

Оригинальные статьи
ВОЗНЮК И. А.^{1,2}, ПОЛУШИН А. Ю.¹,
СТЕПАНОВ Е. А.³

Количественная оценка ультразвуковых параметров мозгового кровотока (значение и норма)

¹ Военно-медицинская академия им. С. М. Кирова, Санкт-Петербург

² Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт скорой помощи
им. И. И. Джанелидзе

³ Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
e-mail: voznjouk@emergency.spb.ru

Реферат

Ультразвуковая доплерография занимает ведущее место среди диагностических методик, использующихся в динамической оценке мозгового кровотока у пациентов с ишемическим инсультом. Сегодня нет единого взгляда на диапазон нормальных значений измеряемых параметров, также неоднозначен выбор параметров для характеристики церебрального кровотока. Нами проведен анализ литературных источников с нормативной базой абсолютных значений показателей скорости и рассчитываемых коэффициентов у здоровых лиц. Сформированы общие нормы ультразвуковых параметров основных интра- и экстракраниальных сосудов для различных возрастных категорий.

Ключевые слова: ультразвуковая доплерография, нормативные показатели, линейные скорости кровотока, рассчитываемые индексы.

Voznyuk I. A.^{1,2}, Polushin A. Yu.¹, Stepanov E. A.³

Quantitative estimation of the parameters of ultrasonic cerebral blood flow (value and norm)

¹ Medical Military Academy, Saint-Petersburg

² Saint-Petersburg I. I. Dzhanelidze Research Institute Of Emergency Medicine

³ Saint-Petersburg State Polytechnical University
e-mail: voznjouk@emergency.spb.ru

Abstract

Ultrasound dopplerography occupies a leading place among the diagnostic methods that can be used in the dynamic assessment of cerebral blood flow in patients with ischemic stroke. Today there is no common view on a range of normal values of measured parameters, as well ambiguous choice of parameters for the characterization of cerebral blood flow. We performed the analysis of literary sources with the regulatory framework of the absolute values of rates and calculated coefficients in healthy persons. Formed a common regulations ultrasonic parameters of the main intra- and extracranial vessels for different age categories.

Keywords: ultrasonic dopplerography, normative indicators, linear blood flow velocity, calculated indices.

Введение

Современная комплексная диагностика сосудистых заболеваний головного мозга базируется на совместном использовании методов лучевой и ультразвуковой диагностики. Однако ультразвуковая доплеровская оценка кровотока в мозговых артериях занимает ведущее место как наиболее мобильный метод скрининга, динамического наблюдения и мониторинга у пациентов с высоким риском острой недостаточности кровоснабжения мозга или при состоявшейся цереброваскулярной катастрофе.

Значение количественных параметров мозгового кровотока

При всем разнообразии патогенетических вариантов повреждения сосудистого русла головного мозга

(стенозы церебральных и магистральных артерий головы, артериальный спазм, гиперперфузионный синдром, острая церебральная ишемия и тромбоз, ремоделирование мозгового кровообращения при синдромах коллатерализации и обкрадывании и др.) имеется несколько диагностически важных параметров доплеровского сигнала, изменения которых являются универсальными и безусловно воспроизводимыми — направление потока по отношению к источнику ультразвукового излучения, вид спектра, величина максимальной систолической и минимальной диастолической скорости [14, 31, 37].

Наиболее постоянным параметром является направленность потоков, так как мозговое кровообращение возможно только в пределах анатомического

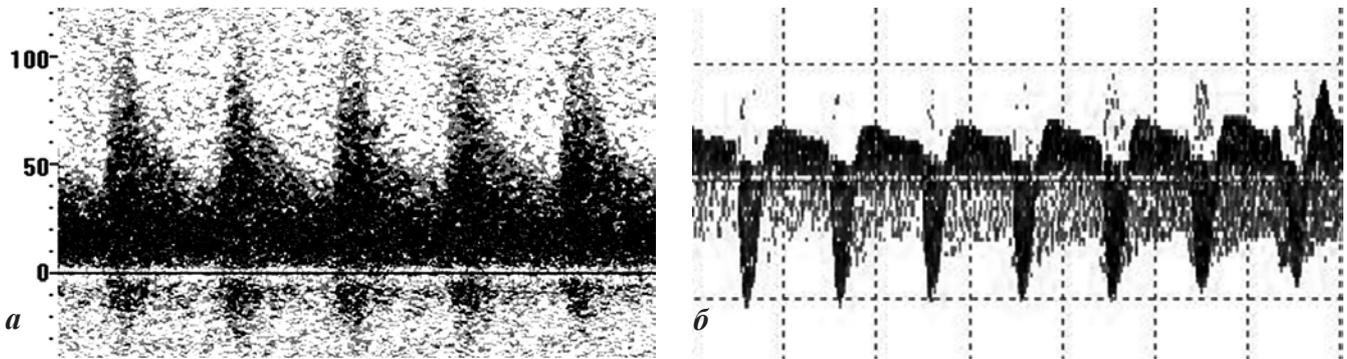


Рис. 1. Допплеровская регистрация кровотока (спектрограммы): *а* — искажение сигнала при стенозировании просвета мозговой артерии, спектральный комплекс имеет признаки перераспределения в область низких частот («скоростей») с заполнением «спектрального окна», свидетельствующее о турбулентности потока в области стеноза; *б* — сигнал от позвоночной артерии в сегменте V4 при сформировавшемся синдроме частичного позвоночно-подключичного обкрадывания при стенозе подключичной артерии — кровоток двунаправленный (реверберирующий), турбулентный

расположения мозговых артериальных образований, имеющих эфферентное по отношению к сердцу распределение потоков. В случае очевидной проблемы, при закупорке или грубом стенозировании направления потоков изменяются в соответствии с возможностями коллатеральной системы, а предпочтение в оценке доплерограмм, как правило, отдается качественным характеристикам спектра — форме, распределению частот, направлению и звуковым феноменам. Главными признаками патологии являются искажение спектрального профиля (турбулентность, заполнение спектрального окна, деформация систоло-диастолического комплекса) (рис. 1, *а*) или «патологический переток» (рис. 1, *б*).

Количественная оценка кровотока в артериях головного мозга основывается как на непосредственно измеряемых параметрах доплерограммы (амплитуда, распределение частот, импульсные вариации), так и на различных рассчитываемых индексах.

Наиболее востребованным измеряемым доплеровским параметром является скорость потока как контрольная величина для артериальных сосудов с определенными, близкими к «постоянным» характеристиками (диаметр, глубина залегания). Исходно предполагается, что при отсутствии аномалий строения и заболеваний сосудов, формирующих церебральную артериальную систему, абсолютные значения параметров кровотока в покое постоянны

для конкретного человека, а их отклонения при функциональных нагрузках (гипоксия, физическая нагрузка и пр.) соответствуют диапазону резерва ауторегуляции.

