

УДК 616.133.33-004.6:616-005.5  
DOI: 10.24884/1682-6655-2021-20-2-45-51

В. Б. СЕМЕНЮТИН, А. А. НИКИФОРОВА, В. А. АЛИЕВ,  
Г. К. ПАНУНЦЕВ

## Информативность распределения кровотока в прецеребральных артериях при определении гемодинамической значимости каротидного стеноза

Федеральное государственное бюджетное учреждение «Национальный медицинский исследовательский центр имени В. А. Алмазова» Министерства здравоохранения Российской Федерации, Санкт-Петербург, Россия  
197341, Россия, Санкт-Петербург, ул. Аккуратова, д. 2  
E-mail: lbcp@mail.ru

Статья поступила в редакцию 21.10.20 г.; принята к печати 05.02.21 г.

### Резюме

**Введение.** В настоящее время гемодинамически значимым стенозом считается стеноз с повышением пиковой систолической скорости от 230 см/с, что соответствует 70 % сужению внутренней сонной артерии. При этом не учитываются изменения церебральной гемодинамики и состояние коллатерального кровообращения, которые можно определить по соотношению кровотока в прецеребральных артериях. **Цель** – оценить перераспределение объемной скорости кровотока в прецеребральных артериях у больных с критическими каротидными стенозами. **Материалы и методы.** Обследованы 40 пациентов с критическими каротидными стенозами (13 пациентов имели стеноз 70–79 %, 11 пациентов – 80–89 %, 16 пациентов – 90–99 %) в возрасте от 49 до 80 лет. Индекс кровотока в прецеребральных артериях определяли с помощью дуплексного сканирования (Vivid e, США), линейную скорость кровотока в интракраниальных артериях – с помощью транскраниальной доплерографии (MultiDop X, Германия). **Результаты.** У 60 % пациентов отмечено достоверное снижение индекса кровотока в ипсилатеральной стенозированной внутренней сонной артерии ( $p < 0,05$ ). У 49 % пациентов выявлено достоверное повышение индекса кровотока в контрлатеральной внутренней сонной артерии, а также линейной скорости кровотока в контрлатеральной передней мозговой артерии ( $p < 0,05$ ). Только у 39 % пациентов наблюдали повышение индекса кровотока в ипсилатеральной позвоночной артерии и линейной скорости кровотока в ипсилатеральной задней мозговой артерии ( $p < 0,05$ ). У 13 % пациентов отмечено повышение индекса кровотока в наружной сонной артерии ( $p < 0,05$ ). **Заключение.** Таким образом, критическая степень каротидного стеноза не всегда свидетельствует о его гемодинамической значимости. Соотношение индекса кровотока в прецеребральных артериях может быть использовано как дополнительный критерий для оценки гемодинамической значимости каротидного стеноза и, наряду с другими показателями, должно учитываться при определении тактики лечения пациентов.

**Ключевые слова:** каротидный стеноз, гемодинамическая значимость, прецеребральные артерии, мозговой кровоток, индекс кровотока

**Для цитирования:** Семенютин В. Б., Никифорова А. А., Алиев В. А., Панунцев Г. К. Информативность распределения кровотока в прецеребральных артериях при определении гемодинамической значимости каротидного стеноза. Регионарное кровообращение и микроциркуляция. 2021;20(2):45–51. Doi: 10.24884/1682-6655-2021-20-2-45-51.

UDC 616.133.33-004.6:616-005.5  
DOI: 10.24884/1682-6655-2021-20-2-45-51

V. B. SEMENYUTIN, A. A. NIKIFOROVA, V. A. ALIEV,  
G. K. PANUNTSEV

## Informativity of blood flow distribution in the precerebral arteries for determining the hemodynamic significance of carotid stenosis

V. A. Almazov National Medical Research Centre, Saint Petersburg, Russia  
2, Akkuratova str., Saint Petersburg, Russia, 197341  
E-mail: lbcp@mail.ru

Received 21.10.20; accepted 05.02.21

### Summary

**Introduction.** Conventionally, hemodynamic significance of carotid stenosis is characterized with an increased peak systolic velocity up to 230 cm/s, which corresponds to 70 % carotid stenosis. This does not take into account changes of cerebral hemodynamics or collateral circulation, which can be determined by assessment of blood flow distribution in precerebral arteries. **Aim** – to evaluate blood flow redistribution in precerebral arteries in patients with critical carotid stenosis. **Materials**

*and methods.* 40 patients (aged 49–80 y. o.) with critical carotid stenosis were studied (13 patients had 70–79 % stenosis, 11 patients – 80–89 %, and 16 patients – 90–99 % stenosis). Flow velocity index in precerebral arteries was determined with duplex scanning (Vivid e, USA), whereas linear blood flow velocity in intracranial arteries – with transcranial Doppler (MultiDop X, Germany). *Results.* In 60 % of patients, flow velocity index in ipsilateral carotid artery was reliably decreased ( $p < 0.05$ ). In 49 % of patients flow velocity index in contralateral carotid artery and blood flow velocity in contralateral anterior cerebral artery were reliably increased ( $p < 0.05$ ), as well as linear blood flow velocity in the contralateral anterior cerebral artery. Just in 39 % of patients flow velocity index in ipsilateral vertebral artery and linear blood flow velocity in ipsilateral posterior cerebral artery were increased ( $p < 0.05$ ). In 13 % of cases flow velocity index in the external carotid artery was increased ( $p < 0.05$ ). *Conclusion.* Thus, critical degree of carotid stenosis does not always indicate its hemodynamic significance. Flow velocity index distribution in precerebral arteries can be used as an additional criterion for assessing hemodynamic significance of carotid stenosis and, along with other indicators, should be taken into account when choosing treatment modality.

