. Jorstad A., Nigro B., Cali C., Wawrzyniak M., Fua P., Knott G. NeuroMorph: A toolset for the morphometric analysis and visualization of 3D models derived from electron microscopy image stacks. *Neuroinformatics*. 2015;13(1):83–92. doi: 10.1007/s12021-014-9242-5

9. Автандилов Г.Г. Основы количественной патологической анатомии. М.: Медицина, 2002. 237 с.

Avtandilov G.G. Fundamentals of quantitative pathological anatomy. Moscow: Meditsina, 2002. 237 p. [In Russian].

10. The R Project for Statistical Computing. Available at: https://www.R-project.org/

11. Wymer D.T., Patel K.P., Burke W.F., Bhatia V.K. Phase-contrast MRI: physics, techniques, and clinical applications. *Radiographics*. 2020;40(1):122–140. doi: 10.1148/rg.2020190039

12. Gao J., Wang Y., Ding Q. Comparison of the clinical value of transcranial Doppler ultrasound and computed tomography angiography for diagnosing ischemic cerebrovascular disease. *J. Int. Med. Res*. 2022;50(6):03000605211047718. doi: 10.1177/03000605211047718

13. Tang H., Hu N., Yuan Y., Xia C., Liu X., Zuo P., Stalder A.F., Schmidt M., Zhou X., Song B., Sun J. Accelerated time-of-flight magnetic resonance angiography with sparse undersampling and iterative reconstruction for the evaluation of intracranial arteries. *Korean J. Radiol*. 2019;20(2):265–274. doi: 10.3348/kjr.2017.0634

14. Vigneshwaran V., Sands G.B., LeGrice I.J., Smaill B.H., Smith N.P. Reconstruction of coronary circulation networks: A review of methods. *Microcirculation*. 2019;26(5):e12542. doi: 10.1111/micc.12542

15. Roux W. Über die Verzweigungen der Blutgefässe : eine morphologische Studie. *Z. Naturwiss*. 1878;12:205–266.

16. 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: 10.1085/jgp.9.6.835

17. Uylings H.B.M. Optimization of diameters and bifurcation angles in lung and vascular tree structures. *Bull. Math. Biol*. 1977;39(5):509–520. doi: 10.1007/BF02461198

18. Zamir M. On fractal properties of arterial trees. *J. Theor. Biol*. 1999;197(4):517–526. doi: 10.1006/jtbi.1998.0892

19. Розен Р. Принцип оптимальности в биологии. М.: Мир, 1969. 215 с.

Rozen R. Principle of optimality in biology. Moscow: Mir, 1969. 215 p. [In Russian].

20. Keelan J., Chung E.M.L., Hague J.P. Development of a globally optimised model of the cerebral arteries. *Phys. Med. Biol*. 2019;64(12):125021. doi: 10.1088/1361-6560/ab2479

Сведения об авторах:

Дадашев Али Шарудиевич, ORCID: 0000-0001-8502-0841, e-mail: mukulatura95@mail.ru
Милтых Илья Сергеевич, ORCID: 0000-0002-9130-3255, e-mail: contact@miltykh.com
Зенин Олег Константинович, д.м.н., проф., ORCID: 0000-0002-5447-1989, e-mail: zen.olegz@gmail.com
Кафаров Эдгар Сабирович, д.м.н., проф., ORCID: 0000-0001-9735-9981, e-mail: Edgar-kafaroff@yandex.ru

Information about the authors:

Ali Sh. Dadashev, ORCID: 0000-0001-8502-0841, e-mail: mukulatura95@mail.ru
Ilia S. Miltykh, ORCID: 0000-0002-9130-3255, e-mail: contact@miltykh.com
Oleg K. Zenin, doctor of medical sciences, professor, ORCID: 0000-0002-5447-1989, e-mail: zen.olegz@gmail.com
Edgar S. Kafarov, doctor of medical sciences, professor, ORCID: 0000-0001-9735-9981, e-mail: Edgar-kafaroff@yandex.ru

Поступила в редакцию 17.10.2023
После доработки 12.12.2023
Принята к публикации 30.01.2024

Received 17.10.2023
Revision received 12.e2.2023
Accepted 30.01.2024