

## МОРФОМЕТРИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ДИХОТОМИЙ ВНУТРИОРГАННОГО АРТЕРИАЛЬНОГО РУСЛА ПОЧКИ

**Аннотация.** *Цель работы:* изучение соотношений внутренних диаметров сегментов, составляющих дихотомию – структурную единицу внутриорганный артериального русла почки. *Материал и методы.* Было проведено морфометрическое исследование ангиограмм почек восьми мужчин (16 органов) в возрасте 36–60 лет без окклюзионно-стенотических поражений почечных артерий. Исследованы параметры 565 артериальных дихотомий. *Результаты.* Обнаружены четыре структурно различных типа дихотомий. *Выводы.* Особенности строения, вероятно, определяют различия выполняемых дихотомиями функций. Морфофункциональный принцип оптимальности дихотомий должен формулироваться в соответствии с различиями функционального назначения их структурно-различных типов. Обнаруженные закономерности строения русла почки необходимо учитывать при его математическом моделировании.

**Ключевые слова:** внутриорганный артериальный русло почки, морфометрия, дихотомия.

О. К. Zenin, O. A. Beshulya

## MORPHOLOGICAL ANALYSIS OF DICHOTOMIES OF THE KIDNEY INTRAORGANIC ARTERIAL BED

**Abstract.** Background. The aim of the work is to study the correlation of internal diameters of the segments constituting a dichotomy - a structural unit of the kidney intraorganic arterial bed. Materials and methods. The authors conducted the morphometric study of the angiogrammes of kidneys of 8 men (16 organs) aged 36-60 years with no occlusion-stenotic lesions of the renal arteries. The parameters of 565 arterial dichotomies were studied. Results. There were found 4 different structural types of dichotomies. Conclusions. Supposedly, the structural features determine the differences of functions performed by the dichotomies. Morpho-functional principle of dichotomy optimality should be formulated according to the differences of the functional purpose of structurally-different types. The observed patterns of structure of kidney's arterial bed would be taken into account in its mathematical modeling.

**Key words:** intraorganic arterial bed of kidneys, morphometry, dichotomy.

Почечная патология занимает одно из ведущих мест в структуре общей заболеваемости и смертности населения [1]. При этом известно, что функция почки в значительной степени зависит от состояния структуры ее артериальной системы [2]. Современные цифровые технологии прижизненной визуализации внутриорганный артериального русла почки (ВАРП) открывают новые возможности для ранней диагностики ее патологии [3]. Однако отсутствие в настоящее время морфометрического эталона нормы строения ВАРП сдерживает развитие этого перспективного направления клинической медицины [4].

Анализ литературы позволяет утверждать, что ВАРП может быть представлено в виде фрактальной системы, структурно-функциональной едини-

цей которой является дихотомия – участок русла, состоящий из материнского и двух дочерних сегментов [5]. Кроме того, теоретически доказано, что соотношение диаметров сегментов, составляющих дихотомию, может служить мерой оптимальности строения русла в смысле его пропускной способности [6]. Проверка этого положения на практике, т.е. практический поиск морфометрического эталона нормы строения ВАРП, основанный на количественном анализе соотношений внутренних диаметров сегментов, составляющих дихотомию, является актуальной задачей морфологии.

*Цель исследования* – анализ количественных показателей, характеризующих соотношение внутренних диаметров сегментов, составляющих дихотомию ВАРП.

### Материалы и методы

Для достижения поставленной цели были изучены рентгенограммы ВАРП восемь мужчин (16 органов) в возрасте 36–60 лет без окклюзионно-стенотических поражений почечных артерий. Получение и морфометрию ангиограмм ВАРП осуществляли на аппарате Angiostar фирмы Siemens (Германия) при помощи лицензионной компьютерной программы Quantcor в соответствии с прилагаемыми к аппарату инструкциями. Было исследовано 565 дихотомий. Измеряли диаметры:  $D$  – материнского артериального сегмента (мм);  $d_{\max}$  – максимальной дочерней ветви (мм);  $d_{\min}$  – минимальной дочерней ветви (мм). Рассчитывали:  $D/d_{\max}$ ,  $D/d_{\min}$  – коэффициенты деления материнского артериального сегмента, равные отношению диаметра материнского сегмента к диаметру большего и меньшего дочерних сегментов соответственно;  $\gamma$  (asymmetryratio) – коэффициент асимметрии дочерних ветвей:  $\gamma = (d_{\min} / d_{\max})^2$ ;  $\eta$  (arearatio) – коэффициент ветвления:  $\eta = (d_{\max}^2 + d_{\min}^2) / D^2$ . Далее формировали компьютерную базу данных и обрабатывали при помощи пакета прикладных статистических программ Microsoft Excel и MedStat для Windows в соответствии с рекомендациями [7].