**Keywords:** carotid stenosis, hemodynamic significance, precerebral arteries, cerebral blood flow, flow velocity index

**For citation:** Semenyutin V. B., Nikiforova A. A., Aliev V. A., Panumtsev G. K. Informativity of blood flow distribution in the precerebral arteries for determining the hemodynamic significance of carotid stenosis. *Regional hemodynamics and microcirculation.* 2021;20(2):45–51. Doi: 10.24884/1682-6655-2021-20-2-45-51.

## Введение

Для определения гемодинамической значимости каротидного стеноза оценивается, в первую очередь, комплекс локальных изменений гемодинамики в области стеноза внутренней сонной артерии (ВСА): повышение пиковой систолической скорости (ПСС), турбулентность, градиент давления, снижение объемного кровотока, изменение спектра в пре- и пост-стенотическом сегментах [1–3]. До сих пор общепринятым критерием гемодинамической значимости является повышение ПСС в области стеноза более 230 см/с, что соответствует критическому сужению ВСА от 70 % [1]. Авторы определили четкую корреляцию ПСС и степени стеноза: чем больше сужение ВСА, тем выше ПСС. В то же время локальные изменения кровотока не могут отражать состояние церебральной гемодинамики, а также ее нарушения [4–7].

Гемодинамическая значимость каротидного стеноза определяется вероятностью развития нарушения мозгового кровообращения в условиях критического сужения одной из прецеребральных артерий. Важность данной оценки необходима для своевременного хирургического лечения каротидного стеноза и, соответственно, снижения риска инсульта. Многие авторы считают критерием гемодинамической значимости каротидного стеноза не только повышение ПСС, но и значения средней линейной скорости кровотока (ЛСК) в постстенотическом отделе, конечной диастолической скорости в области стеноза, а также состояние коллатерального кровообращения и предлагают мультипараметрический подход при ее оценке [4, 7–11]. Однако данные критерии не являются общепризнанными и не входят в стандартизированную шкалу оценки гемодинамической значимости каротидного стеноза.

Некоторые авторы получили новые данные по гемодинамической значимости каротидного стеноза с помощью определения соотношения кровотока в прецеребральных артериях [5, 12, 13]. Они высказали предположение, что данный показатель может быть использован как дополнительный критерий в определении степени стеноза и его гемодинамической значимости, а также как показание к его хирургической коррекции. Кроме этого, преимуществом данного подхода является его использование у пациентов с низкой проницаемостью акустических окон, у которых невозможно оценить кровотоки в артериях основания

мозга и коллатеральное кровообращение с помощью транскраниальной доплерографии. Однако в этих работах имеется большой разброс показателей кровотока в прецеребральных артериях в зависимости от степени стеноза и включения коллатералей, а также не всегда проведены сопоставления со скоростными показателями в интракраниальных артериях. Поэтому данная проблема до сих пор является актуальной и требует дальнейшего изучения с целью поиска более информативных критериев оценки гемодинамической значимости каротидного стеноза.

**Цель исследования** – оценить перераспределение объемной скорости кровотока в прецеребральных артериях у больных с критическими каротидными стенозами.

## Материалы и методы исследования

Обследованы 40 пациентов (26 мужчин, 14 женщин) с критическими стенозами ВСА от 70 % в возрасте от 49 до 80 лет. Степень стеноза определяли с помощью дуплексного сканирования (по методике NASCET), а также компьютерной или церебральной ангиографии. Бессимптомный тип течения имели 24 пациента, симптомный (ранний или поздний восстановительный период) – 16. Индекс кровотока (ИК) в прецеребральных артериях определяли с помощью дуплексного сканирования (*Vivid e*, США), рассчитывая его как произведение площади поперечного сечения каждой артерии на средневзвешенную ЛСК в ней (TAMEAN), на прямом участке (в стенозированной ВСА диаметр и ЛСК определяли дистальнее стеноза в области ламинарного кровотока), без извитостей и атеросклеротических бляшек, угол локации составлял не более 60° [14, 15]. Нормальными значениями ИК в ВСА считали от 170 до 280 мл/мин, в позвоночной артерии (ПА) – от 35 до 120 мл/мин, в наружной сонной артерии (НСА) – от 80 до 190 мл/мин [16–19]. ЛСК в интракраниальных артериях определяли с помощью транскраниальной доплерографии (*MultiDop X*, Германия).

Все пациенты были разделены по степени стеноза на три группы: I группу составили 13 пациентов со стенозом 70–79 %, II группу – 11 пациентов со стенозом 80–89 % и III группу – 16 пациентов со стенозом 90–99 %.

Статистическую обработку полученных данных проводили с помощью стандартных статистических программ («Statistica 10.0 for Windows», «Excel»),

использовали параметрические (Стьюдента  $t$ ) и непараметрические (Колмогорова – Смирнова) критерии. Отличие считали достоверным при  $p < 0,05$ .

Протокол обследования больных был одобрен Этическим комитетом Российского нейрохирургического института им. проф. А. Л. Поленова (протокол № 1 от 2 июня 2010 г.). Все пациенты, участвовавшие в клиническом исследовании, дали на это письменное добровольное согласие. Исследование выполнено в соответствии с требованиями Хельсинкской декларации Всемирной медицинской ассоциации.