Источником абсолютных параметров церебрального кровотока и рассчитываемых индексов является сам доплеровский спектр — графическое изображение зарегистрированных частот, составивших звуковую характеристику потока. Спектр имеет отчетливые пики, соответствующие сердечному циклу, значение которых входит в группу абсолютных количественных параметров (рис. 2).

1. Систолическая скорость максимальная (V_s) — наиболее важный параметр, отражает максимальное (мгновенное) ускорение кровотока в систолическую фазу сердечного цикла, применяется для оценки достаточности кровотока и при сравнении потоков в одноименных артериях. Зависит от величины сердечного выброса, диаметра и упруго-эластических свойств стенки сосуда, реологических свойств крови и ряда других факторов.

2. Диастолическая скорость конечная (V_{de}) отражает уровень кровотока в фазу диастолы, зависит от сопротивления кровотоку дистальнее места измерения (чем выше сопротивление, тем меньше диастолическая скорость).

3. Средняя скорость за сердечный цикл (V_m) — расчетный параметр, зависит от множества факторов,

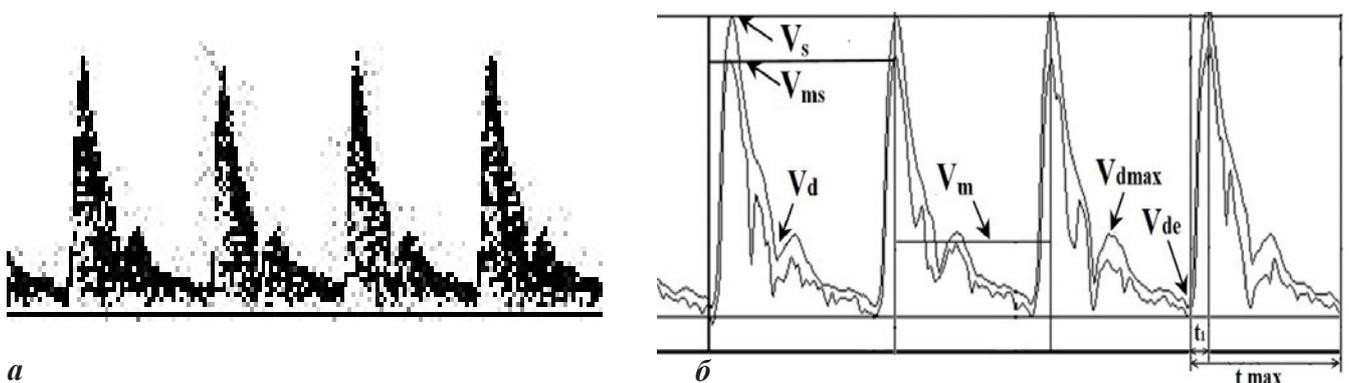


Рис. 2. Вид спектрограммы общей сонной артерии (*а*); детали спектрограммы (*б*): «огигающие» систолической максимальной скорости (V_s), средней скорости за сердечный цикл (V_m) и абсолютные параметры (V_s — максимальная систолическая скорость кровотока; V_{ms} — значение средней скорости кровотока в систоле; V_m — средняя скорость кровотока за сердечный цикл; V_d — диастолическая скорость кровотока; V_{dmax} — максимальная диастолическая скорость кровотока; V_{de} — конечная диастолическая скорость кровотока)

ОРИГИНАЛЬНЫЕ СТАТЬИ

является производной от максимальных значений скорости кровотока в период одного сердечного цикла, косвенно отражает возможность перфузии в оцениваемом сосудистом бассейне, используется при вычислении объемной скорости потока (снижение амплитуды этого параметра косвенно указывает на уменьшение перфузии в оцениваемом сосудистом регионе).

4. Средняя скорость в систолу (V_{ms}) отражает максимальное (мгновенное) значение средней скорости кровотока в систолическую фазу, обладает наибольшей информативностью при стенозах $>50\%$, используется для ориентировочного вычисления процента стеноза (более точные значения степени стенозирования получают при дуплексном сканировании).

На основе обозначенных параметров, характеризующих спектральные кривые, разработаны расчетные коэффициенты, позволяющие количественно описать нормальные и патологические черты полученного сигнала. В число коэффициентов, наиболее часто используемых для клинической оценки параметров кровотока, входят:

1) индекс циркуляторного сопротивления (RI, индекс резистивности, предложен L. Pourcelot [29]) — представляет собой отношение разности максимальной систолической и конечной диастолической частот к максимальной систолической частоте, отражает величину периферического сопротивления в бассейне лоцируемой артерии. Индекс не зависит от абсолютных значений, угла локации артерии и не изменяется с возрастом (по другим данным, с возрастом повышается). Повышение индекса — стеноз, ангиоспазм, тромбоз дистальнее места локации. Уменьшение индекса — дилатированный сегмент дистальнее места локации, артериовенозный шунт. Вычисляется по формуле

$$RI = (V_s - V_{de}) / V_s;$$

2) индекс пульсативности (PI, индекс пульсации, предложен R. Gosling et al. [17]) — представляет собой отношение разности максимальных систолической и диастолической частот к частоте средней за сердечный цикл:

$$PI = (V_s - V_{dmax}) / V_m.$$

Данный показатель может быть рассчитан способом, предложенным D. Hanker и D. Young [23]. В формуле используется разность максимальной систолической и диастолической частот («от пика до пика»), в таком случае показатель является более чувствительным:

$$PI = (V_s - V_{de}) / V_m.$$

Индекс пульсативности отражает упруго-эластические свойства артерий проксимальнее области локации, достоверно снижается с возрастом. При локации сонной артерии указывает на близость к суженному (стенозированному) участку. Высокий

индекс может наблюдаться в мозговых артериях у пожилых людей, пациентов, длительно страдающих артериальной гипертензией и увеличенным сердечным выбросом, а также при гипервентиляции;

3) систоло-диастолическое отношение ($ISD = V_s / V_d$, индекс предложен S. Stewart) — отражает упруго-эластические свойства лоцируемой артерий и достоверно изменяется с возрастом;

4) индекс спектрального расширения (SBI) — представляет собой отношение разности максимальной систолической и средней частоты в систолу (имеющей наибольшую мощность) к максимальной систолической частоте. Индекс характеризует степень турбулентности кровотока в месте локации. При изменениях стенки (просвета) артерий и возникновении турбулентности потока в спектре возрастает мощность низких частот и, следовательно, уменьшается площадь спектрального окна.

