

© Глотов В.А., 2022

УДК: [611.13/.16+611.423]:616-006-092.9

В.А. Глотов

**СТРУКТУРНЫЙ АНАЛИЗ КРОВЕНОСНЫХ СОСУДИСТЫХ СЕТЕЙ:
2. ФОРМАЛИЗАЦИЯ ОПИСАНИЯ, КОЛИЧЕСТВЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ,
ЛИНЕЙНАЯ ПРОТЯЖЁННОСТЬ, БЕЗРАЗМЕРНЫЕ КОНСТАНТЫ
АНГИОГЕНЕЗА, УСЛОВИЯ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ФЕНОМЕНА СВЕРХТЕКУЧЕСТИ
КРОВИ И ЕГО МОРФОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЯВЛЕНИЯ IN VIVO**

Смоленский государственный медицинский университет, г. Смоленск, РФ

Исследование посвящено математическому моделированию (структурному анализу) кровеносных сосудистых сетей: формализации их описания, определению количественных характеристик ангиогенеза (констант ангиогенеза), изучению линейной протяжённости кровеносных сосудистых сетей и феномена сверхтекучести крови с применением аксиоматического подхода. Разработана теория феномена сверхтекучести крови в кровеносных сосудистых сетях и показаны его морфологические проявления in vivo.

Ключевые слова: кровеносные сосудистые сети, ангиогенез, линейная протяжённость, математическое моделирование, структурный анализ, сверхтекучесть крови.

Поступила в редакцию 25.09.2022 г. Принята к печати 19.10.2022 г.

Для цитирования: Глотов В.А. Структурный анализ кровеносных сосудистых сетей: 2. Формализация описания, количественные характеристики, линейная протяжённость, безразмерные константы ангиогенеза, условия возникновения феномена сверхтекучести крови и его морфологические проявления in vivo. Морфологический альманах имени В.Г. Ковешникова. 2022;4:22-8.

Для корреспонденции: Глотов Владимир Александрович, докт. мед. наук, профессор, заведующий кафедрой анатомии, Смоленский государственный медицинский университет (214019, Россия, ЦФО, Смоленская область, г. Смоленск, улица Крупской, дом 28). ORCID: 0000-0003-0175-9054; тел.: +7 (4812) 31-00-12.
e-mail: forssma@yandex.ru

Glotov V.A.

**STRUCTURAL ANALYSIS OF BLOOD VASCULAR NETWORKS:
2. FORMALIZATION OF THE DESCRIPTION, QUANTITATIVE CHARACTERISTICS,
LINEAR EXTENT, DIMENSIONLESS CONSTANTS OF ANGIOGENESIS,
CONDITIONS FOR THE OCCURRENCE OF THE PHENOMENON OF BLOOD
SUPERFLUIDITY AND ITS MORPHOLOGICAL MANIFESTATIONS IN VIVO**

Smolensk state medical University, Smolensk, Russia

The study is devoted to mathematical modeling (structural analysis) of blood vascular networks: formalizing their description, determining the quantitative characteristics of angiogenesis (angiogenesis constants), studying the linear extent of blood vascular networks and the phenomenon of blood superfluidity using an axiomatic approach. A theory of the phenomenon of blood superfluidity in blood vascular networks has been developed and its morphological manifestations in vivo have been shown.

Key words: circulatory vascular networks, angiogenesis, linear extent, mathematical modeling, structural analysis, blood superfluidity.

Received: 25.09.2022. Accepted: 19.10.2022.

For citation: Glotov V.A. Structural analysis of blood vascular networks: 2. Formalization of the description, quantitative characteristics, linear extent, dimensionless constants of angiogenesis, conditions for the occurrence of the phenomenon of blood superfluidity and its morphological manifestations in vivo. V.G. Koveshnikov Morphological Almanac. 2022;4:22-8.