### Результаты исследования и их обсуждение

У 21 (60 %) пациента (у всех пациентов III группы, у 6 II группы и только у 2 I группы) отмечено снижение ИК в ипсилатеральной стенозированной ВСА. При этом у большей части пациентов I группы (10 пациентов) снижение ИК в ипсилатеральной ВСА отсутствовало (рис. 1, а). В 5 случаях определить ИК в ипсилатеральной ВСА не представлялось возможным ввиду ее извитости, пролонгированной атеросклеротической бляшки либо высокой бифуркации общей сонной артерии.

Повышение ИК в контрлатеральной ВСА определено у 16 (49 %) пациентов (у 10 пациентов III группы, у 4 II группы и только у 2 I группы). У данных пациентов отмечали и увеличение ЛСК в контрлатеральной передней мозговой артерии ( $88 \pm 19$  см/с,  $p < 0,05$ ). При этом у большей части пациентов I группы (9 пациентов) также не отмечено повышения ИК в контрлатеральной ВСА (рис. 1, а). В 7 случаях определить ИК в контрлатеральной ВСА не представлялось возможным ввиду ее извитости или тромбоза, пролонгированной атеросклеротической бляшки либо высокой бифуркации общей сонной артерии.

Только у 14 (39 %) пациентов (у 8 пациентов III группы, у 2 II группы и у 4 I группы) наблюдали повышение ИК в ипсилатеральной ПА (рис. 1, б) и соответствующее повышение ЛСК в ипсилатеральной задней мозговой артерии ( $61 \pm 14$  см/с,  $p < 0,05$ ). При этом у большей части пациентов ИК оставался в пределах нормы. В 4 случаях определить достоверно ИК в ПА не представлялось возможным ввиду ее извитости либо наличия атеросклеротической бляшки.

Только в III группе у 4 (13 %) пациентов отмечено повышение ИК в НСА (рис. 1, в). При этом данные пациенты имели двусторонние субокклюзии или тромбоз контрлатеральной ВСА с функционированием назоглазничного анастомоза, либо разомкнутый АКБМ в задних отделах без соответствующего повышения ИК в ипсилатеральной ПА и ЛСК в ипсилатеральной задней мозговой артерии. В 10 случаях достоверно определить ИК в НСА не представлялось возможным ввиду ее извитости либо наличия атеросклеротической бляшки.

Наиболее характерные изменения кровотока в прецеребральных артериях иллюстрирует рис. 2, на котором показаны результаты дуплексного сканирования пациента с критическим (97 %) бессимптомным каротидным стенозом справа. ПСС в области стеноза составила более 320 см/с (что соответствует стенозу более 90 %). ИК в ипсилатеральной ВСА был

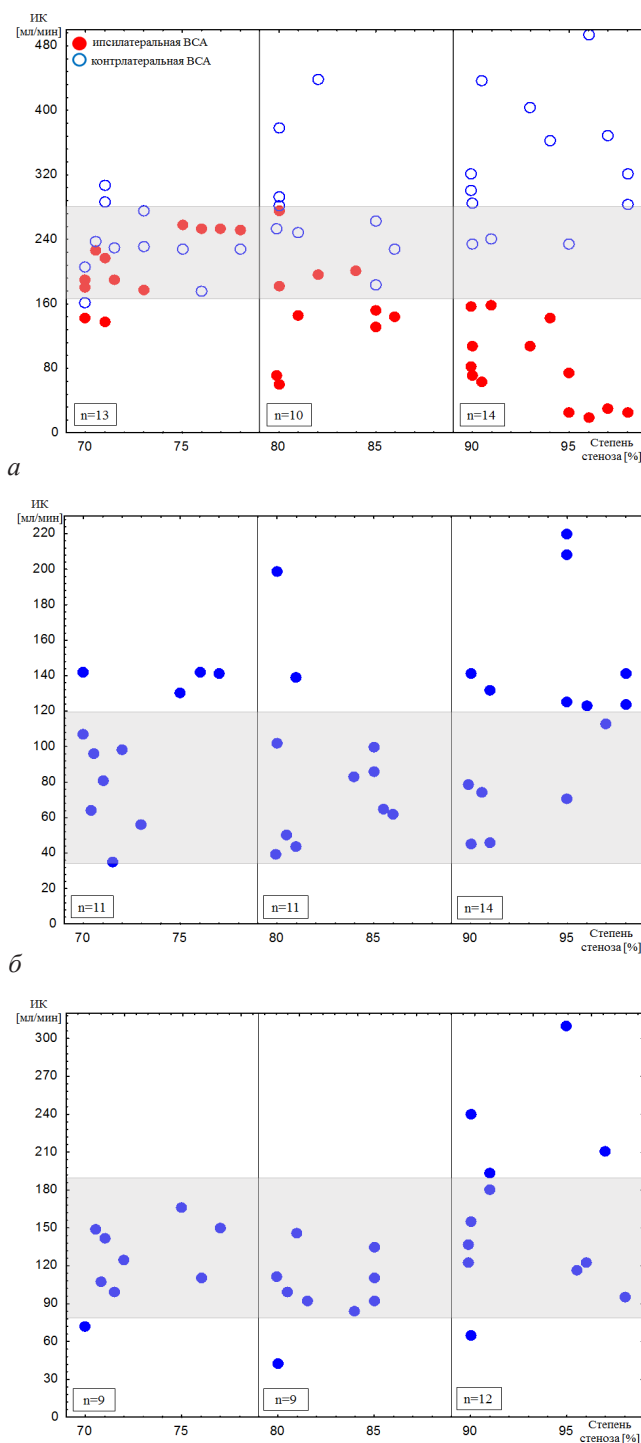


Рис. 1. Зависимость индекса кровотока (ИК) от степени каротидного стеноза: а – ипси- и контрлатеральная внутренние сонные артерии (ВСА); б – ипсилатеральная позвоночная артерия; в – ипсилатеральная наружная сонная артерия. Заштрихована область нормальных значений