$$SBI = (V_s - V_{ms}) / V_s;$$

5) коэффициент асимметрии (КА) — величина, характеризующая степень различия показателей доплеровских сигналов, полученных с симметричных участков одноименных артерий. Данный показатель обладает большей диагностической значимостью по сравнению с абсолютными величинами. В норме допустимая величина асимметрии не превышает 20–30 %.

$$KA(\%) = \frac{X - Y}{X} \cdot 100,$$

где X — наибольшее значение показателя; Y — наименьшее значение показателя;

6) показатель степени стеноза артерии (STI, индекс P. Arbeille [14]), полученный при оценке параметров ультразвукового спектра, приблизительно отражает степень сужения артерии. Наибольшую достоверность индекс имеет при величине стеноза артериального сосуда от 50 до 90 %, при меньших значениях степени стеноза чувствительность этого показателя крайне низка. Значения индекса возрастают при нарастании степени стеноза артерии.

$$STI = 0,9(1 - V_{ms} / V_s) 100 \%;$$

7) ИППВ — индекс подъема пульсовой волны — параметр, определяющий форму анакроты, представляет собой соотношение временных параметров спектрального комплекса: $ИППВ = (t_{max} - t_1) / t_{max}$, где t_{max} — время полной развертки спектра; t_1 — время подъема анакроты (рис. 2, б). Индекс отражает эластические свойства лоцируемой артерии, более актуален для экстракраниальных (эластических) сосудов. При уплотнении или повышении тонуса растяжимость артериальной стенки ухудшается, и время подъема анакроты увеличивается, что, в свою очередь, увеличивает значение индекса. Повышенные значения индекса чаще встречаются при гипертонии, васкулите, диабете, церебральном атеросклерозе.

Сегодня тесная взаимосвязь между нарастанием степени стенозирования артерии и риском развития

инсульта доказана, при этом достоверное возрастание линейной скорости кровотока становится основным диагностическим аргументом. Мировой более чем 35-летний опыт изучения скоростных параметров артериального кровотока головного мозга, позволил считать возможным наличие нормативных значений этих параметров для всех сегментов цереброваскулярной системы, а отклонения измеряемых параметров от средних статистических значений в популяции рассматривать как количественный признак актуальной патологии. Так, например, возрастание количественного показателя скорости кровотока в диагностике сужения просвета артерии в диапазоне от 20 до 70 % имеет главенствующее значение, так как явные искажения картины спектра в этом диапазоне еще отсутствуют.

Также особую важность абсолютные значения скорости кровотока имеют при оценке резерва коллатерального кровообращения или расчетах индекса Lindegaard (TPI, трансмиссионный пульсационный индекс: отношение скоростей в экстра- и интракраниальном сегментах артерий каротидного бассейна) при церебральном вазоспазме. Кроме того, все суждения о количественных значениях тонической составляющей лоцируемого сосуда, состоянии резистивного сегмента церебрального артериального бассейна и реактивных изменениях в период функционального напряжения также являются производными анализа параметров скорости.

Нормальные значения основных доплеровских параметров

Литературные источники, приводящие значения «нормы» для кровотока в магистральных артериях головы, встречаются со времени выхода работ R. Aaslid (1982) [11] и обновляются каждое десятилетие, вплоть до 2013 г. Нами проведен анализ 38 источников с нормативной базой абсолютных значений показателей скорости или рассчитываемых коэффициентов, наиболее часто используемых как основные

при обучении или для цитирования. Однако при обращении к этим источникам становится очевидной непреодолимая проблема — нет единого взгляда на диапазон нормальных значений измеряемых параметров, также неоднозначен выбор параметров для характеристики церебрального кровотока. В источниках разных лет имеется параллельное использование единиц измерения, отражающих абсолютные значения доплеровского сигнала — см/с и Гц. В качестве примеров приводим выдержки предлагаемых авторами нормативных значений по основным сегментам каротидной системы — внутренней сонной артерии (ВСА) и средней мозговой артерии (СМА), которые демонстрируют значительный разброс данных и принципы их систематизации (табл. 1; 2). Еще менее однородны параметры кровотока для артерий вертебрально-базиллярной системы (табл. 3).

Существенные колебания представленных значений могут быть объяснены рядом технических и методических причин.

Во-первых, при сборе данных авторами использовались различные ультразвуковые системы — приборы дуплексного сканирования (ДС) и так называемые «слепые» доплеровские анализаторы (УЗДГ). Кроме того, при работе на УЗДГ-приборах авторы использовали конструктивно различные зонды — «импульсные» и «непрерывные» (карандашные).

Дополнительной причиной разброса получаемых показателей являлось различие в размещении ультразвукового объема стробирования над потоком. При использовании ДС контрольный объем помещался исследователем внутрь потока, выделяя, как правило, центральную наиболее быстро движущуюся его часть. При использовании УЗДГ ультразвуковое «облако» (контрольный стробируемый объем) всегда избыточно покрывало поток, превышая сосудистый просвет (рис. 3). Кроме того, длительное время существовали различия в стандартах калибровки доплеровских анализаторов, произведенных в разных странах.

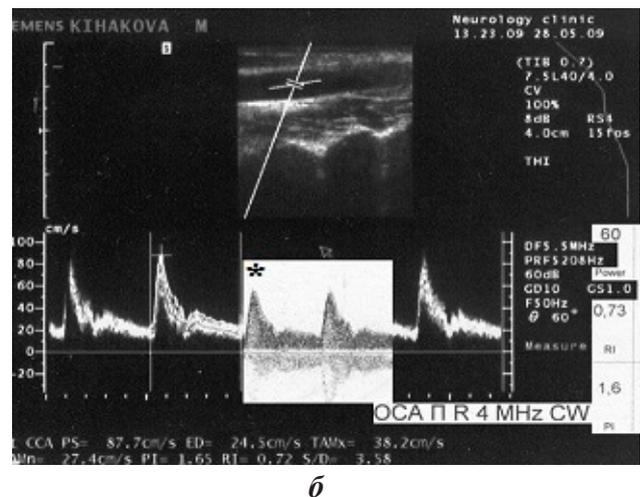
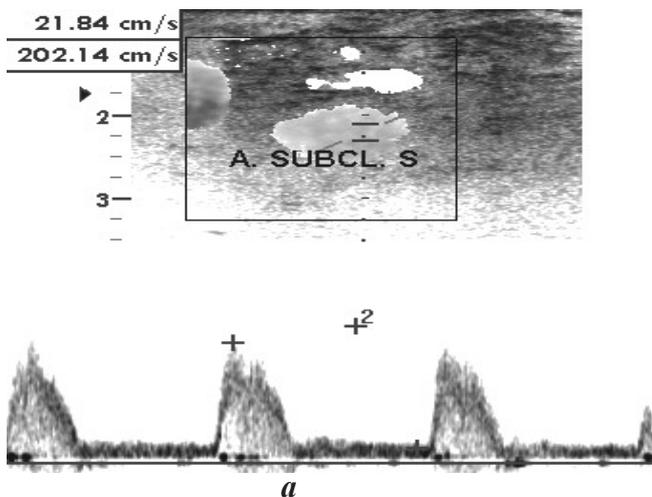


