

Об особенностях геометрии бифуркации сонных артерий в норме и при стенозе

Д.С. Чутков¹, Д.В. Тихвинский¹, А.В. Дубовой², А.В. Гоголев², Д.В. Паршин¹

¹ Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН
630090, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 15

² Федеральный центр нейрохирургии Минздрава России
630087, г. Новосибирск, ул. Немировича-Данченко, 132/1

Резюме

Заболевания брахиоцефальных артерий являются одной из наиболее частых патологий сердечно-сосудистой системы человека. Стеноз бифуркации сонной артерии устраняется хирургически в ходе проведения эндартерэктомии или стентирования сонной артерии. Эндартерэктомия подразумевает различную технику выполнения: форму разреза, использование или неиспользование заплаты. Преимущества каждого варианта обсуждаются научным сообществом и зависят от анатомии артерии и других параметров конкретного пациента. Цель настоящей работы – провести статистический анализ анатомических характеристик бифуркации общей сонной артерии для выявления взаимосвязей внутри групп и между выборками пациентов со стенозом и без выраженных патологий сонных артерий. **Результаты и их обсуждение.** Удалось показать, что для группы пациентов без патологии существует регрессионная зависимость ($p < 0,007$) между диаметрами общей, внутренней и наружной сонных артерий как слева, так и справа. Для группы со стенозом сонных артерий такие зависимости отсутствуют. Кроме того, между группами обнаружены статистически значимые различия по диаметру общей ($p = 0,0004$) и наружной сонной артерии ($p = 0,0003$), длине каротидного синуса ($p = 0,05$) и ОСА ($p = 0,01$). По диаметру внутренней сонной артерии, каротидного синуса и углов дочерних артерий группы не различались. **Заключение.** Полученные результаты перспективны для применения в фундаментальных и прикладных исследованиях: при построении численных моделей сонных артерий в норме и при стенозе, а также при разработке лабораторных фантомов и совершенствовании методов диагностики данной патологии.

Ключевые слова: стеноз сонных артерий, эндартерэктомия, закон Мюррея, зависимость диаметров, различия геометрических параметров.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование. Работа выполнена при финансовой поддержке проекта Министерства образования и науки РФ № FWGG-2021-0009.

Автор для переписки: Чутков Д.С., e-mail: dench123456787@mail.ru

Для цитирования. Чутков Д.С., Тихвинский Д.В., Дубовой А.В., Гоголев А.В., Паршин Д.В. Об особенностях геометрии бифуркации сонных артерий в норме и при стенозе. *Сиб. науч. мед. ж.* 2026;46(1):194–202. doi: 10.18699/SSMJ20260118

On the features of carotid artery bifurcation geometry in normal state and in stenosis

D.S. Chutkov¹, D.V. Tikhvinskii¹, A.V. Dubovoy², A.V. Gogolev², D.V. Parshin¹

¹ Lavrentyev Institute of Hydrodynamics of SB RAS
630090, Novosibirsk, Akademika Lavrentieva ave., 15

² Federal Neurosurgical Center of Minzdrav of Russia
630087, Novosibirsk, Nemirovicha-Danchenko st., 132/1

Abstract

Diseases of the brachiocephalic arteries are among the most common pathologies of the human cardiovascular system. Stenosis of the carotid bifurcation is treated surgically by performing either carotid endarterectomy or carotid artery stenting. Endarterectomy can be performed using different techniques, including variations in incision shape and the use or non-use of a patch. The advantages of each option are debated within the scientific community and depend on the arterial anatomy and other patient-specific factors. The aim of this study was to conduct a statistical analysis of the anatomical characteristics of the common carotid artery bifurcation in order to identify relationships within and between samples of patients with stenosis and those without significant carotid artery pathology. **Results.** It was demonstrated that, in the group of patients without pathology, there is a regression relationship ($p < 0.007$) between the diameters of the common, internal, and external carotid arteries on both the left and right sides. In the pathology group, such relationships are absent. In addition, statistically significant differences were found between the groups in the diameters of the common carotid artery ($p = 0.0004$) and the external carotid artery ($p = 0.0003$), length of the carotid sinus ($p = 0.05$) and common carotid artery ($p = 0.01$). No significant differences were identified between the groups in the diameter of the internal carotid artery, the carotid sinus, or the branching angles of the daughter arteries. **Conclusions.** The results obtained may be highly useful for constructing numerical models of carotid arteries under normal conditions and in stenosis, as well as for manufacturing laboratory phantoms or for diagnostic purposes. The obtained results hold promise for application in both fundamental and applied research: in the development of numerical models of carotid arteries in normal and stenotic conditions, as well as in the design of laboratory phantoms and the refinement of diagnostic techniques for this pathology.