Fig. 1. Dependence of the flow velocity index (FVI) on the degree of carotid stenosis: а – ipsi- and contralateral internal carotid artery (ICA); б – ipsilateral vertebral artery; в – ipsilateral external carotid artery. The area of normal values is shaded

снижен до 25 мл/мин, в контрлатеральной ВСА был повышен до 369 мл/мин, в ипсилатеральных НСА и ПА – до 211 и 113 мл/мин соответственно (рис. 2). Данные транскраниальной доплерографии свидетельствуют о компенсации коллатерального кровотока через передние отделы АКБМ (повышение ЛСК в контрлатеральной передней мозговой артерии до 72 см/с, пульсационный индекс 0,7 с паттерном



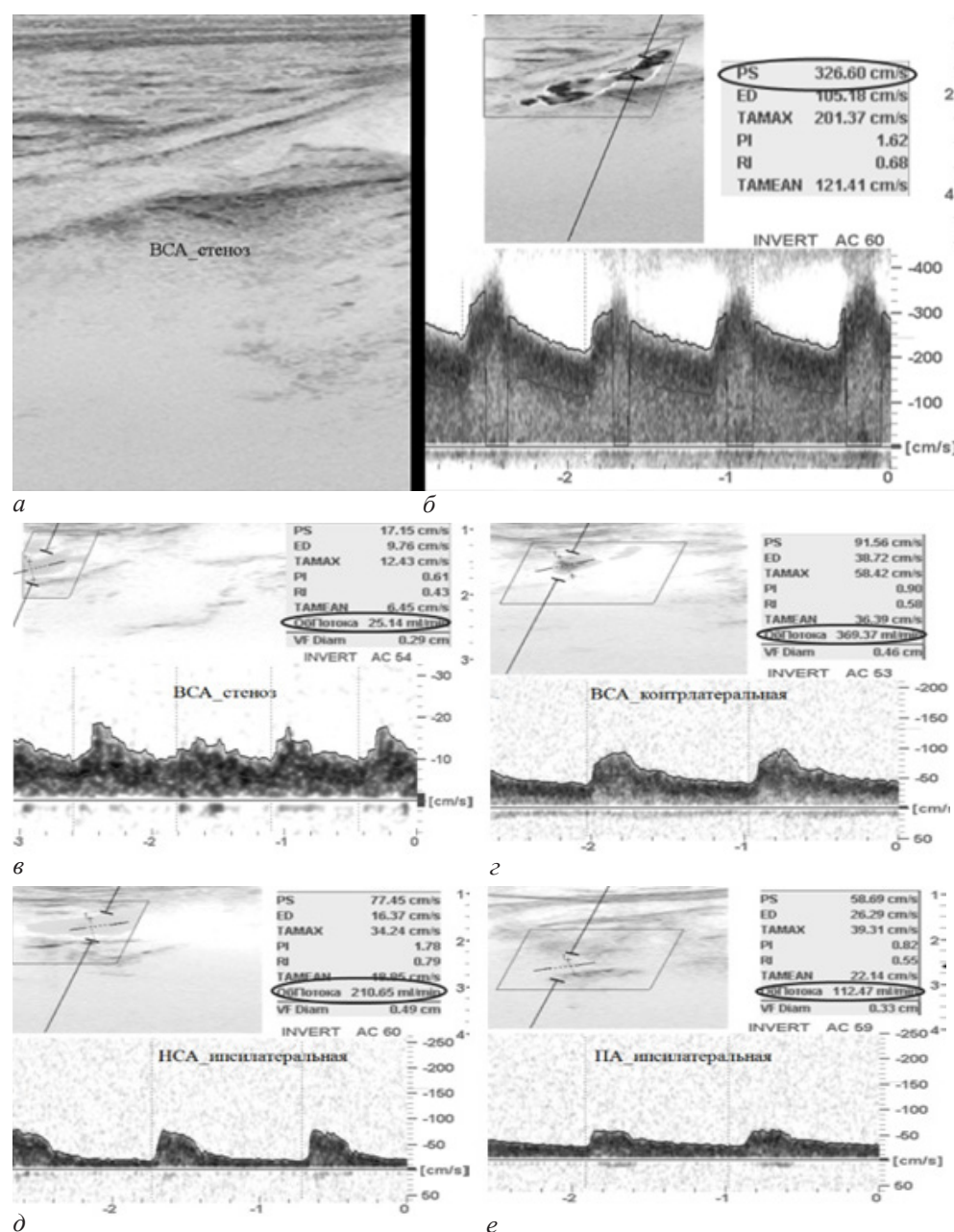


Рис. 2. Результаты дуплексного сканирования пациента 59 лет с критическим каротидным стенозом: а – стеноз правой (ипсилатеральной) внутренней сонной артерии (ВСА) в В-режиме; б – ипсилатеральная внутренняя сонная артерия в области стеноза; в – ипсилатеральная внутренняя сонная артерия дистальнее стеноза; г – контралатеральная внутренняя сонная артерия; д – ипсилатеральная наружная сонная артерия; е – ипсилатеральная позвоночная артерия