Рис. 3. Регистрация кровотока в артерии методом ДС: *а* — в верхней части рисунка обозначено размещение «контрольного стробируемого объема» в просвете подключичной артерии (стрелка), в нижней — вид спектрограммы; *б* — «контрольный стробируемый объем» в просвете общей сонной артерии (стрелка) значительно меньше просвета артерии и, как следствие, существенное различие амплитуды спектров (до 30 ед.), полученных методом ДС и УЗДГ (оба спектра в нижней части рисунка, наложение УЗДГ спектра (*) выполнено с соблюдением масштаба)

ОРИГИНАЛЬНЫЕ СТАТЬИ

Сводные данные нормативных значений измеряемых параметров кровотока для внутренней сонной артерии

Таблица 1

Авторы	Возраст, лет	Vs, см/с	Vde, см/с	Vm, см/с	PI	RI
Aaslid R. et al., 1982 (интра)				30–48		
Шотеков П. М., Гинянова Е. А. 1986 (экстра)	До 20 20–29 30–39 40–49 50–59 >60	81–119 77–103 68–114 76–102 50–92 53–87	34–48 30–46 34–50 34–52 22–42 19–35	41–61 41–59 45–67 43–63 27–53 28–52		
Spencer M. P., Whisler D. 1986 (СЗ-сифон)	44–80	32–80				
Rautenberg W., 1987	<40 40–60 >60		8,4–16,6 6,8–19,5 7,2–12,3	31,4–42,7 24,2–46,0 29,6–41,3	0,8–2,82	0,57–0,71 0,55–0,71 0,64–0,72
Ringelstein E. F. et al., 1990 (сифон)				ВСА (С6–7) 30–48 ВСА (С3) 30 сифон (С2) 30–60 33,2–60,8		
Schoning et al., 1994 ДС (экстра)	20–63	50–82	20–32		0,79–1,37	0,53–0,67
Lupetin A. R. et al., 1995 г.				ВСА (С6–7) 30–48 сифон (С2) 50–60		
Лелюк В. Г., Лелюк С. Э. 1996, ДС (экстра)	20–45	47,7–76,1	14,5–26,3		0,91–1,91	0,60–0,74
Кузнецов А. Н., Вознюк И. А., 1998	<40 40–60 >60	37,05±5,6 35,1±10,9 35,45±5,8	12,5±4,1 13,15±6,3 9,6±2,4			
Scheel et al., 2000, ДС (экстра)	20–39 40–59 60–85	54–90 55–75 47–69	21–31 21–31 15–25	21–31 20–30 15–27		
Lee K.Y. et al., 2000	51–63	28–46	12–22	19–31	0,60–1,02	
Alexandrov A.V., 2004 (сифон)				48–50	0,9–1,0	
Yazici et al., 2005, ДС (экстра)	21–50 51–80	62–90 51–79	23–37 19–31			0,54–0,66 0,56–0,66
Albayarak et al., 2006 (экстра, С4-С5)		лВСА 36,9–66,7 пВСА 40–68,8	лВСА 11,5–24,7 пВСА 12,9–23,3			
Алашеев А.М., Инюшкин С.Н., 2006	<20 <40 40–60 >60			23,6–59,2 10,7–63,5 19,2–54,0 14,3–39,1	0,83–0,86 0,82–0,87 0,82–0,97 0,89–0,97	
Гайдар Б. В. и др., 2008 (СЗ-сифон)	<20 <40 40–60 >60			37,3–57,9 36,9–54,1 35,0–53,4 26,4–43,0	0,82–0,86 0,81–0,87 0,84–0,92 0,83–0,93	
Гайдар Б. В. и др., 2008 (С6-экстра)	<20 <40 40–60 >60			32,5–50,3 23,9–50,3 27,9–45,3 20,5–32,9	0,84–0,86 0,82–0,86 0,85–0,93 0,91–0,95	
Sato et al., 2011, ДС (экстра)	19–29			27,1–29,7		
Bowler et al., 2011 (экстра)		лВСА 70–114,8 пВСА 77,1–120,5	26,8–40,4 31,2–45,2	41,8–64,6 47,9–68,9		

Сводные данные нормативных значений измеряемых параметров кровотока для средней мозговой артерии

Таблица 2

Авторы	Возраст, лет	Vs, см/с	Vde, см/с	Vm, см/с	PI	RI
Aaslid R. et al., 1982				50–74		
Reutern G.-M., Arnolds B. J. et. al., 1985	<40 >60	76–112 62–98				
Шотеков П. М., Тинянова Е. А., 1986	До 20 20–29 30–39 40–49 50–59 >60	90–136 81–123 84–124 80–116 59–97 53–101	41–67 37–55 38–54 38–54 29–45 24–44	52–86 48–70 51–73 49–75 38–62 32–62		
Budingen H. J. et. al., 1986	<40 40–60 >60	90–118 69–105 61–101				
Rautenberg W., 1987	<40 40–60 >60	80,9–108,1 74,1–107,9 63,1–93,1	39–52,2 34,8–53,8 22,8–41	50–66,8 46,2–69,2 33,6–55,8	0,62–1,04 0,72–1,0 0,85–1,21	0,39–0,71 0,33–0,67 0,31–0,59
Harders A., 1987	30–60	71–117				
Hennerici H. et. al., 1987	От 40 40–60 >60	81–107 74–108 63–93				
Zanette E. M. et. al., 1987	От 40 н ст.	66–98				
Vriens E. M. et. al., 1989	40–60 >60	82–110 69–103				
НИКИТИН Ю. М., 1989	<20 <40 40–60 >60			49,8–74,4 48,8–70 45,9–69,3 34,1–56,5	0,8–0,86 0,83–0,85 0,79–0,85 0,76–0,86	
Ringelstein E. F. et al., 1990				42,4–73,6		
Sorteberg W. et. al., 1990	От 40	89–119				
Newell D., Aaslid R., 1992				43–67		
Steinmeier R. et al., 1993					0,4–1,0	
Martin P. J. et al., 1994	20–39 40–59 >60	113 (109–116) 106 (101–111) 92 (88–96)	51 (49–53) 47 (45–50) 35 (33–37)	74 (71–76) 72 (69–76) 58 (55–61)	0,84 (0,82–0,87) 0,81 (0,79–0,83) 0,97 (0,93–1,02)	0,55 (0,54–0,56) 0,54 (0,53–0,55) 0,62 (0,60–0,64)
Lupetin A. R. et al., 1995				46–86	0,8–1,2	
Шахнович А. Р., Шахнович В. А., 1996	<40 40–60 >60	85–107 81–103 69–99				
Lee K. Y. et al., 2000 (УЗДГ)	51–63	60–92	27–47	42–66	0,58–0,90	
Bakker S. L. M. et al., 2001 (женщины)	<65 65–70 70–75 75–80 80–85 85–90 >90	88,0 86,4 84,0 85,4 78,7 77,6 89,3	37,3 34,2 30,8 30,0 26,2 23,9 23,2	54,2 51,6 48,5 48,3 43,7 41,8 41,8	0,89 0,97 1,02 1,11 1,16 1,22 1,25	