### Результаты

Обнаружено, что для ВАРП наиболее характерным является дихотомическое деление (93 %), трихотомии встречаются в 7 % случаев. Числовые значения изучаемых показателей приведены в табл. 1.

Для проведения описательной статистики была осуществлена проверка распределений полученных результатов на нормальность. В результате установлено, что для показателей  $D$ ,  $d_{\max}$ ,  $d_{\min}$ ,  $D/d_{\max}$ ,  $D/d_{\min}$ ,  $\gamma$  распределение отличается от нормального закона на уровне значимости  $p \leq 0,001$ . Распределение величины параметра  $\eta$  не отличается от нормального закона распределения на уровне значимости  $p = 0,101$ . Значение параметра  $D$  характеризует диаметры всех измеренных материнских артериальных сегментов. Для него центром статистического распределения (медианой) является величина, равная 1,7 мм; ошибка медианы – 0,07. Максимальное его значение – 8,2 мм, минимальное – 0,4 мм. Переменная  $d_{\max}$  описывает диаметры всех больших дочерних ветвей. Величина медианы – 1,4 мм, ошибка медианы – 0,06. Максимальное и минимальное значение этого показателя – 6,9 мм и 0,2 мм соответственно. Величина параметра  $d_{\min}$  характеризует диаметры всех меньших дочерних ветвей. Его медиана равна 1 мм, ошибка медианы – 0,04. Максимальное значение – 5,6 мм, минимальное – 0,1 мм.

Величины показателей, характеризующих ВАРП как конструкцию, состоящую из взаимосвязанных дихотомий

Переменная	Количество	Медиана	I квартиль	III квартиль	Минимум	Максимум	Ошибка медианы	Лев. (95 % ДИ)	Прав. (95 % ДИ)
$D$ (мм)	563	1,7	1,2	2,7	0,4	8,2	0,07	1,6	1,8
$d_{\max}$ (мм)	563	1,4	0,9	2,2	0,2	6,9	0,06	1,3	1,5
$d_{\min}$ (мм)	563	1	0,6	1,5	0,1	5,6	0,04	0,9	1,1
$D/d_{\max}$	563	1,22	1,06	1,41	0,93	4	0,02	1,19	1,25
$D/d_{\min}$	563	1,75	1,44	2,28	1	6,33	0,04	1,67	1,82
$\Gamma$	563	0,56	0,34	0,76	0,04	1	0,01	0,52	0,6

  

Переменная	Количество	Среднее	С.к.о.	Ошибка среднего	Минимум	Максимум	Лев. (95 % ДИ)	Прав. (95 % ДИ)
$\eta$	563	1,03	0,39	0,02	0,1	2	0,99	1,06

**Примечание.**  $D$  – диаметр материнского артериального сегмента (мм);  $d_{\max}$  – диаметр максимальной дочерней ветви (мм);  $d_{\min}$  – диаметр минимальной дочерней ветви (мм);  $D/d_{\max}$ ,  $D/d_{\min}$  – коэффициенты деления материнского артериального сегмента;  $\gamma$  (asymmetryratio) – коэффициент асимметрии дочерних ветвей;  $\eta$  (arearatio) – коэффициент ветвления.

Вышесказанное свидетельствует о неоднородности изучаемой совокупности артериальных дихотомий и нацеливает на поиск их отдельных групп или типов. Теоретически возможны следующие варианты соотношений диаметров артериальных сегментов, составляющих дихотомию:

- 1) полная асимметрия, отвечающая следующим условиям:

$$D \neq d_{\max} \neq d_{\min} \text{ или } D / d_{\max} \neq 1, D / d_{\min} \neq 1, d_{\min} / d_{\max} \neq 1;$$

- 2) боковая асимметрия, отвечающая следующим условиям:

$$D = d_{\max}, D \neq d_{\min}, d_{\max} \neq d_{\min} \text{ или } D / d_{\max} = 1, D / d_{\min} \neq 1, d_{\min} / d_{\max} \neq 1;$$

- 3) односторонняя симметрия, отвечающая следующим условиям:

$$D \neq d_{\max}, D \neq d_{\min}, d_{\min} = d_{\max} \text{ или } D / d_{\max} \neq 1, D / d_{\min} \neq 1, d_{\min} / d_{\max} = 1;$$

- 4) полная симметрия, отвечающая следующим условиям:

$$D = d_{\max} = d_{\min} \text{ или } D / d_{\max} = 1, D / d_{\min} = 1, d_{\min} / d_{\max} = 1.$$

Вариант, при котором  $D \neq d_{\max}$ ,  $D = d_{\min}$ ,  $d_{\max} \neq d_{\min}$ , невозможен по определению.