Key words: carotid artery stenosis, endarterectomy, Murray's law, diameter dependence, differences in geometric parameters.

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

Financing. The work was carried out with the financial support of the project of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation No. FWGG-2021-0009.

Correspondence author. Chutkov D.S., e-mail: dench123456787@mail.ru

Citation. Chutkov D.S., Tikhvinskii D.V., Dubovoy A.V., Gogolev A.V., Parshin D.V. On the features of carotid artery bifurcation geometry in normal state and in stenosis. *Sibirskij nauchnyj medicinskij zhurnal = Siberian Scientific Medical Journal*. 2026;46(1):194–202. [In Russian]. doi: 10.18699/SSMJ20260118

Введение

Заболевания сердечно-сосудистой системы и, в частности, инсульт по-прежнему занимают лидирующие позиции в рейтинге причин смерти и инвалидизации в развитых странах [1]. По мнению многих специалистов, стеноз сонной артерии может приводить как к инсульту [2], так и к развитию нейродегенеративных заболеваний [3–5]. Пациентам с высокой степенью сужения просвета сосуда показано хирургическое лечение. Основная техника проведения хирургического вмешательства в таком случае – эндартерэктомия. Выполнение такой операции подразумевает различную методику: форма разреза, использование или неиспользование заплат, каждый вариант имеет свои преимущества и недостатки. По данным [6], в течение 4 лет после операции рестеноз ($\geq 50\%$) наблюдается примерно в 6 % случаев.

Несмотря на большое количество работ в этой области, отдельные выводы [7, 8] заслуживают внимания, поскольку в некотором смысле противопоставляются друг другу в отношении диаметров общих сонных артерий, а значит, акту-

альность анализа влияния морфологии и гидродинамики на вероятность атеросклероза имеет место. К примеру, в [9] авторы оценивают расположение относительно позвоночника бифуркации сонной артерии у пациентов со стенозом, в [10] авторы показали статистически значимую разницу в диаметрах бифуркации сонной артерии у пациентов с аневризмой или расслоением. Существуют работы, связывающие уровень стеноза с гидродинамической эффективностью бифуркации – ее энергетическими оценками [11]. Бифуркация сонной артерии представляет собой геометрически сложную конструкцию с большим количеством параметров, влияющих на распределение кровотока между интра- и экстракраниальной сосудистыми сетями. Так, показана возможность предиктивного анализа нарушенной гемодинамики бифуркации в зависимости от ее угла [12], а также влияние курения и системных заболеваний на сам угол бифуркации [13]. Таким образом, можно транзитивно предположить связь между системными заболеваниями и образом жизни пациента с подверженностью заболеваниям бифуркации. Обнаружено, что ключевыми

параметрами выборки являются возраст, пол и расовая принадлежность [14, 15], в частности, показано влияние возраста на угол бифуркации, однако оценки произведены на больших временных интервалах (годы) и слабо применимы к оценке изменения угла за операционно-значимый промежуток времени (от дней до месяцев) [16, 17].

В работе [18] проводится оценка применимости закона Мюррея как энергетического критерия эффективности гидродинамической конструкции сосудистого русла для бифуркаций сонной артерии и Виллизиева круга. Кроме того, гидродинамика оказалась важным фактором роста толщины стенки при длительном когортном исследовании [19], в котором показан независимый вклад гидродинамики и морфологии сонной артерии в толщину стенки и развивающейся атеросклеротической бляшки. Сам по себе параметр Мюррея не может быть взят как оценочный критерий риска атеросклероза, поскольку на более чем 5000 исследованных показана высокая (до 4-кратной) межиндивидуальная вариабельность этого параметра [20]. Изменение отдельных морфологических характеристик бифуркаций при длительном наблюдении подтверждена и в работе [21], причем этот вывод верен и для пациентов со здоровыми сонными артериями [22].

Отыскание взаимосвязей между анатомическими характеристиками бифуркации общей сонной артерии и наличием патологий в артериях в виде стеноза позволит лучше понимать гемодинамику этой области, а также даст ценную информацию для изготовителей фантомов [23] общей сонной артерии или группам, занимающимся численным моделированием [24] указанной области. Цель настоящей работы – отыскание новых взаимосвязей и выделение наиболее значимых из них.