Окончание табл. 2

Авторы	Возраст, лет	Vs, см/с	Vd, см/с	Vm, см/с	PI	RI
Bakker S. L. M. et al., 2001 (мужчины)	<65	79,6	32,6	48,3	0,89	
	65–70	79,4	30,4	46,4	0,97	
	70–75	80,1	30,0	46,7	1,02	
	75–80	79,7	27,7	45,0	1,11	
	80–85	80,8	26,0	44,3	1,16	
	85–90	86,0	26,7	46,4	1,22	
	>90	79,7	24,1	42,7	1,25	
Акопов S., Whitman G. T., 2002				(п) 44,46–66,52 (л) 44,29–65,17		
Лелюк В. Г., Лелюк С. Э., 2003	20–45	88,8–115	35,8–51,2	51–70,8	0,78–1,18	0,52–0,68
Кузнецов А. Н., Вознюк И. А., 1998	<40	94,5±13,6	45,6±6,6	58,4±8,4		
	40–60	91,0±16,9	44,3±9,5	57,7±11,5		
	>60	78,1±15,0	31,9±9,1	44,7±11,1		
Alexandrov A. V., 2004				64–72 (<80)	0,6–1,1	
Алашеев А.М., Инюшкин С.Н., 2006	<20			37,5–86,7	0,77–0,82	
	<40			38,2–80,6	0,81–0,86	
	40–60			34,2–81,0	0,76–0,88	
	>60			22,9–67,7	0,72–0,91	
Алашеев А.М., Инюшкин С.Н., 2006	16–79			38–92	0,6–1,2	
Society for Vasc. Ultrasound, 2009				43–67		
Collado E., 2012		67–97	29–46	44–65	0,71–0,96	0,50–0,96
Наши данные, 2013	<40				0,7–1,1	
	40–60				0,7–1,1	
	>60				0,7–1,0	

Во-вторых, причиной значительного расхождения нормативных значений является произвольный выбор артериальных сегментов для «контрольной» локации. Как демонстрируют приводимые таблицы, при оценке кровотока в ВСА исследователи используют как экстра-, так и интракраниальный ее сегменты, нередко детализируя фрагменты сифона и интракраниальной порции (С 3-4-5-6-7). В то же время в части литературных источников указания на артериальный сегмент, наоборот, отсутствуют.

Мета-анализ количественных параметров мозгового кровотока

Изучив публикации о первичных оригинальных исследованиях, источники, обобщающие вторичные результаты, посвященные данной проблеме, мы сочли необходимым и возможным объединение наиболее авторитетных данных для мета-анализа и получения усредненных значений ультразвуковых параметров церебрального кровотока у лиц различных возрастных групп (табл. 4). При ее создании были использованы значения, приводимые в 38 литературных источниках, а также собственные результаты многолетнего изучения мозгового кровотока у пациентов с цереброваскулярной патологией и у здоровых лиц.

Собственные данные по изучению кровотока у пациентов без признаков цереброваскулярной патологии, без актуальных жалоб и факторов риска

были получены методом доплерографии («слепым» методом). Использование сканеров (ДС) для набора базы данных сочли нецелесообразным, так как наибольшее число маргинальных отклонений значений скорости кровотока встречалось в работах авторов, использовавших метод ДС, не уточнявших (возможно, не контролировавших) стробируемые объемы, получая результат только из центральной части потока. В то же время если при получении сигнала методом ДС придерживаться рекомендуемого полного объема стробирования, анатомически совпадающего с просветом артериального сосуда, то амплитудные характеристики потоков будут совпадать, что уравнивает диагностическую ценность методик ДС и «слепой» доплерографии.

Для формирования базы норм параметров мозгового кровотока мы использовали собственные материалы обследования когорты здоровых лиц (n=115). Всего были обследованы 93 мужчины и 22 женщины в возрасте от 22 до 69 лет (средний возраст — 55±4,6 года; среди мужчин — 51±5,7 года; среди женщин — 58±3,4 года). Регистрацию данных осуществляли на аппарате Spectra SF («Афалина», Санкт-Петербург, Россия) по стандартной методике, двукратно с промежутком в двое суток в одно и то же время, в одном и том же доплеровском «окне» с соблюдением угла наклона (40–45°), с учетом глубины локации. Локацию осуществляли импульсными зондами с частотой 2,0 МГц транскраниально, а экс-

Сводные данные нормативных значений измеряемых параметров кровотока для позвоночной артерии

Таблица 3

Авторы	Возраст, лет	Vs, см/с	Vde, см/с	Vm, см/с	PI	RI
Aaslid R. et al., 1982				28–48		
Arnolds B. J., Reutem G. M., 1986	20–40 40–60	60,1–67,1 42–60				
Шотеков П. М., Тинянова Е. А., 1986 (V4)	До 20 20–29 30–39 40–49 50–59 >60	60–86 67–85 50–80 46–78 40–62 30–52	31–41 29–41 26–36 20–38 16–26 11–31	39–49 39–51 30–46 26–48 18–34 15–31		
Rautenberg W., 1987	<40 40–60 >60	48,5–64,1 42,5–76,5 32,2–69,6	21,7–32,3 20,8–37,6 12,0–30,4	27,1–42,7 24,7–48,1 18,1–42,9	0,60–1,06 0,65–1,03 0,77–1,17	0,36–0,68 0,37–0,61 0,34–0,62
Hennerici H. et al., 1987	20–40 40–60 >60	48–64 42–76 32–70				
Никитин Ю. М., 1989	<20 <40 40–60 >60			31,1–45,3 29,4–43,2 24,8–50,0 25,4–42,8	0,84–0,86 0,83–0,85 0,83–0,85 0,82–0,86	
Martin P. J. et al., 1994 (ТКЦДС, V4)	20–39 40–59 >60	63–69 55–63 48–55	29–32 26–29 20–24	42–47 38–43 30–36	0,79–0,85 0,74–0,82 0,89–0,99	0,53–0,56 0,51–0,54 0,57–0,61
Lupetin A. R. et al., 1995				27–55		
Шахнович А. Р., Шахнович В. А., 1996	20–40 40–60 >60	50–70 43–67 35–65				
Лелюк В.Г., Лелюк С.Э., 2003 (V4)	20–45	27,8–54,2	5,6–18,4	12,8–27,2	0,64–1,02	0,6–0,8
Alexandrov A. V., 2004				22–30	0,6–1,0	
Collado E., 2012		65–74	31–34	47–50	0,72–0,80	0,54–0,72