Fig. 2. The results of duplex scanning of the patient 59 years old with severe carotid stenosis: *a* – stenosis of right (ipsilateral) internal carotid artery (BCA) in B-mode; *б* – ipsilateral internal carotid artery in the area of stenosis; *в* – ipsilateral internal carotid artery distal to the stenosis; *г* – contralateral internal carotid artery; *д* – ipsilateral external carotid artery; *е* – ipsilateral vertebral artery

гиперперфузии), а также через коллатерали НСА с функционированием назоглазничного анастомоза (ретроградный кровоток в глазничной артерии с повышением ЛСК до 69 см/с и снижением пульсационного индекса до 0,8).

На рис. 3 показаны средние значения ИК в прецеребральных артериях у обследованных пациентов. Достоверное снижение ИК в ипсилатеральной ВСА и повышение ИК в контралатеральной ВСА наблюдалось только у пациентов II и III групп. Повышение ИК в ипсилатеральной ПА отмечалось у большей части пациентов III группы. Достоверное повышение ИК в ипсилатеральной НСА наблюдалось только у пациентов III группы.

Суммарный ИК в прецеребральных артериях у пациентов всех групп был в пределах нормы ( $596 \pm 133$  мл/мин: у мужчин –  $611 \pm 142$ , у женщин –  $586 \pm 122$  мл/мин) и не имел зависимости от степени каротидного стеноза ( $p > 0,08$ ).

В таблице приведены сравнительные данные дискриминантного анализа по методикам оценки гемодинамической значимости стеноза ВСА по ПСС и по ИК.

На сегодняшний день нет стандартизированных критериев оценки гемодинамической значимости каротидного стеноза [7–11]. В настоящее время все внимание при определении гемодинамической значимости сосредоточено на оценке ПСС в стенозиро-

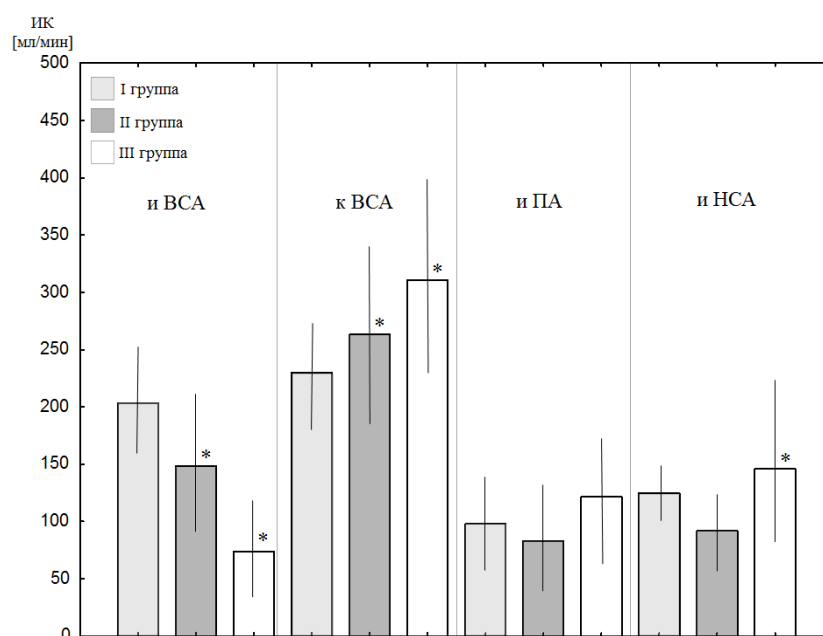


Рис. 3. Диаграмма средних значений индекса кровотока (ИК) в прецеребральных артериях в зависимости от степени каротидного стеноза: ВСА – внутренняя сонная артерия; ПА – позвоночная артерия; НСА – наружная сонная артерия; и – ипсилатеральная; к – контралатеральная; I – 70–79 %; II – 80–89 %; III – 90–99 %; \* – достоверность отличия от нормальных значений,  $p < 0,05$

Fig. 3. Diagram of mean values of the flow velocity index (ИК) in the precerebral arteries on the degree of carotid stenosis: ВСА – internal carotid artery; ПА – vertebral artery; НСА – external carotid artery; и – ipsilateral; к – contralateral; I – 70–79 %; II – 80–89 %; III – 90–99 %; \* – confidence of difference from normal values

#### Данные дискриминантного анализа по методикам оценки гемодинамической значимости критического стеноза ВСА у 35 пациентов

##### Data of discriminant analysis based on methods for assessing the hemodynamic significance of severe carotid stenosis in 35 patients

Методика	Показатель дискриминантного анализа, %				
	чувствительность	специфичность	безошибочность	ложноположительный ответ	ложноотрицательный ответ
ИК	92	90	91	10	8
ПСС	84	70	80	30	16

Примечание: ИК – индекс кровотока; ПСС – пиковая систолическая скорость; ИК – flow velocity index; ПСС – peak systolic velocity.