Действительно, в результате проведенного анализа количественных показателей, характеризующих соотношение внутренних диаметров сегментов,

составляющих дихотомию ВАРП, установлено наличие четырех структурно различных типов дихотомий (табл. 2).

Таблица 2

Значения морфометрических параметров ВАРП, характеризующие структурно-различные типы дихотомий

Параметры	Дихотомии первого типа ( $N = 415,73\%$ )	Дихотомии второго типа ( $N = 112, 20\%$ )	Дихотомии третьего типа ( $N = 33, 6\%$ )	Дихотомии четвертого типа ( $N = 5, 1\%$ )	$p$
$D$ ( $Me \pm m$ , мм)	$1,8 \pm 0,09$	$1,5 \pm 0,1$	$1,2 \pm 0,2$	$1,26 \pm 0,26$	0,001
$d_{max}$ ( $Me \pm m$ , мм)	$1,4 \pm 0,07$	$1,5 \pm 0,1$	$0,6 \pm 0,2$	$1,26 \pm 0,26$	0,0002
$d_{min}$ ( $Me \pm m$ , мм)	$1 \pm 0,054$	$0,9 \pm 0,08$	$0,6 \pm 0,2$	$1,26 \pm 0,26$	0,0001
$D/d_{max}$ ( $Me \pm m$ )	$1,3 \pm 0,02$	1	$1,8 \pm 0,1$	1	0,002
$D/d_{min}$ ( $Me \pm m$ )	$1,8 \pm 0,05$	$1,6 \pm 0,1$	$1,8 \pm 0,1$	1	0,0001
$\gamma$ ( $Me \pm m$ )	$0,6 \pm 0,01$	$0,4 \pm 0,03$	1	1	0,0001
$\eta$ ( $M \pm m$ )	$0,9 \pm 0,01$	$1,4 \pm 0,03$	$0,8 \pm 0,08$	2	0,0001

**Примечание.**  $D$  – диаметр материнского артериального сегмента (мм);  $d_{max}$  – диаметр максимальной дочерней ветви (мм);  $d_{min}$  – минимальной дочерней ветви (мм);  $D/d_{max}$ ,  $D/d_{min}$  – коэффициенты деления материнского артериального сегмента;  $\gamma$  (asymmetriugatio) – коэффициент асимметрии дочерних ветвей;  $\eta$  (arearatio) – коэффициент ветвления;  $Me$  – медиана;  $M$  – средняя (математическое ожидание);  $m$  – ошибка медианы или средней;  $p$  – уровень значимости.

Для дихотомий первого типа характерны большие значения  $D$ ,  $D/d_{min}$ , средние значения  $d_{max}$ ,  $d_{min}$ ,  $D/d_{max}$ ,  $\gamma$ ,  $\eta$ . Этот тип дихотомий составил 73 % общего количества. Путем непараметрического корреляционного анализа для дихотомий первого типа обнаружено наличие сильной достоверной положительной связи между показателями:  $D - d_{max}$  ( $r = 0,95$ ,  $r$  – коэффициент корреляции Спирмена; здесь и далее по тексту коэффициент корреляции отличен от 0 на уровне  $p < 0,05$ ),  $D - d_{min}$  ( $r = 0,87$ ),  $d_{max} - d_{min}$  ( $r = 0,92$ ); средние по силе достоверные положительные зависимости установлены между:  $d_{max} - \eta$  ( $r = 0,36$ ),  $d_{min} - \gamma$  ( $r = 0,4$ ),  $d_{min} - \eta$  ( $r = 0,48$ ),  $D/d_{max} - D/d_{min}$  ( $r = 0,54$ ). Сильные отрицательные связи между показателями:  $D/d_{max} - \eta$  ( $r = -0,88$ ),  $D/d_{min} - \eta$  ( $r = -0,86$ ),  $D/d_{min} - \gamma$  ( $r = -0,76$ ), средней силы достоверные ( $p < 0,05$ ) отрицательные связи между:  $d_{min} - D/d_{min}$  ( $r = -0,52$ ),  $d_{max} - D/d_{max}$  ( $r = -0,38$ ),  $d_{min} - D/d_{max}$  ( $r = -0,35$ ).