Corresponding author: Vladimir A. Glotov – MD, PhD, Professor, Head of the Department of Anatomy, Smolensk State Medical University (28, Krupskaya street, Smolensk, Smolensk region,

Central Federal District, Russia, 214019). ORCID: 0000-0003-0175-9054; tel.: ++7 (4812) 31-00-12.
e-mail: forssma@yandex.ru

Если перефразировать известную шутку Марка Твена, то знания, которыми мы не обладаем о кровеносных сосудистых сетях, обширны. В то же время, трудами многих поколений исследователей уже накоплен огромный массив достоверных сведений о конструкции кровеносных сосудистых сетей (КСС), достаточный для их формализованного структурного анализа с применением математических моделей, основанных на аксиоматическом подходе, позволяющем новые знания об изучаемом объекте вывести аналитически, предсказывать неочевидные и неизвестные до сих пор физиологические и морфологические феномены *in vivo*, а так же показывать путь экспериментальной проверки их существования.

«Построение какой-либо теории мы называем аксиоматическим: если основные понятия и основные гипотезы этой теории ставятся как таковые во главу угла, а дальнейшее её содержание логически выводится из них с помощью определений и доказательств. Аксиоматическими именно в этом смысле слова были построены геометрия Евклида, механика Ньютона, термодинамика Клаузиуса» (Д. Гильберт, П. Бернайс) [1].

И ещё: «Вообще говоря моделями можно пользоваться до определённого момента развития данной области науки. Удачные модели годны для получения отдельных выводов, и срок их жизни определяется тем периодом, пока они не вступают в противоречие с фактами: модели должны строго контролироваться наблюдениями и экспериментами... Тем не менее, для проверки идеи не всегда необходимы визуальные наблюдения какого-либо теоретически мыслимого процесса. Совпадение теоретических выводов с фактами, возможность предсказания явлений на основе теоретических данных, объяснение теорией ранее необъяснимых явлений говорят о ценности теории, как рабочего инструмента» (А. Л. Чижевский) [2].

Для формализации описания конструкции, конфигурации, геометрии, топологии КСС, модифицируем классические морфо-

логические термины, применяемые при их вербальном описании. Вместо терминов «артерия», «мелкая артерия», «артериола», «капилляр», «венула», «мелкая вена», «вена», а также «шунт» и «полшунт», будем использовать универсальный термин «трекер». Вместо терминов «разветвление», «ответвление», «бифуркация», «трифуркация», «сосудистый тройник» будем использовать универсальный термин «узел».

Трекер — это круглая цилиндрическая трубка без ответвлений, соединяющая в КСС два соседних узла. Трекер имеет количественные характеристики: диаметр внутреннего просвета (d) и длину (l) — расстояние между его концами. Кроме того, в общем случае трекер обладает пластичностью (приспособительной изменчивостью), которая характеризуется искривлением C : отношением $l/l_{\min}$, где l — реальная длина трекера, $l_{\min}$ — минимальная длина трекера (C — безразмерная величина, $C \geq 1$).

Узел — это область стыка трекеров. Узел имеет безразмерную характеристику — степень ветвления узла n . Тщательные наблюдения КСС *in vivo* абсолютно достоверно показывают, что в реальных КСС исключительно генерируются только узлы, имеющие степень ветвления $n=3$. Это 1-я универсальная безразмерная константа ангиогенеза в КСС.

Примитивные КСС появляются в процессе васкулогенеза на самых ранних стадиях эмбриогенеза путем дифференцировки мезенхимальных клеток в ангиобласты и гемобласты и образования замкнутой сетевой системы синусоидоподобных полостей. После подключения к примитивным КСС генератора потока крови примитивного сердца, начинается микроциркуляция примитивной крови. Процесс генерации новых сосудов путём васкулогенеза останавливается. Ангиобласты дифференцируются в эндотелиальные клетки и новые сосуды (трекеры) начинают генерироваться путём ангиогенеза по принципу Рабля: «Эндотелий — от эндотелия». При этом в результате каждой генерации G_i , где $i=1, 2, 3, \dots, N$ (здесь i — номер генерации); количест-