Материал и методы

Проведено ретроспективное исследование двух выборок: пациенты ФГБУ Федеральный центр нейрохирургии Минздрава России (ФЦН) с условно здоровыми артериями ($n = 6$) и пациенты ФЦН, которым выполнялась эндартерэктомия ($n = 11$). Все участники давали подписанное информированное согласие на участие в исследовании, его проведение одобрено этическим комитетом ФЦН (протокол № 4 от 23 мая 2025 г.). Критерии включения в исследование: наличие до и послеоперационной ангиографии, позволяющей произвести 3D-реконструкцию бифуркации. Осуществлялся случайный подбор пациентов за период 2023–2024 гг. В первую выборку вошли 6 женщин (возраст 46 [39; 54] лет) с малыми цере-

бральными аневризмами, не находящимися вблизи бифуркации (12 здоровых сонных артерий), во вторую – 4 женщины и 7 мужчин (возраст 66 [58; 73] лет) с множественными стенозами (с сужением просвета более 70 %) с проведенной эндартерэктомией одной из артерий (рассматривались данные непосредственно до операции и сразу после нее). Имеющиеся по наблюдаемым данные представляют собой массивы КТ-изображений, включающие бифуркацию общей сонной артерии (ОСА). КТ-ангиография артерий пациентов со стенозом выполнена на томографе SOMATOM Definition AS (Siemens AG, ФРГ) (толщина среза 0,6 мм, напряжение на трубке 120 кВ), пациентов без значимых патологий сонных артерий – на томографе Ingenuity CT (Philips, США) (соответственно 0,9 мм и 120 кВ).

Для получения из массива КТ-изображений трехмерной области течения использовано программное обеспечение с открытым исходным кодом – 3D Slicer. Первый шаг в построении геометрий артерий – задание диапазона яркости пикселей, которые необходимо выделить из массива изображений, исходя из требования отсутствия большого количества шумов, при этом выделяя бифуркацию полностью. Вторым шагом из уже трехмерной модели вручную вырезались мелкие сосуды, вены, атеросклеротические бляшки и кости, попавшие туда на первом шаге. Качество реконструкции оценивалось путем сравнения реконструированных областей просвета, полученных разными операторами: один оператор имел опыт более двух лет в реконструкции DICOM-изображений, второй – более 5 лет. Величина межоператорской ошибки составила 0,12 мм (среднеквадратичное отклонение).

Геометрические параметры измеряли следующим образом: геометрия располагалась так, чтобы в окрестности бифуркации ОСА, внутренняя сонная артерия (ВСА) и наружная сонная артерия (НСА) находились в одной плоскости, и ОСА была направлена по вертикали. В этой проекции определяли 9 геометрических параметров бифуркации сонной артерии (из-за стеноза в некоторых случаях параметры каротидного синуса оценить не удалось): внутренние диаметры ОСА, ВСА и НСА вблизи сечений; углы от горизонтальной оси до ВСА и НСА; внутренний диаметр и длину каротидного синуса; длину расширения; положение точки перегиба (рис. 1). Для исключения ошибок все параметры повторно измеряли в программе 3D Slicer (на самой модели, а не на ее проекции). Были также измерены следующие параметры артерий: длина ОСА (от бифуркации до аорты), расстояние от аорты до бифуркации (не равное длине ввиду извитости артерий), длина

НСА. Параметры использовались в абсолютных значениях без нормировки.

Исследовалась линейная и монотонная зависимость параметров внутри выборок: вычислены коэффициенты корреляции Пирсона для нормально распределенных величин и Спирмена в других случаях. Рассмотрена такая зависимость диаметров бифуркации, как закон Мюррея ветвления сосудов, основанный на принципе минимизации работы:

$$D^{\gamma} = D_1^{\gamma} + D_2^{\gamma}, \quad (1)$$

где D – диаметр ОСА; D_1 – диаметр ВСА; D_2 – диаметр НСА; γ – параметр.

Проведено сравнение геометрических параметров здоровых артерий и артерий со стенозом двухвыборочным t-тестом с различными дисперсиями, а также проанализированы изменения геометрических параметров артерий со стенозом до и после операции. Нормальность распределения проверялась с помощью теста Шапиро–Уилка. Переменные представлены при нормальном распределении в виде среднего арифметического и среднеквадратического отклонения ($M \pm SD$), при распределении, отличном от нормального, – в виде медианы, нижнего и верхнего квартилей ($Me [Q1; Q3]$), для оценки различий использовали соответственно t-критерий Стьюдента и критерий Манна – Уитни. Уровень статистической значимости принят равным 0,05.