Для дихотомий второго типа характерны наименьшие значения  $\gamma$ ,  $D/d_{max}$ , средние значения  $D$ ,  $d_{min}$ ,  $D/d_{min}$ , показатели  $d_{max}$ ,  $\eta$  имеют наибольшие значения в ряду исследованных типов дихотомий. Дихотомии данного типа составили 20 % от общего количества. Обнаружено наличие сильных положительных связей между показателями  $D - d_{min}$  ( $r = 0,73$ ),  $d_{max} - d_{min}$  ( $r = 0,73$ ), коэффициент корреляции отличен от 0 на уровне  $p < 0,05$ , средней силы достоверные положительные связи:  $d_{max} - D/d_{min}$  ( $r = 0,36$ ),  $d_{min} - \gamma$  ( $r = 0,32$ ),

$d_{\min} - \eta$  ( $r = 0,32$ ). Умеренные отрицательные связи установлены между  $\gamma - D$  ( $r = -0,36$ ),  $\eta - D$  ( $r = -0,36$ ),  $\gamma - d_{\max}$  ( $r = -0,36$ ),  $\eta - d_{\max}$  ( $r = -0,36$ ).

Дихотомий третьего типа было обнаружено 6 % от общего количества. Параметры  $D$ ,  $d_{\max}$ ,  $d_{\min}$  имеют наименьшие значения,  $\eta$  занимает среднее положение,  $D/d_{\max}$ ,  $D/d_{\min}$ ,  $\gamma$  являются наибольшими для всего ряда дихотомий. Установлены сильные достоверные положительные связи между  $D - d_{\max}$  ( $r = 0,86$ ) и  $D - d_{\min}$  ( $r = 0,86$ ), коэффициент корреляции отличен от 0 на уровне  $p < 0,05$ , умеренные положительные связи:  $\eta - d_{\max}$  ( $r = 0,47$ ),  $\eta - d_{\min}$  ( $r = 0,47$ ). Дихотомии четвертого типа составили 1 % от общего количества разветвлений, в связи с этим они подробно не исследовались.

### Обсуждение

Впервые проблема функциональной анатомии сосудистых дихотомий была сформулирована в 1878 г. в докторской диссертации немецкого анатома и эмбриолога Вильгельма Ру [8]. На основании своих наблюдений он пришел к выводу, что форма дихотомии похожа на форму струи жидкости, вытекающей из отверстия трубки. Им впервые была установлена связь между величиной угла разветвления артериальной дихотомии и диаметрами просветов материнского ствола и его дочерних ветвей. Обнаруженные закономерности строения артериальных дихотомий он сформулировал в виде правил, получивших в специальной литературе название «правила Ру» [9]. Для объяснения этих правил В. Ру предложил гипотезу о том, что конструкция и функционирование кровеносной системы отвечает принципу минимальных затрат биологического материала, израсходованного на ее построение, и принципу минимальной работы, необходимой для продвижения по ней крови. При этом артериальные дихотомии под влиянием гемодинамического фактора принимают конфигурации, которые для данных условий являются наилучшими из всех возможных, т.е. оптимальными. Английский физиолог С. Д. Муггау в 1926 г. [10] использовал изящный математический прием для анализа сосудистой дихотомии. Это позволило ему, избегая сложных вычислений, решить вопрос о соотношениях диаметров и углов сосудистой дихотомии, при которых достигается минимум потерь энергии. Утверждения об оптимальности, т.е. применительно к практической медицине – «норме», структурной организации сосудистых систем неоднократно высказывались и обсуждались в различных разделах биологии [11]. При этом предполагалось, что основной функцией сосудистого разветвления является проведение крови с минимальными затратами энергии. Реализация данного принципа в условиях артериального русла осуществляется, по мнению многих авторов, путем согласования диаметров артерий, составляющих дихотомию [12]. Утверждалось, что для сосудистых дихотомий верен обобщенный закон С. Д. Муггау в виде

$$r_0^\xi = r_1^\xi + r_2^\xi,$$

где  $r_0$ ,  $r_1$ ,  $r_2$  – радиусы материнской артерии и дочерних ветвей, имеющих больший и меньший внутренние радиусы. Для крупных артерий значение этого показателя равно  $\xi = 2,33$  [13], для более мелких –  $\xi = 1-1,5$ . Авторы работы [14] считают, что значение  $\xi = 3$  обеспечивает оптимальное соотношение между диаметрами артериальных сегментов, составляющих дихотомию в условиях ламинарного тока крови, а  $\xi = 2,33$  – в условиях турбулентного.