тракраниально зондами с непрерывным излучением с частотными характеристиками 4 и 8 МГц. Пересчет частотных характеристик в показатели линейной скорости кровотока (ЛСК, см/с) осуществлялся автоматически с использованием программного обеспечения ультразвуковых анализаторов кровотока с применением следующих коэффициентов:

- для датчика 2 МГц — ЛСК (см/с) = 39,0 x F (кГц);
- для датчика 4 МГц — ЛСК (см/с) = 19,5 x F (кГц);
- для датчика 8 МГц — ЛСК (см/с) = 9,75 x F (кГц).

Объектом оценки были количественные размерные параметры кровотока: систолическая, диастолическая, максимальная и средняя скорость, а также безразмерные диагностические индексы: пульсативности, резистивности, систоло-диастолический, спектрального расширения, индекс подъема пульсовой волны. Регистрировали параметры кровотока в мозговых и магистральных артериях (экстракраниально — ОСА, ВСА, НСА, ПА; интракраниально — СМА, ПМА, ЗМА, ОА). Затем рассчитывали средние величины, которые принимались и заносились в

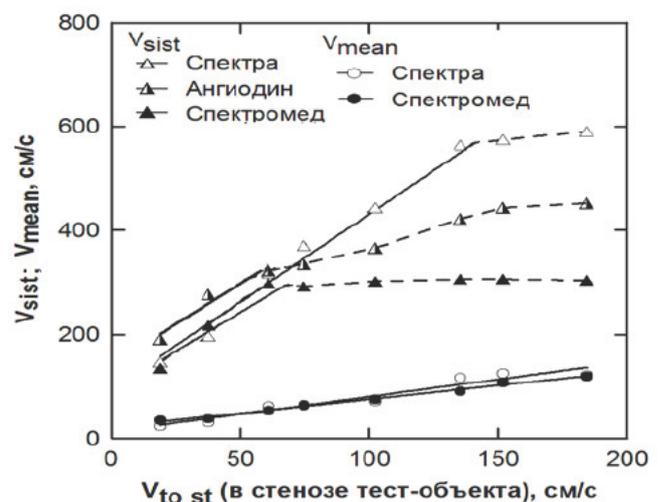


Рис. 4. Калибровочные характеристики и распределения максимальной систолической скорости в имитаторе стеноза тест-объекта (измеренные тремя доплеровскими анализаторами кровотока) — нарастание разброса полученных данных (по скорости потока) в диапазоне высоких скоростей при использовании различных приборов [10]

ОРИГИНАЛЬНЫЕ СТАТЬИ

базу «нормальных» значений (табл. 4). При оценке потоковых параметров на различных ультразвуковых приборах была отмечена девиация значений, что потребовало дополнительного анализа. Для повышения достоверности и точности диагностики нами дополнительно была проведена стратификация доплеровских анализаторов кровотока, широко представленных сегодня в диагностических службах сосудистых центров («Ангиодин», «Спектра», «Сономед»). Для этого использовали моделирование сегментов цереброваскулярной системы и потоков крови в специально созданном метрологическом фантоме.

Проведенные сравнительные испытания в спектральном доплеровском режиме позволили установить незначимое отличие значений скорости потоков, полученных разными приборами в случае неизмененных сосудов в диапазоне литературной «нормы». Однако при больших скоростях кровотока (на модели стеноза) различия данных, полученных на разной инструментальной базе, значимо отличались, что, несомненно, потребует учета при оценке степени стенотического потока у больных.

Опыт работы с тест-объектом также позволил повысить точность определения количественных показателей гемодинамики ультразвуковыми доплеровскими приборами с учетом углов локации (рис. 4). Полученная информация позволила нам обоснованно объединять собственные и литературные результаты обследования, лежащие в основном диапазоне без учета инструментальной базы, исключая из мета-анализа экстрамаргинальные результаты.

Заключение

Обращаясь к абсолютным значениям, следует учитывать некоторые особенности распределения скоростных параметров по мозговым артериям, обусловленные совокупностью физиологических и инструментальных причин.

Эти особенности проявляются наличием обычной иерархии значений скоростей кровотока, как на экстра-, так и на интракраниальном уровне: ВСА > НСА > ПА; СМА > ПМА > ВСА > ЗМА > ОА > ПА. Между артериями большого анастомоза основания головного мозга преобладание скорости в СМА над ПМА и ЗМА укладывается в 20 %-й диапазон; поток

Усредненные значения ультразвуковых параметров магистральных артерий головы и шеи для лиц различных возрастных групп