ванной ВСА [1, 3, 20, 21]. Однако игнорируется тот факт, что в кровоснабжении головного мозга принимают участие и другие прецеребральные артерии. Локальные изменения кровотока в стенозированной ВСА не отражают компенсаторные возможности церебральной гемодинамики и состояние коллатерального кровообращения [6, 22]. Тем более оценка ПСС может давать ложноположительные результаты при извитости артерий, кальцинированном строении атеросклеротической бляшки, tandemном поражении и сниженном сердечном выбросе [3, 23]. Многие авторы разработали свои критерии гемодинамической значимости каротидного стеноза, сформировав мультипараметрический подход для ее определения, куда вошла оценка не только локальных изменений гемодинамики, но и характеристика атеросклеротической бляшки, а также состояние коллатерального кровотока и церебральной ауторегуляции [4, 8–11, 24–26]. Некоторые авторы утверждают, что именно вклю-

чение коллатерального кровотока и снижение скорости церебральной ауторегуляции является более достоверным и объективным критерием гемодинамической значимости. Изменение церебральной гемодинамики дистальнее области каротидного стеноза напрямую определяет стратегию стратификации риска инсульта [25, 26].

Полученные нами результаты свидетельствуют о том, что достоверное снижение ИК в ипсилатеральной ВСА наблюдается в основном при стенозе от 80 % и более. При этом данная степень стеноза сопровождается, в первую очередь, повышением ИК только в контралатеральной ВСА (рис. 3) с соответствующим увеличением ЛСК в контралатеральной передней мозговой артерии. Данные изменения говорят о включении коллатерального кровообращения через передние отделы АКБМ [12, 13, 22, 27, 28].

При этом у большей части пациентов с субокклюзией ВСА было отмечено повышение ИК не только

в контрлатеральной ВСА, но и в ипсилатеральной ПА (рис. 1, б) с соответствующим увеличением ЛСК в ипсилатеральной задней мозговой артерии. Таким образом, у больных с каротидным стенозом более 90 % коллатеральное кровообращение осуществляется не только через передние, но и через задние отделы АКБМ [12, 13, 15, 27].

Повышение ИК в ипсилатеральной НСА с функционированием назоглазничного анастомоза было отмечено только у больных с субокклюзией ВСА (рис. 1, в), сопровождающейся стенозом более 90 % или тромбозом контрлатеральной ВСА или разомкнутым АКБМ (отсутствие одного из путей коллатерального кровообращения) [5, 13, 22, 28].

Достоверного изменения ИК в прецеребральных артериях у пациентов I группы (при отсутствии двусторонних стенозов ВСА либо ПА) нами отмечено не было (рис. 3). Данный факт подтверждает неоднозначность оценки гемодинамической значимости стеноза только по ПСС и не отражает действительную картину церебральной гемодинамики (таблица).

Другой вариант распределения ИК наблюдался при множественных стенозах прецеребральных артерий или разомкнутом АКБМ. В данном случае у 2 пациентов I группы наблюдалось снижение ИК в ипсилатеральной ВСА и, наоборот, отсутствие его изменений у 4 пациентов II группы (рис. 1, а). Также при множественных каротидных стенозах у 2 пациентов I группы отмечали повышение ИК в контрлатеральной ВСА и отсутствие его изменений у 8 пациентов II–III групп (рис. 1, а). У больных с двусторонними каротидными стенозами и стенозами ПА или разомкнутым АКБМ у 6 пациентов I–II групп наблюдали повышение ИК в ипсилатеральной ПА и отсутствие его изменений у 6 пациентов III группы (рис. 1, б).

Нормальные значения суммарного ИК в прецеребральных артериях, независимо от степени стеноза, при отсутствии выраженного неврологического дефицита (по шкале исхода Ренкин 1–2-я степень) и обширных очагов ишемии у пациентов с симптомным каротидным стенозом, а также отсутствие инсульта в группе бессимптомных стенозов свидетельствуют о постоянстве объемного кровотока в условиях снижения церебрального перфузионного давления на стороне критического стеноза [13, 15, 16, 18, 19].

### Заключение

Показано, что не всегда степень каротидного стеноза свидетельствует о его гемодинамической значимости. Полученные результаты свидетельствуют о большей чувствительности и специфичности количественной оценки ИК во всех прецеребральных артериях. При значениях ИК в ипсилатеральной стенозированной ВСА менее 170 мл/мин, в контрлатеральной ВСА – более 280 мл/мин, в ипсилатеральных ПА и (или) НСА – более 120 и 190 мл/мин соответственно каротидный стеноз считается гемодинамически значимым. Чем более гемодинамически значимым будет стеноз, тем большим будет соответствующее перераспределение кровотока.

Распределение ИК в прецеребральных артериях, наряду с локальными изменениями в области стеноза,

характеристикой атеросклеротической бляшки, оценкой цереброваскулярного резерва и коллатерального кровотока, может быть использовано как ведущий критерий для оценки гемодинамической значимости каротидного стеноза и должно учитываться при определении тактики лечения пациентов.

### Конфликт интересов / Conflict of interest

Авторы заявили об отсутствии конфликта интересов. / The authors declare no conflict of interest.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 19-29-01190. / The reported study was funded by RFBR, number 19-29-01190.