во трекеров увеличивается на 3, а количество узлов на 2. Легко вывести формулы для подсчёта общего количества T трекеров и общего количества K узлов в КСС на момент i -ой генерации: $T=3G_i$ (1); $K=2G_i$ (2), где $G_i = i$ – общее количество генераций на момент i -ой генерации. Здесь необходимо отметить, что в процессе развития и перестройки КСС в онтогенезе одновременно имеет место и обратный процесс: исчезновение трекеров и узлов в результате управляемого апоптоза эндотелиальных клеток. В процессе генерации КСС отношение K/T есть постоянная величина - дробное число $2/3$. Это 2-я универсальная безразмерная константа ангиогенеза в КСС.

Линейная протяжённость l_{Σ} реальных КСС определяется по формуле: $l_{\Sigma}=Tl_{cp}=3G_i l_{cp}$ (3), где l_{cp} – среднее значение длины трекера, определяемое эмпирически.

Формула (3) имеет важное прикладное значение, так как позволяет достаточно просто с заданной погрешностью определить линейную протяжённость КСС в отдельном органе, области или во всём теле.

Известны различные оценки протяжённости КСС: от 100 000 км (Залманов А. С., 1958 [3]; Козлов В. И. и соавт., 1994 [4]) до 300 000 км. В Таблице 1 приведены фрагменты результатов математического моделирования линейной протяжённости КСС.

Таблица 1 - Математическое моделирование линейной протяжённости КСС

G_i	$T=3G_i$	$N=2G_i$	l_{cp} (средняя длина трекера в КСС)	$l_{\Sigma}=Tl_{cp}=3G_i l_{cp}$ (линейная протяжённость КСС)
10^9	$3 \cdot 10^9$	$2 \cdot 10^9$	50 мкм	150 км
			100 мкм	300 км
			200 мкм	600 км
			400 мкм	1200 км
			800 мкм	2400 км
10^{10}	$3 \cdot 10^{10}$	$2 \cdot 10^{10}$	50 мкм	1500 км
			100 мкм	3000 км
			200 мкм	6000 км
			400 мкм	12000 км
			800 мкм	24000 км
10^{11}	$3 \cdot 10^{11}$	$2 \cdot 10^{11}$	50 мкм	15000 км
			100 мкм	30000 км
			200 мкм	60000 км
			400 мкм	120000 км
			800 мкм	240000 км

Величины T , K и соответственно протяжённость КСС в организме имеют астрономическое значение, сопоставимое с количеством звёзд в галактиках и соответственно с расстоянием между Землёй и Луной. Пока мы можем делать более или менее правдоподобные предположения о технологиях, лежащих в основе формирования КСС и принципах их функционирования в организмах человека и животных.

Технологии и принципы функционирования систем в органическом мире настолько совершенны и сложны, что просто не сопоставимы со сложностью самых совершенных современных технологий и технических

систем. Формирование и функционирование КСС происходит автоматически, одновременно, взаимосвязано, распределённо в биологическом пространстве на молекулярном уровне (работа генома и наномолекулярных машин), на ультраструктурном внутриклеточном и межклеточном уровне (работа органелл, цитоплазмы, мембран и межклеточного вещества), на микроскопическом уровне (клеточная и тканевая биология), макро-микроскопическом уровне (формирование структурно-функциональных единиц органов и систем – «биологическая тканевая кристаллизация») и на макроскопическом системном организменном уровне.

В неорганическом мире известно удивительное свойство жидкого гелия (изотоп ^4He), получившее название «сверхтекучести». При температуре $2,19^\circ\text{K}$ в нижней точке (λ -точка) фазового перехода второго рода, точке пересечения линии на фазовой диаграмме гелия с линией равновесия жидкости с паром, гелий протекает по узким капиллярам или щелям, не обнаруживая никакой вязкости. Феномен сверхтекучести гелия был открыт П. А. Капицей в 1938 году. Теория сверхтекучести была создана Л. Д. Ландау в 1941 году [5].