Таблица 4

Артерия	Возраст, лет	Vs, см/с	Vde, см/с	Vm, см/с	PI	RI	SBI	ИППВ
ОСА	<40	71,2–112,6	15,8–25,1	26,1–33,6	1,3–2,5	0,68–0,81	24,2–58,4	10,9–13,9
	40–60	67,0–104,7	14,9–25,0	20,8–31,3	1,2–2,6	0,69–0,82	28,0–56,0	4,8–16,0
	>60	63,3–104	13,1–22,9	17,9–26,8	1,2–2,4	0,67–0,81	30,0–53,4	10,5–15,3
НСА	<40	60,9–93,7	9,7–17,7	22,4–30,2	1,4–2,9	0,74–0,85	38,7–58,7	8,7–14,5
	40–60	59,3–95,0	10,8–18,6	22,8–40,1	1,5–3,0	0,74–0,85	34,4–57,0	8,2–13,9
	>60	57,0–101	8,6–17,1	18,6–34,7	1,3–2,8	0,76–0,86	30,6–61,1	9,6–17,6
ВСА (Э)	<40	54,3–87,2	18,3–30,0	29,6–44,0	0,80–1,63	0,56–0,69	29,7–52,2	8,2–14,4
	40–60	50,0–78,4	17,0–30,0	27,2–43,8	0,76–1,54	0,56–0,69	32,6–48,9	8,1–19,5
	>60	48,0–76,9	16,3–27,0	25,8–39,8	0,80–1,45	0,57–0,68	32,7–45,4	9,7–20,0
ПА (Э)	20–40	33,7–56,1	16,4–29,4	17,7–26,3	0,85–1,65	0,60–0,74	32,0–55,5	7,9–12,8
	40–60	30,4–60,3	14,8–27,7	15,7–23,9	0,81–2,01	0,61–0,74	32,0–53,0	6,5–21,6
	>60	27,6–58,6	14,9–29,1	14,0–22,0	0,87–1,37	0,61–0,73	40,0–55,0	9,5–21,9
ВСА (И)	20–40	72,5–108,5	32,0–48,0	36,0–57,0	0,84–0,91	Н/д	Н/д	Н/д
	40–60	63,0–97,0	28,0–47,0	36,7–56,0	0,85–0,96	Н/д	Н/д	Н/д
	>60	42,5–83,5	19,0–35,0	32,8–50,4	0,87–0,96	Н/д	Н/д	Н/д
ПА (И)	20–40	52,6–68,1	23,0–31,0	29,8–44,0	0,70–0,93	0,50–0,69	Н/д	Н/д
	40–60	45,0–67,6	20,3–30,2	27,4–44,0	0,70–0,92	0,50–0,67	Н/д	Н/д
	>60	40,4–64,3	18,5–29,8	26,6–42,6	0,76–0,96	0,48–0,65	Н/д	Н/д
СМА	20–40	83,9–109,7	36,9–53,4	48,2–70,2	0,72–1,03	0,49–0,72	40,0–60,0	9,1–16,8
	40–60	77,5–104,6	34,4–46,8	47,3–70,0	0,71–1,02	0,48–0,70	30,0–60,0	11,0–22,9
	>60	70,9–98,0	28,6–40,5	43,2–66,4	0,73–1,03	0,47–0,73	30,0–75,0	14,5–24,4
ПМА	20–40	69,9–93,8	35,0–45,2	40,9–61,5	0,76–0,99	0,49–0,66	40,0–65,0	9,7–16,8
	40–60	69,6–94,1	33,8–43,7	42,5–61,7	0,75–0,98	0,49–0,64	35,0–60,0	10,5–20,9
	>60	59,5–87,3	29,1–38,2	39,7–60,3	0,75–0,99	0,48–0,69	50,0–60,0	12,0–23,5
ЗМА	20–40	50,8–71,2	26,0–33,7	32,6–48,7	0,72–0,96	0,47–0,60	45,0–70,0	9,2–17,3
	40–60	48,3–73,6	25,0–33,8	30,9–49,5	0,73–0,97	0,47–0,59	25,0–60,0	9,7–21,1
	>60	46,0–64,5	19,0–28,5	29,6–47,4	0,76–0,99	0,48–0,62	50,0–60,0	11,3–22,8
ОА	20–40	51,3–71,5	24,4–34,0	30,5–48,1	0,73–0,95	0,45–0,58	30,0–60,0	8,4–16,3
	40–60	46,7–72,1	21,8–33,0	28,0–47,3	0,74–0,97	0,47–0,56	30,0–50,3	9,4–23,4
	>60	42,4–64,5	17,8–30,0	26,4–45,1	0,76–0,99	0,46–0,59	40,0–60,0	12,5–21,2

Примечание: И — интракраниальный отдел; Э — экстракраниальный отдел; Н/д — нет данных.

по ОА принципиально всегда выше, чем в «лучшей» из позвоночных артерий. Нормативное значение коэффициента асимметрии между одноименными артериями каротидного бассейна не должно превышать 20 %, по позвоночным артериям допустимо 30 %-е различие скоростных показателей. С учетом анатомических особенностей (формирования правых артериальных отделов из брахиоцефального ствола), меньшие значения чаще регистрируются в правых ПА и ВСА.

На наш взгляд, отсутствие объединенных материалов, отражающих наиболее типичные диапазоны значений основных количественных параметров спектра мозгового кровотока, создает условия для

ошибочной интерпретации полученной диагностической информации и необоснованной широты трактовки в заключениях специалистов. Кроме того, значительный разброс абсолютных значений и относительных величин (расчетных индексов) затрудняет формирование логической основы при обучении специалистов, что представляет существенную проблему при подготовке кадров.

Использование единых методических подходов и нормативных значений позволяет преодолевать объективные трудности ультразвуковой оценки мозгового кровотока и снизить риск операторских ошибок, повысив диагностическую ценность метода.