### Литература / References

1. Spencer M. *Hemodynamics of arterial stenosis*. Ed. M. Spencer. Martinus Nijhoff Publishers. Dordrecht. 1987:300.
2. Taylor D, Strandness D. Carotid artery duplex scanning. *J Clin Ultrasound*. 1987;15(9):635–644. Doi: 10.1002/jcu.1870150906.
3. Grant E, Benson C, Moneta G, Alexandrov A, Baker J, Bluth E, Carroll B, Eliasziw M, Gocke J, Hertzberg B, Kantanick S, Needleman L, Pellerito J, Polak J, Rholl K, Wooster D, Zierler R. Carotid artery stenosis: gray-scale and Doppler US diagnosis-Society of Radiologists in Ultrasound Consensus Conference. *Radiology*. 2003;229(2):340–346. Doi: 10.1148/radiol.2292030516.
4. Von Reutern G, Goertler M, Bornstein N, Del Sette M, Evans D, Hetzel A, Kaps M, Perren F, Razumovsky A, von Reutern M, Shiogai T, Titianova E, Traubner P, Venketasubramanian N, Wong L, Yasaka M. Neurosonology Research Group of the World Federation of Neurology. Grading carotid stenosis using ultrasonic methods. *Stroke*. 2012;43(3):916–921. Doi: 10.1161/STROKEAHA.111.636084.
5. Elwertowski M, Leszczyński J, Kaszczewski P, Lamparski K, Ho SS, Galazka Z. The importance of blood flow volume in the brain-supplying arteries for the clinical management – the impact of collateral circulation. *J Ultrason*. 2018; (18):112–119. Doi: 10.15557/JoU.2018.0016.
6. Вознюк И. А., Полушин А. Ю., Степанов Е. А. Количественная оценка ультразвуковых параметров мозгового кровотока (значение и норма) // Регионарное кровообращение и микроциркуляция. – 2013. – Т. 12, № 4. – С. 30–40. [Voznyuk IA, Polushin AYU, Stepanov EA. Quantitative estimation of the parameters of ultrasonic cerebral blood flow (value and norm). *Regional blood circulation and microcirculation*. 2013;12(4):30–40. (In Russ.)]. Doi: 10.24884/1682-6655-2013-12-4-30-40.
7. Лелюк В. Г., Лелюк С. Э. Цереброваскулярный резерв при атеросклеротическом поражении брахиоцефальных артерий // Этюды современной ультразвуковой диагностики. 2001. Вып. 2. С. 180. [Lelyuk VG, Lelyuk SE. Cerebrovascular reserve in atherosclerotic diseases of the brachiocephalic arteries. *Etudes of modern ultrasound diagnostics*. Edition 2. 2001:180. (In Russ.)].
8. Serena J, Irimia P, Calleja S, Blanco M, Vivancos J, Ayo-Martín O. Representación de la Sociedad Española de Neurosonología (SONES). Ultrasound measurement of carotid stenosis: recommendations from the Spanish Society of Neurosonology. *Neurologia*. 2013;28(7):435–442. Doi: 10.1016/j.nrl.2012.07.011.
9. Arous E, Baril D, Robinson W, Aiello F, Hevelone N, Arous E, Messina L, Schanzer A. Institutional differences in carotid artery duplex diagnostic criteria result in significant variability in classification of carotid artery stenoses and



likely lead to disparities in care. *Circ Cardiovasc Qual Outcomes*. 2014;7(3):423–429. Doi: 10.1161/CIRCOUTCOMES.113.000855.

10. Klingelhofer J. Ultrasonography of carotid stenosis. *IJCNMH*. 2014;(1):11.

11. Mozzini C, Roscia G, Casadei A, Cominacini L. Searching the perfect ultrasonic classification in assessing carotid artery stenosis: comparison and remarks upon the existing ultrasound criteria. *J Ultrasound*. 2016;19(2):83–90. Doi: 10.1007/s40477-016-0193-6.

12. Tan T, Schminke U, Lien L, Eicke B, Tegeler C. Extracranial internal carotid artery occlusion: the role of common carotid artery volume flow. *J Neuroimaging*. 2002;12(2):144–147. Doi: 10.1111/j.1552-6569.2002.tb00111.x.

13. Zarrinkoob L, Wehlin A, Ambarki K, Birgander R, Eklund A, Malm J. Blood Flow Lateralization and Collateral Compensatory Mechanisms in Patients With Carotid Artery Stenosis. *Stroke*. 2019;(50):1081–1088. Doi: 10.1161/STROKEAHA.119.024757.

14. Blanco P. Volumetric blood flow measurement using Doppler ultrasound: concerns about the technique. *J Ultrasound*. 2015;(18):201–204. Doi: 10.1007/s40477-015-0164-3.

15. Zarrinkoob L, Ambarki K, Wählin A, Birgander R, Eklund A, Malm J. Blood flow distribution in cerebral arteries. *J Cereb Blood Flow Metab*. 2015;(35):648–654. Doi: 10.1038/jcbfm.2014.241.

16. Dörfler P, Puls I, Schliesser M, Mäurer M, Becker G. Measurement of cerebral blood flow volume by extracranial sonography. *J Cereb Blood Flow Metab*. 2000;20(2):269–271. Doi: 10.1097/00004647-200002000-00007.

17. Scheel P, Ruge C, Petruch U, Schoning M. Color Duplex Measurement of Cerebral Blood Flow Volume in Healthy Adults. *Stroke*. 2000;(31):147–150. Doi: 10.1161/01.str.31.1.147.

18. Yazici B, Erdogmus B, Tugay A. Cerebral blood flow measurements of the extracranial carotid and vertebral arteries with Doppler ultrasonography in healthy adults. *Diagn. Interv. Radiol*. 2005;(110):196–198.

19. Amin-Hanjani S, Du X, Pandey DK, Thulborn KR, Charbel FT. Effect of age and vascular anatomy on blood flow in major cerebral vessels. *J Cereb Blood Flow Metab*. 2015;(35):312–318. Doi: 10.1038/jcbfm.2014.203.