Кровь представляет из себя жидкую ткань, движение которой в КСС нельзя отождествлять в полном физическом смысле с движением жидкостей, которые рассматриваются в классической гидродинамике. Это особое состояние органической субстанции органического мира.

«Кровь пришла к современному состоянию путём длительной биологической эволюции, совершенствуясь одновременно с развитием органического мира. ... в процессе эволюции ... неупорядоченные состояния крови должны были уступить место более совершенным состояниям. Кровь человека должна обладать стройной физической и геометрической организацией, ибо в органическом мире устойчивые состояния являются в то же время и более вероятными. В кровеносном русле должны непрерывно действовать антихаотические факторы, дабы предохранить его от постоянной тенденции к переходу в термодинамическое равновесное состояние, от выравнивания химических и электрических потенциалов, т. е. кровеносное русло должно быть в высокой мере упорядоченно геометрически, физически и химически» (А. Л. Чижевский, 1959 [2]).

Астрономический масштаб КСС а priori указывает на существование каких-то особых принципов их функционирования. Одним из таких фундаментальных принципов может быть феномен сверхтекучести крови: способность крови двигаться по трекерам и узлам в неизменном виде, перенося массу из одного пространственного тканевого локуса в другой, без потери энергии и без массопереноса через сосудистую стенку, не участвуя в обмене веществ.

Рассмотрим условия, при которых может возникать в КСС феномен сверхтекучести крови. Предположим, что эндотелиоциты, выстилающие внутренний просвет трекеров и узлов, обладают способностью управлять смачиваемостью своей клеточной поверхности, соприкасающейся с потоком крови. Смачиваемость клеточной мембраны количественно характеризуется косинусом краевого угла Θ ($\cos\Theta > 0$ для смачивающих жидкостей и $\cos\Theta < 0$ для несмачивающих). При полном смачивании ($\cos\Theta = 1$) жидкость растекается по всей поверхности клеточной мембраны эндотелиоцита, при полном несмачивании ($\cos\Theta = -1$) поток крови внутри трекера принимает форму круглого цилиндра. Силы поверхностного натяжения потока крови будут направлены перпендикулярно к оси симметрии цилиндрического потока и создадут лапласовское давление

$$p_\lambda = 4\sigma/d,$$

где p_λ – лапласовское давление, σ – коэффициент поверхностного натяжения крови, d – диаметр трекера.

Движению крови по трекеру описывается уравнением Бернулли:

$$p_{\text{ст}} + \rho gh + \rho v^2/2 = \text{const} \quad (4),$$

где $p_{\text{ст}}$ – статическое давление крови в трекере, ρ – плотность крови в трекере, g – ускорение свободного падения, h – высота столба крови, v – скорость движения потока крови в трекере. Т.к. перепад высот концов трекера Δh очень маленькая величина при любой ориентации трекера в 3D-пространстве ($\Delta h \rightarrow 0$). Гидростатическое давление $p_t = \rho gh$ в трекере тоже очень маленькая величина и практически стремится к нулю. Иными словами, все трекары, по крайней мере, в системе микроциркуляции, можно рассматривать лежащими горизонтально без уклона. Гравитация практически не участвует в движении крови в системе микроциркуляции, что доказывает длительное нахождение космонавтов в невесомости без каких-либо серьёзных нарушений со стороны микроциркуляции крови. Полное давление крови в трекере в этом случае будет складываться из суммы статического давления и динамического давления ($p_{\text{дин}} = \rho v^2/2$). Уравнение Бернулли примет вид