Для систем коронарных сосудов млекопитающих обнаружено хорошее согласование с законом С. D. Murray при  $\xi = 3$ , причем соответствие тем лучше, чем выше находится организм на эволюционной лестнице.

Казалось бы, цель достигнута: найден морфометрический эталон нормы внутриорганных артериальных дихотомий. Осталось только подкорректировать это значение путем морфометрического исследования внутриорганных артериальных русел внутренних органов практически здоровых людей, и можно это использовать в практической медицине для объективной диагностики патологии сосудистых деревьев. Однако, как показывают результаты настоящего исследования, только у первого и третьего типов дихотомий можно рассчитать значение  $\xi$ . Для дихотомий второго и четвертого типа подобное сделать невозможно, по крайней мере для ВАРП.

Н. В. М. Ulings для подобного рода оценки оптимальности использовал коэффициент ветвления:  $\eta = (d_{\max}^2 + d_{\min}^2)/D^2 - \text{arearatio}$ , утверждая при этом, что оптимальными являются дихотомии, у которых  $\eta$  находится в пределах  $1 < \eta \leq 1,26$ . Он считает возможным применять данный показатель оптимальности как для симметричных (радиусы дочерних ветвей равны), так и для несимметричных (радиусы дочерних ветвей не равны) дихотомий [15]. Действительно, применительно к ВАРП значение данного показателя может быть рассчитано для любого типа структурно-различных дихотомий. Однако оптимальных, т.е. удовлетворяющих условию  $1 < \eta \leq 1,26$ , дихотомий было обнаружено только 24 %. Трудно представить адекватную работу системы, на 76 % состоящую из неоптимальных структурных элементов.

Возникает закономерный вопрос о «нормальности» изучаемого артериального русла, так как только около 24 % от общего количества артериальных дихотомий отвечают теоретически установленным требованиям оптимальности – «нормы», по крайней мере для рассматриваемой части артериального русла. Возможно, в физиологических условиях функционирования артериальной системы данный феномен компенсируется за счет разности реологических свойств крови и (или) артериальной стенки на разных уровнях деления артерий. Кроме того, как известно, сосудистое русло делится на ряд функциональных групп сосудов [16]: амортизирующие, резистивные, обменные и др. Настоящее исследование касается артерий в основном резистивного типа, поэтому логично предположить, что показатели, характеризующие оптимальность для них, имеют значения, отличные от таковых амортизирующих (магистральных) и обменных (микроциркуляторное русло) сосудов. Вероятно, функция артериальных дихотомий, составляющих данный участок артериального русла, состоит не только в проведении крови, но и в ее равномерном распределении, регулировании давления и объемной скорости тока крови. Поэтому применять один и тот же принцип оптимальности для дихотомий, выполняющих различные функции, не совсем верно. Учитывая вышесказанное, можно предположить, что в данном случае около 24 % от общего количества дихотомий составляют те, которые обеспечивают минимальные потери энергии потока крови при ее проведении.

Нельзя также отрицать наличие определенного процента патологических артериальных дихотомий, которые, вероятно, в таком качестве и количестве себя клинически не проявляют, однако могут служить потенциальной основой возможной в будущем несостоятельности русла. Вероятно также

наличие погрешности измерений. Однако, несмотря на это, обнаруженные факты следует учитывать при математическом моделировании структуры ВАРП. Обязательно следует учитывать процентное соотношение присутствия дихотомий структурно различных типов. Можно ожидать, что каждый из типов имеет свое функциональное значение, и функция артериальной конструкции в целом сильно зависит от их процентного соотношения. Однако, оперируя только данными о внутренних диаметрах артерий, входящих в дихотомию, без знания длин артериальных сегментов трудно с уверенностью судить о гидродинамических процессах, происходящих внутри нее, а следовательно, и функциональном значении. Например, непонятно, как функционируют дихотомии второго типа. Существующие на сегодняшний день математические модели артериального русла, представленные в работе [17], даже с уточненными путем морфометрии количественными параметрами можно рассматривать только в качестве первого приближения.