20. AbuRahma A, Srivastava M, Stone P, Mousa A, Jain A, Dean L, Keiffer T, Emmett M. Critical appraisal of the Carotid Duplex Consensus criteria in the diagnosis of carotid artery stenosis. *J Vasc Surg*. 2011;53(1):53–59. Doi: 10.1016/j.jvs.2010.07.045.

21. Carnicelli AP, Stone JJ, Doyle A, Chowdhry A, Gillespie D, Chandra A. Predictive Multivariate Regression to Increase the Specificity of Carotid Duplex Ultrasound for High-grade Stenosis in Asymptomatic Patients. *Ann Vasc Surg*. 2014;28(6):1548–1555. Doi: 10.1016/j.avsg.2014.02.010.

22. Fang H, Song B, Cheng B, Wong KS, Xu YM, Ho SS, Chen XY. Compensatory patterns of collateral flow in stroke patients with unilateral and bilateral carotid stenosis. *BMC Neurol*. 2016;(16):39. Doi: 10.1186/s12883-016-0560-0.

23. Columbo J, Suckow B, Griffin C, Cronenwett J, Goodney P, Lukovits T, Zwolak R, Fillingim M. Carotid endarterectomy should not be based on consensus statement duplex velocity criteria. *J Vasc. Surg*. 2017;65(4):1029–1038. Doi: 10.1016/j.jvs.2016.11.028.

24. Arning C, Widder B, von Reutern G, Stiegler H, Görtler M. Revision of DEGUM ultrasound criteria for grading internal carotid artery stenoses and transfer to NASCET measurement. *Ultraschall Med*. 2010;31(3):251–257. Doi: 10.1055/s-0029-1245336.

25. Reinhard M, Müller T, Roth M, Guschlbauer B, Timmer J, Hetzel A. Bilateral severe carotid artery stenosis or occlusion—cerebral autoregulation dynamics and collateral flow patterns. *Acta Neurochir (Wien)*. 2003;(145):1053–1059. Doi: 10.1007/s00701-003-0137-8.

26. Semenyutin V, Asaturyan G, Nikiforova A, Aliev V, Panuntsev G, Ibyaminov V, Savello A, Patzak A. Predictive value of dynamic cerebral autoregulation assessment in surgical management of patients with high-grade carotid artery stenosis. *Frontiers in Physiology*. Doi: 10.3389/fphys.2017.00872.

27. Shakur SF, Hrbac T, Alaraj A, Du X, Aletich VA, Charbel FT, Amin-Hanjani S. Effects of extracranial carotid stenosis on intracranial blood flow. *Stroke*. 2014;(45):3427–3429. Doi: 10.1161/STROKEAHA.114.006622.

28. Yang F, Hsu P, Lin Sh. Reduced Internal Carotid Artery Flow in Color-coded Carotid Duplex Sonography. *Acta Neurol Taiwan*. 2016;(25):136–147.

## Информация об авторах

**Семенов Владимир Борисович** – д-р биол. наук, профессор, зав. научно-исследовательской лабораторией патологии мозгового кровообращения, Национальный медицинский исследовательский центр им. В. А. Алмазова, Санкт-Петербург, Россия, ORCID: 0000-0002-9248-9821, e-mail: lbcp@mail.ru.

**Никифорова Анна Александровна** – канд. мед. наук, старший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории патологии мозгового кровообращения, Национальный медицинский исследовательский центр им. В. А. Алмазова, Санкт-Петербург, Россия, ORCID: 0000-0002-2617-6739, e-mail: nkfrv\_a@mail.ru.

**Алиев Вугар Али оглы** – д-р мед. наук, ведущий научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории патологии мозгового кровообращения, Национальный медицинский исследовательский центр им. В. А. Алмазова, Санкт-Петербург, Россия, ORCID: 0000-0003-4259-3193, e-mail: rnhi@mail.ru.

**Панунцев Григорий Константинович** – канд. мед. наук, старший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории патологии мозгового кровообращения, Национальный медицинский исследовательский центр им. В. А. Алмазова, Санкт-Петербург, Россия, ORCID: 0000-0003-0983-1831, e-mail: gpanuntsev@gmail.com.

## Authors information

**Semenyutin Vladimir B.** – Dr. Sci. (Biol.), Prof., Head of the Laboratory of brain circulation pathology, V. A. Almazov National Medical Research Centre, Saint Petersburg, Russia, ORCID: 0000-0002-9248-9821, e-mail: lbcp@mail.ru.

**Nikiforova Anna A.** – Cand. Sci. (Med.), Senior researcher of the Laboratory of brain circulation pathology, V. A. Almazov National Medical Research Centre, Saint Petersburg, Russia, ORCID: 0000-0002-2617-6739, e-mail: nkfrv\_a@mail.ru.

**Aliev Vugar A.** – Dr. Sci. (Med.), Leading researcher of the Laboratory of brain circulation pathology, V. A. Almazov National Medical Research Centre, Saint Petersburg, Russia, ORCID: 0000-0003-4259-3193, e-mail: rnhi@mail.ru.

**Panuntsev Grigory K.** – Cand. Sci. (Med.), Senior researcher of the Laboratory of brain circulation pathology, V. A. Almazov National Medical Research Centre, Saint Petersburg, Russia, ORCID: 0000-0003-0983-1831, e-mail: gpanuntsev@gmail.com.