$$p_{\text{ст}} + \rho v^2/2 = \text{const} \quad (5).$$

Давление на внутреннюю поверхность трекера буде равно статическому давлению $p_{ст}$. Лапласовское давление (вектор силы поверхностного натяжения, приложен к некоторой точке поверхности потока крови в трекере) и статическое давление крови (вектор силы статического давления крови, приложен к некоторой точке внутренней поверхности трекера) направлены на встречу друг другу. Если эти точки совпадают и лежат на одной прямой, то эти силы взаимно компенсируют друг друга. При условии, когда $p_{\lambda} = p_{ст}$, наступает состояние, когда давление на внутреннюю поверхность трекера, т. е. на поверхность эндотелиоцита равно 0. При этом полное давление крови, направленное вдоль оси трекера никуда не девается, поток крови движется как будто он находится в свободном ничем не ограниченном пространстве. Взаимодействия со стенкой нет, массопереноса через стенку нет, сопротивления со стороны стенки движению крови нет, потери энергии и импульса крови при прохождении трекера нет, обмена веществ через сосудистую стенку нет. Но зато есть перенос массы крови из одного конца трекера в другой. Это состояние и есть феномен сверхтекучести крови. Можно предположить, что кровь при этом переходит в некое состояние, когда все частицы крови как бы сцеплены вместе и ни одну нельзя отделить, не разрушив всё состояние. Таким образом, условием возникновения феномена сверхтекучести крови при прохождении трекера является следующее выражение:

$$4\sigma/d = p_{ст} \quad (6).$$

Иными словами, **феномен сверхтекучести крови в трекере возникает тогда, и только тогда, когда лапласовское давление становится равным статическому давлению.**

Сразу становится понятным, каким образом регулируется транскапиллярный обмен веществ в КСС. Поддержание полного несмачивания поверхности эндотелиоцита - процесс энергетически затратный. Когда у эндотелиоцита всего достаточно, в том числе и энергии, он выключает смачиваемость и тем самым приостанавливает обмен веществ. Как только энергия иссекает, смачиваемость поверхности эндотелиоцита самопроизвольно включается. Поверхность эн-

дотелиоцита начинает испытывать давление крови. Кровь начинает взаимодействовать с поверхностью эндотелиоцита, обращённой в просвет трекера. Запускается транскапиллярный обмен веществ и энергии.

Таким образом, **феномен сверхтекучести крови является обязательным и необходимым условием функционирования КСС.** При этом линейная протяжённость КСС становится не критичной для работы генератора потока крови сердца. Потеря значительной части тела, например, в результате травмы (отрыв или ампутация одной или нескольких конечностей) или увеличение массы тела существенно или не влияет, или почти не влияет, на функционирование КСС.

Феномен сверхтекучести крови воспринимается, на первый взгляд, как некое чудо, но, однако:

«Есть многое на свете, друг Горацио,
что не снилось нашим мудрецам»
(В. Шекспир).

Существование феномена сверхтекучести крови поддаётся экспериментальной проверке. Есть одна очень хорошо забытая работа, которая может быть иллюстрацией феномена сверхтекучести крови в КСС (Яуре Г. Г., 1947 [6]: «Наблюдая в микроскоп движение крови в неизменённых сосудах, мы видим вдоль стенок сосудов узкий прозрачный слой, отделяющий основную массу потока крови от соприкосновения с интимой сосудов. Толщина этого слоя достигает до 0,1 радиуса сосуда. В руководствах по физиологии этот слой именуется паузейлевым пространством. Он как пубой охватывает столб быстро несущихся кровяных телец и в нём мы не видим ни красных, ни белых клеток. Окутанный этой пубой, столб эритроцитов движется так, как будто кровяные тельца связаны между собою. Никакого различия в скоростях движения эритроцитов в центре столба и на его краю, границе светлого слоя, не видно. Не видно и вращательных движений эритроцитов, которые неизбежно должны были бы возникать при сложном распределении скоростей, и что было бы тем более заметно на эритроцитах эллиптической формы холод-

нокровных животных. Между тем, хотя эритроциты в движущемся столбе располагаются своими осями по разным направлениям – вдоль оси сосуда, вкось и даже поперечно – всё же вращения не наблюдается. Можно заметить только наклонение осей эритроцитов на крутых изгибах извитого хода капилляров. Всё движение происходит с изумляющей глаз гладкостью. Вся масса столба движется одинаково с пульсаторными ускорениями, соответствующим каждой систоле сердца и диастолическими замедлениями. В венах эти замедления и ускорения слабо заметны. Такое движение крови мы можем назвать столбовым движением жидкости, отличающимся от пластического течения тем, что на границе стенка сосуда – прозрачный плазматический слой движение совершается со скольжением...».