### **Заключение**

1. Обнаружены четыре структурно различных типа артериальных дихотомий, составляющих ВАРП человека. Особенности их строения, вероятно, определяют различия выполняемых ими функций.

2. Морфофункциональный принцип оптимальности должен формулироваться в соответствии с различиями функционального назначения структурно различных типов артериальных дихотомий. Показатели, описывающие оптимальность строения дихотомии, должны быть индивидуальными для каждого типа.

3. Обнаруженные закономерности строения ВАРП необходимо учитывать при его математическом моделировании.

### **Список литературы**

1. **Кизилова, Н. Н.** Критерии оптимального функционирования ветвящихся транспортных систем живой природы / Н. Н. Кизилова, Н. А. Попова // Вестник Харьковского университета. Сер. «Математика, прикладная математика и механика». – 1999. – № 4. – С. 148–156.
2. **Nerem, R. M.** Tissue engineering a blood vessel substitute: the role of biomechanics / R. M. Nerem // Yonsei Medical Journal. – 2000. – Vol. 41, № 6. – P. 735–739.
3. **Pollanen, M. S.** Dimensional optimization at different levels at the arterial hierarchy / M. S. Pollanen // Journal Theoretical Biology. – 1992. – Vol. 159. – P. 267–270.
4. **Зенин, О. К.** Артериальная система человека в цифрах и формулах / О. К. Зенин, В. К. Гусак, Г. С. Кирьякулов. – Донецк : Донбасс, 2002. – 196 с.
5. **Khanin, M. A.** Optimal structure of the microcirculatory bed / M. A. Khanin, I. B. Bukharov // Journal Theoretical Biology. – 1994. – Vol. 169, № 3. – P. 267–273.
6. **Zamir, M.** On fractal properties of arterial trees / M. Zamir // Journal Theoretical Biology. – 1999. – Vol. 197, № 4. – P. 517–526.
7. **Перри, Л. А.** Учимся мастерству. Microsoft EXCEL для Windows 95 / Л. А. Перри. – М. : СКПРЕСС, 1996. – 480 с.
8. **Roux, W.** Ueber die Verzweigungen der Blutgefäße. Ein morphologische Studie / W. Roux // Zeitschrift fuer Naturwissenschaft. – 1878. – Bd. 12, № 5. – S. 205–266.
9. Heterogeneous perfusion is a consequence of uniform shear stress in optimized arterial tree models / W. Schreiner, R. Karch, M. Neumann [et al.] // Journal Theoretical Biology. – 2003. – Vol. 220, № 3. – P. 285–301.

10. Murray, C. D. The physiological principle of minimum work applied to the angle of branching of arteries / C. D. Murray // *Journal of General Physiology*. – 1926. – Vol. 9, № 6. – P. 835–841.
11. Ляпунов, А. А. Проблемы теоретической и прикладной кибернетики / А. А. Ляпунов. – М. : Наука, 1980. – 312 с.
12. Fast algorithm for 3-D vascular tree modeling / M. Kretowski, Y. Rolland, J. Bezy-Wendling [et al.] // *Computer Methods and Programs in Biomedicine*. – 2003. – Vol. 70, № 2. – P. 129–136.
13. Retinal vascular tree morphology: a semi-automatic quantification / M. E. Martinez-Perez, A. D. Hughes, A. V. Stanton [et al.] // *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*. – 2002. – Vol. 49, № 8. – P. 912–917.
14. Pollanen, M. S. Dimensional optimization at different levels at the arterial hierarchy / M. S. Pollanen // *Journal Theoretical Biology*. – 1992. – Vol. 159. – P. 267–270.
15. Uylings, H. B. M. Optimization of diameters and bifurcation angles in lung and vascular tree structures / H. B. M. Uylings // *Bulletin of Mathematical Biology*. – 1977. – Vol. 39. – P. 509–520.
16. Физиология человека : [пер. с англ.] : в 4 т. / Ч. Вейсс, Г. Антони, Э. Вицлеб и др. ; под ред. Р. Шмидта и Г. Тевса. – М. : Мир, 1986. – Т. 3. – 88 с.
17. Numerical simulation and experimental validation of blood flow in arteries with structured-tree outflow conditions / S. O. Mette, Charles S. Peskin, Won Yong Kim [et al.] // *Annals of Biomedical Engineering*. – 2000. – Vol. 28. – P. 1281–1299.