Результаты

В выборке здоровых артерий обнаружена линейная зависимость диаметров ОСА и ВСА, а также ОСА и НСА с углом наклона в 30° (таблица), в выборке артерий со стенозом подобных зависимостей не установлено. Обнаружена также

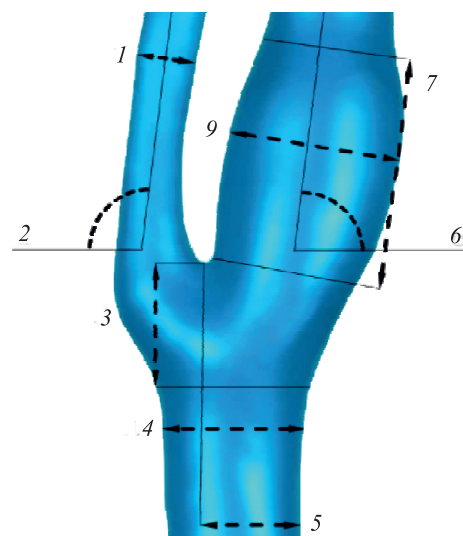


Рис. 1. Геометрические параметры бифуркации сонной артерии: 1 – диаметр НСА, 2 – угол НСА, 3 – длина расширения, 4 – диаметр ОСА, 5 – положение точки перегиба, 6 – угол ВСА, 7 – длина каротидного синуса, 8 – диаметр ВСА, 9 – диаметр каротидного синуса

Fig. 1. Geometric parameters of carotid artery bifurcation: 1 – external carotid artery diameter, 2 – external carotid artery angle, 3 – expansion length, 4 – common carotid artery diameter, 5 – inflection point position, 6 – internal carotid artery angle, 7 – carotid sinus length, 8 – internal carotid artery diameter, 9 – carotid sinus diameter

линейная зависимость в выборке здоровых артерий ($\rho=0,97$, $p < 0,003$) между диаметром ОСА, ВСА и НСА, которая не наблюдается в выборке артерий со стенозом и выражается уравнением:

$$D = 0,5D_1 + 0,5D_2 + 2 \text{ мм} \quad (2)$$

Коэффициенты корреляции Пирсона в выборках, вычисленные отдельно для артерий слева, справа и для всех артерий

Pearson correlation coefficients in the samples calculated separately for the arteries on the left, right and for all arteries

Артерии	Слева	Справа	Все
Здоровые:			
ОСА и ВСА	0,88 ($p < 0,02$)	0,99 ($p < 0,02$)	0,91 ($p < 0,007$)
ОСА и НСА	0,95 ($p < 0,004$)	0,89 ($p < 0,03$)	0,89 ($p < 0,00004$)
Со стенозом до операции:			
ОСА и ВСА	0,13 ($p < 0,70$)	0,36 ($p < 0,28$)	0,24 ($p < 0,28$)
ОСА и НСА	0,72 ($p < 0,43$)	0,74 ($p < 0,77$)	0,69 ($p < 0,30$)
Со стенозом после операции:			
ОСА и ВСА	0,34 ($p < 0,29$)	0,45 ($p < 0,14$)	0,38 ($p < 0,07$)
ОСА и НСА	0,58 ($p < 0,52$)	0,62 ($p < 0,32$)	0,6 ($p < 0,18$)

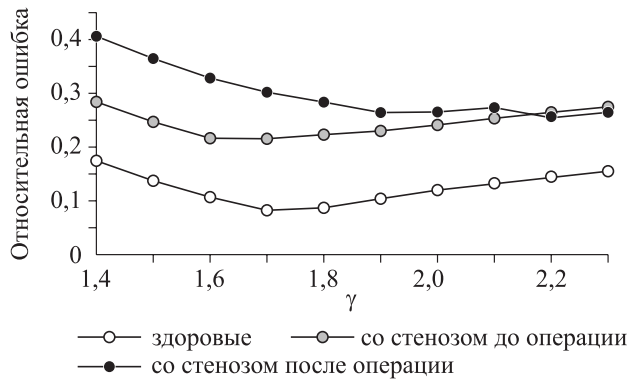


Рис. 2. Относительная ошибка (95-й процентиль) диаметров ОСА, вычисленных по закону Мюррея, в зависимости от параметра γ

Fig. 2. Relative error (95th percentile) of common carotid artery diameters calculated according to Murray's law

где D – диаметр ОСА; D_1 – диаметр ВСА; D_2 – диаметр НСА. Относительная ошибка (95-й процентиль) в выборке здоровых артерий составила 3 %, артерий со стенозом до и после операции – 20 и 25 % соответственно (12 и 24 % соответственно – для женской подвыборки). При этом в выборке здоровых артерий с меньшей ошибкой (10 %) выполняется закон Мюррея (1). Параметр, при котором достигалась наименьшая ошибка в рас-

сматриваемых выборках, равен $1,8 \pm 0,2$. Относительная ошибка в выборке пациентов со стенозом в 2–3 раза выше (рис. 2), при этом в женской подвыборке ошибка в среднем на 5 процентных пунктов меньше, чем во всей выборке артерий со стенозом.