Существует огромное количество морфологических проявлений свёртываемости крови. Нужно только знать, куда смотреть. Для этого необходимо подкорректировать наши представления о характере движения крови в КСС. Это принципиально важно! Необходимо принять как постулат, что движение крови в КСС обладает дуализмом: с одной стороны **это сплошной волновой поток полидисперсной суспензии с не-сферической формой дисперсной фазы**, с другой стороны – **это поток порций крови (квантов крови), следующих один за другим без разрывов**.

Дискретный подход к структурному анализу КСС радикально упрощает задачу формализованного описания конфигурации КСС и позволяет построить (быть может, впервые в истории математизации биологических структур) изящную аксиоматическую математическую модель (теорию) конфигурации КСС.

Различные аспекты этой математической модели (теории) были развиты в работах автора этой статьи [7, 8, 9, 10 и др.]. Ключевым звеном этой математической модели является постулат, что при свёртываемости крови распад порции крови (кванта крови) при прохождении через узел описывается законом сохранения импульса в классической (школьной) векторной форме:

$$m_1 \mathbf{v}_1 = m_2 \mathbf{v}_2 + m_3 \mathbf{v}_3,$$

где m_i – масса кванта крови в i -м трекере узла ($i=1, 2, 3$); $\mathbf{v}_i$ – вектор скорости кванта крови в i -м трекере.

Из этого постулата выводятся аналитически все наблюдаемые морфологические проявления свёртываемости крови:

- 1) узлы реальных КСС имеют степень ветвления $n=3$;
- 2) отношение K/T есть постоянная величина – $2/3$;
- 3) оси симметрии трёх трекаров в области узла лежат в одной плоскости и пересекаются в одной точке;
- 4) каждый из трёх углов, образующихся при пересечении осей симметрии трекаров в области узла всегда меньше 180° , а их сумма всегда равна 360° ;
- 5) для узлов, образованных трекарами, имеющими диаметры внутреннего просвета меньше 100 мкм , справедлива универсальная математическая модель узла, разработанная автором этой статьи (в этом случае кровь по своим физическим свойствам приближается к неньютоновской жидкости);
- 6) для узлов, образованных трекарами, имеющими диаметры внутреннего просвета превышающие 100 мкм , справедлива математическая модель W. Roux, формализованная С. D. Murray, модифицированная автором этой статьи (в этом случае кровь по своим свойствам приближается к ньютоновской жидкости), представляющая собой частный случай указанной в п. 6 универсальной математической модели узла;
- 7) узел обладает плоскостью симметрии, в которой лежат и пересекаются оси симметрии трекаров и всегда асимметричен в ней;
- 9) среди бесконечного множества геометрически возможных конфигураций узлов феномен свёртываемости крови предопределяет бесконечное подмножество определённых геометрически возможных конфигураций меньшей мощности, реализующихся в реальных КСС;
- 10) феномен свёртываемости крови «запрещает» существование определённого бесконечного подмножества симметричных конфигураций внутри вышеуказанного предопределённого подмножества;
- 11) КСС обладают энантиоморфизмом, т.е. «левизной» и «правизной» в зависимости

от положения по отношению к плоскости билатеральной симметрии тела;

12) феномен сверхтекучести крови предопределяет форму внутреннего просвета узла;

13) феномен сверхтекучести крови предопределяет появление искривлённости у трекеров и цепные реакции подстройки конфигураций узлов под оптимальную.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Источник финансирования: Авторы заявляют о финансировании проведенного исследования из собственных средств.