### References

1. Kizilova N. N., Popova N. A. *Vestnik Khar'kovskogo universiteta. Ser. «Matematika, prikladnaya matematika i mekhanika»* [Bulletin of Kharkov University. Series: “Mathematics, applied mathematics and mechanics”]. 1999, no. 4, pp. 148–156.
2. Nerem R. M. *Yonsei Medical Journal*. 2000, vol. 41, no. 6, pp. 735–739.
3. Pollanen M. S. *Journal Theoretical Biology*. 1992, vol. 159, pp. 267–270.
4. Zenin O. K., Gusak V. K., Kir'yakulov G. S. *Arterial'naya sistema cheloveka v tsifrah i formulakh* [Human arterial system in figures and formulas]. Donetsk: Donbass, 2002, 196 p.
5. Khanin M. A., Bukharov I. B. *Journal Theoretical Biology*. 1994, vol. 169, no. 3, pp. 267–273.
6. Zamir M. *Journal Theoretical Biology*. 1999, vol. 197, no. 4, pp. 517–526.
7. Perri L. A. *Uchimsya masterstvu. Microsoft EXCEL dlya Windows 95* [ ]. Moscow: SKPress, 1996, 480 p.
8. Roux W. *Zeitschrift fuer Naturwissenschaft* [Journal of natural sciences]. 1878, vol. 12, no. 5, pp. 205–266.
9. Schreiner W., Karch R., Neumann M. et al. *Journal Theoretical Biology*. 2003, vol. 220, no. 3, pp. 285–301.
10. Murray C. D. *Journal of General Physiology*. 1926, vol. 9, no. 6, pp. 835–841.
11. Lyapunov A. A. *Problemy teoreticheskoy i prikladnoy kibernetiki* [Problems of theoretical and applied cybernetics]. Moscow: Nauka, 1980, 312 p.
12. Kretowski M., Rolland Y., Bezy-Wendling J. et al. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*. 2003, vol. 70, no. 2, pp. 129–136.
13. Martinez-Perez M. E., Hughes A. D., Stanton A. V. et al. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*. 2002, vol. 49, no. 8, pp. 912–917.
14. Pollanen M. S. *Journal Theoretical Biology*. 1992, vol. 159, pp. 267–270.
15. Uylings H. B. M. *Bulletin of Mathematical Biology*. 1977, vol. 39, pp. 509–520.
16. Veys Ch., Antoni G., Vitsleb E. et al. *Fiziologiya cheloveka: per. s angl.: v 4 t.* [Human physiology: translation from English: in 4 volumes]. Moscow: Mir, 1986, vol. 3, 88 p.



17. Mette S. O., Charles S. Peskin, Won Yong Kim et al. *Annals of Biomedical Engineering*. 2000, vol. 28, pp. 1281–1299.

---

***Зенин Олег Константинович***

доктор медицинских наук, профессор, кафедра анатомии человека, Донецкий национальный медицинский университет им. М. Горького (Украина, г. Донецк, пр. Ильича, 16)

E-mail: zen.olegz@gmail.com

***Zenin Oleg Konstantinovich***

Doctor of medical sciences, professor, sub-department of human anatomy, Donetsk National Medical University named after M. Gorky (16 Ilyicha avenue, Donetsk, Ukraine)

***Бешуля Ольга Александровна***

врач-интерн, Донецкое областное клиническое территориальное медицинское объединение (Украина, г. Донецк, пр. Ильича, 14); соискатель, кафедра анатомии человека, Донецкий национальный медицинский университет им. М. Горького (Украина, г. Донецк, пр. Ильича, 16)

E-mail: besshulyaolga@rambler.ru

***Beshulya Ol'ga Aleksandrovna***

Intern, Donetsk regional clinical territorial medical association (14 Ilyicha avenue, Donetsk, Ukraine); applicant, sub-department of human anatomy, Donetsk National Medical University named after M. Gorky (16 Ilyicha avenue, Donetsk, Ukraine)

---

УДК 611.137.7:611.61

**Зенин, О. К.**

**Морфометрический анализ дихотомий внутриорганного артериального русла почки / О. К. Зенин, О. А. Бешуля // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Медицинские науки. – 2013. – № 4 (28). – С. 26–34.**