Литература

1. Белкин А. А., Алашеев А. М., Инюшкин С. Н. Транскраниальная доплерография в интенсивной терапии: метод. рук-во для врачей. Петрозаводск: ИнтелТек, 2006. 103 с.
2. Гайдар Б. В., Семенютин В. Б., Парфенов В. Е., Свистов Д. В. Транскраниальная доплерография в нейрохирургии. СПб.: Элби, 2008. 281 с.
3. Кузнецов А. Н., Вознюк И. А., Справочник по церебральной доплерографии / под ред. М. М. Одинака. М.: Спектрмед, 1998. 82 с.
4. Лелюк В. Г., Лелюк С. Э. Возможности дуплексного сканирования в определении объемных показателей мозгового кровотока // Ультразвуковая диагностика. 1996. № 1. С. 24–31.
5. Лелюк В. Г., Лелюк С. Э. Ультразвуковая ангиология. М.: Реальное время, 2003.
6. Никитин Ю. М. Поражение сосудов дуги аорты и их ветвей у больных с цереброваскулярными заболеваниями (клинико-доплеро-ангиографическое исследование): дис. д-ра мед наук. М., 1989. 385 с.
7. Шахнович А. Р., Шахнович В. А. Диагностика нарушения мозгового кровообращения. Транскраниальная доплерография. М., 1996. 446 с.
8. Шотеков П. М., Тинянова Е. А. Транскраниальная доплерография (нормативные величины) // Журн. неврол. и психиатрии им. С. С. Корсакова. 1991. № 12. С. 46–51.
9. Шотеков П. М. Ультразвуковая Допплерография. София, 1986. 123 с.
10. Юхнев А. Д., Чумаков Ю. С., Вознюк И. А., Ерофеев А. А. Опыт экспериментального моделирования гидродинамики кровообращения // Клини. физиология кровообращения. 2009. № 4. С. 15–21.
11. Aaslid R., Markwalder T. M., Nornes H. Noninvasive transcranial Doppler ultrasound recording of flow velocity in basal cerebral arteries // J. Neurosurg. 1982. № 57. P.769–774.
12. Akopov S., Whitman G. T. Hemodynamic Studies in Early Ischemic Stroke: Serial Transcranial Doppler and Magnetic Resonance Angiography Evaluation // Stroke. 2002. № 33. P. 1274–1279.
13. Alexandrov A. V. Cerebrovascular ultrasound in stroke prevention and treatment. Blackwell Publishing, 2004. 267 p.
14. Arbeille P., Lapiere F., Patat F. et al. Evaluation du degree des stenoses carotidiennes par l'analyse spectrale du signal. Doppler // Archive des Maladies de Coeur. 1984. № 77. P. 1097–1107.
15. Arnolds B. J., Reutern G. M. Transcranial Doppler sonography. Examination technique and normal reference // Ultrasound. Med. Biol. 1986. № 12. P. 115–123.
16. Bakker S. L. M., de Leeuw F-E., den Heijer T. et al. Cerebral hemodynamic indices in the elderly. The Rotterdam study (1990–1993, 1998) // Cerebral hemodynamic indices measured by means of transcranial Doppler. Publ. in 2001. P. 13–23.
17. Baskett J. J., Beasley M. G., Murphy G. J. et al. Screening for carotid junction disease by spectral analysis of Doppler signals // Cardiovascular Research. XI. 1977. P.147–155.
18. Budingen H. J., Hoffmann C. et al. Transcranial doppler flow monitoring in the middle cerebral artery during carotid operations. Zuckschwerd, Munich, 1986. P. 290.
19. Budingen H. J., Staudacher Th. Die Identifizierung der Arteria basilaris mit der transkranialen Doppler-Sonographie // Ultraschall. 1987. № 8. P. 95–101.
20. Collado E. Transcranial Doppler: The Protocol. Report on Total Endovascular Series, Cerebrovascular II, 2012.
21. Gosling R. G., King D. H., Newman D. L., Woodcock J. P. Journal of Ultrasonics USI papers. 1969. P. 16–23.
22. Grolimund P., Seiler R. W., Aaslid R. et al. Evaluation of cerebrovascular disease by combined extracranial and transcranial Doppler sonography. Experience in 1,039 patients // Stroke. 1987. № 18. P. 1018–1024.
23. Hanker D. O., Young D. F. Comparisons of diagnostic velocity waveform indices. Abstracts of 32nd, ACEMB. Denver, Colorado. 1979. P. 103.
24. Harders A. Neurosurgical applications of transcranial Doppler sonography. Vienna: Springer-Verlag, 1987.
25. Hennerici H. et al. Transcranial Doppler ultrasound for the assessment of intracranial arterial flow velocity. Part I: Examination of technique and normal values // Surg. Neurol. 1987. № 27. P. 439–448.
26. Lee K. Y., Sohn Y. H., Baik J. S. et al. Arterial Pulsatility as an Index of Cerebral Microangiopathy in Diabetes // Stroke. 2000. № 31. P. 1111–1115.
27. Lupetin A. R., Davis D. A., Beckman I., Dash N. Transcranial Doppler Sonography Part 1. Principles, Technique and Normal Appearances // RadloGraphcls. 1995. № 15. P. 179–191.
28. Martin P. J., Evans D. H., Naylor A. R. Transcranial color-coded sonography of the basal cerebral circulation. Reference data from 115 volunteers // Stroke. 1994. № 25. P.390–396.
29. Newell D., Aaslid R. Transcranial Doppler. N.-Y.: Raven Press, 1992.
30. Pourcelot L. Application cliniques de l'examen Doppler transcutané // Velometric Ultrasonor. Doppler. 1974. Vol. 34. P. 625–627.
31. Rautenberg W. Transcranials Dopplersonographie

ОРИГИНАЛЬНЫЕ СТАТЬИ

// Dureb. *lutengs-storunden des Gehirnsneue diagnostike Moglichkeiten*. Dusseldorf, 1987. S. 30–55.

32. Reutern G. -M., Arnolds B. J. *Transcranial doppler sonography in cerebrovascular disease* // *Stroke*. 1985. P. 16.

33. Ringelstein E. F. et al. *Transcranial Doppler sonography: anatomical landmarks and normal velocity values* // *Ultrasound Med. Biol.* 1990. № 16. P. 745–761.

34. Sato K., Ogoh S., Hirasawa A. et al. *The distribution of blood flow in the carotid and vertebral arteries during dynamic exercise in humans* // *J. Physiol. (Lond)*, 2011.

35. Scheel P., Ruge C., Petruch U. R., Schöning M. *Color duplex measurement of cerebral blood flow volume in healthy adults* // *Stroke*. 2000. № 31. P. 147–150.

36. Schöning M., Walter J., Scheel P. *Estimation of cerebral blood flow through color duplex sonography of the carotid and vertebral arteries in healthy adults* // *Stroke*. 1994. № 25. P. 17–22.

37. Sloan M. A., Haley E. C. Jr., Kassell N. F. et al. *Sensitivity and specificity of transcranial Doppler ultrasonography in the diagnosis of vasospasm following subarachnoid hemorrhage* // *Neurology*. 1989. № 39 (11). P. 1514–1518.

38. Society for Vascular Ultrasound. *Intracranial Cerebrovascular Evaluation — Transcranial Doppler (Non-Imaging) Vascular Professional Performance Guideline*, 2009.

39. Sorteberg W. et al. *Side-to-side differences and day-to-day variations of transcranial doppler parameters in normal subjects* // *J. Ultrasound. Med.* 1990. № 9. P. 403–409.

40. Spencer M. P., Whisler D. *Transorbital Doppler diagnosis of intracranial arterial stenosis* // *Stroke*. 1986. № 17. P. 916–921.

41. Steinmeier R., Laumer R., Bondar I. et al. *Cerebral hemodynamics in subarachnoid hemorrhage evaluated by transcranial Doppler sonography. Part 2: Pulsatility indices: Normal reference values and characteristics in subarachnoid hemorrhage* // *Neurosurgery*. 1993. № 33. P. 10–19.

42. Vriens E. M. et al. *Transcranial pulsed Doppler measurements of blood velocity in the middle cerebral artery: reference values at rest and during hyperventilation in healthy volunteers in relation to age and sex* // *Ultrasound. Med. Biol.* 1989. № 15. P. 1–8.

43. Yazıcı B., Erdoğan B., Tugay A. *Cerebral blood flow measurements of the extracranial carotid and vertebral arteries with Doppler ultrasonography in healthy adults* // *Diagn. Interv. Radiol.* 2005. № 11. P. 195–198.

44. Zanette E. M. et al. *Comparison of cerebral angiography and transcranial Doppler sonography in acute stroke* // *Stroke*. 1989. № 20. P. 899–903.