ЛИТЕРАТУРА/REFERENCES

1. Гильберт Д., Бернайс П. Основания математики. Логические исчисления и формализация арифметики. М.: Наука, 1979: 23. [Gilbert D, Bernays P. Foundations of Mathematics. Logical calculus and formalization of arithmetic. M.: Nauka, 1979: 23. (In Russ.)]
2. Чижевский А.Л. Структурный анализ движущейся крови. М.: АН СССР, 1959: 5-13. [Chizhevsky AL. Structural analysis of moving blood. M.: AN SSSR, 1959: 5-13. (In Russ.)]
3. Залманов А.С. Тайная мудрость человеческого организма. Париж, 1958. 240 с. [Zalmanov AS. The secret wisdom of the human body. Paris, 1958. 240 p. (In Russ.)]
4. Козлов В.И., Мельман Е.П., Нейко Е.М., Шутка Б.В. Гистофизиология капилляров. СПб.: Наука, 1994:3. [Kozlov VI, Melman EP, Neiko EM, Shutka BV. Histophysiology of capillaries. St. Petersburg: Nauka, 1994:3. (In Russ.)]
5. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика: учебное пособие. В 10 т. Т. VI. Гидродинамика. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1988: 706-30. [Landau LD, Lifshitz EM. Theoretical physics: textbook. In 10 vols. T. VI. Hydrodynamics. M.: Science. Ch. ed. Phys.-Math. lit., 1988: 706-30. (In Russ.)]
6. Яуре Г.Г. Об особой форме движения жидкости (крови) в здоровых кровеносных сосудах. Доклады Академии Наук СССР. 1947;9:34-42. [Yaure GG. About a special form

of fluid (blood) movement in healthy blood vessels. *Reports of the Academy of Sciences of the USSR*. 1947;9:34-42. (In Russ.)]

7. Глотов В.В. Правила Ру и конфигурации микрососудистых бифуркаций. *Биофизика*. 1992; 37(2): 341-4. [Glotov VV. Rules of Roux and configurations of microvascular bifurcations. *Biophysics*. 1992; 37(2): 341-4. (In Russ.)]

8. Глотов В.А. Структурный анализ микрососудистых бифуркаций. (Микрососудистый узел и гемодинамический фактор). Смоленск: АО "Амипресс", 1995. 253 с. [Glotov VA. Structural analysis of micro-vascular bifurcations. (Micro-vascular node and hemodynamic factor). Smolensk: АО "Amipress", 1995. 253 p. (In Russ.)]

9. Глотов В.А. Принцип симметрии Кюри и конфигурации сосудистых бифуркаций, их симметрия и асимметрия, классификация, энантиоморфизм сосудистых сетей. Вестник новых медицинских технологий. 2000;7(1): 16-20. [Glotov V.A. Curie symmetry principle and configurations of vascular bifurcations, their symmetry and asymmetry, classification, enantiomorphism of vascular networks. *Bulletin of new medical technologies*. 2000;7(1): 16-20. (In Russ.)]

10. Глотов В.А. Функциональная анатомия внутреннего просвета кровеносных сосудистых сетей: роль гемодинамического фактора и сил поверхностного натяжения в его формировании, аксиоматический подход. Однораловские морфологические чтения: сборник материалов Всероссийской научной конференции с международным участием ФГБОУ ВО «ВГМУ им. Н. Н. Бурденко» Минздрава России. М.: Издательство «Научная книга», 2019: 48-54. [Glotov V.A. Functional anatomy of the internal lumen of the blood vascular networks: the role of the hemodynamic factor and surface tension forces in its formation, an axiomatic approach. *Odnorolovsky morphological readings: collection of materials of the All-Russian scientific conference with international participation N. N. Burdenko* of the Ministry of Health of Russia. M.: Publishing house "Scientific book", 2019: 48-54. (In Russ.)]

Автор выражает искреннюю признательность Сергею Аркадьевичу Региферу, Валентину Ивановичу Козлову и Василию Васильевичу Курьянову за доброжелательное внимание, интерес, жаркие споры, критику, неизменную поддержку этого научного направления исследований и за счастье работать рядом с ними.