Выявлено различие между выборками по диаметру ОСА ($p = 0,0004$) и НСА ($p = 0,0003$), длине каротидного синуса ($p = 0,05$) и длине ОСА ($p = 0,01$) (рис. 3). В выборке пациентов со стенозом длина и диаметр каротидного синуса были измерены менее чем в половине случаев из-за расположения стеноза. Средняя величина диаметра ОСА увеличилась, величина диаметров ВСА не изменилась, отсюда нарушение линейной зависимости между ОСА и ВСА и изменение ее характера между ОСА и НСА. В выборке артерий со стенозом значения параметров выше на 20–30 %. Для женской подвыборки уровень значимости был достигнут только для диаметра НСА ($p = 0,002$) и был близок для диаметра ВСА ($p = 0,08$).

Обсуждение

Несмотря на то что геометрия бифуркации сонных артерий является предметом обсуждения на протяжении достаточно длительного времени [25–27], основной сложностью в исследовании

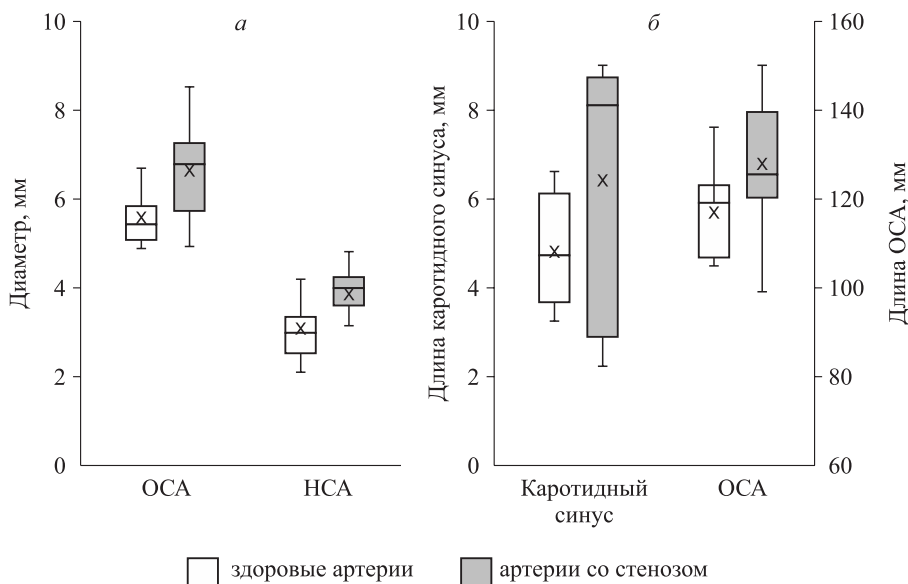


Рис. 3. Диаметр ОСА, НСА (а) и длина каротидного синуса, ОСА (б) в выборках здоровых артерий и артерий со стенозом до операции; ящик – межквартильный размах, линия в ящике – медиана, крестик – среднее арифметическое, усы – диапазон без выбросов

Fig. 3. The diameter of the common carotid artery, external carotid artery (a) and the length of the carotid sinus, common carotid artery CCA (б) in samples of healthy arteries and arteries with stenosis before surgery; ; box – interquartile range, line in the box – median, cross – arithmetic mean, whiskers – non-outlier range

самого объекта бифуркации является отсутствие для трехмерного случая четкой постановки задачи протекания через подобную область. С этим связаны различные алгоритмы построения центральных линий сосудов: как правило, выбираются траектории вписанных в артерии сфер до определенного момента, а затем происходит соединение линий с помощью сплайнов в зоне бифуркации. Как видно из способа такого построения центральных линий, решение этой задачи не единственное и определяется с определенным математическим произволом в наиболее интересном с геометрической и гемодинамической точки зрения регионе. При этом данные алгоритмы являются основой вычислительной гемодинамики – одного из основных подходов в предсказательной персонализированной медицине на сегодняшний день. Результаты расчетов гемодинамики целиком и полностью опираются на геометрию области течения [26, 28], которая, к тому же, как показано в [29], подлежит изменению во времени. При сочетанных патологиях [30] имеют место дополнительные факторы, влияющие на геометрию бифуркации сонных артерий как в моменте, так и при дальнейшем наблюдении, и это является дополнительным осложняющим фактором при выборе техники оперативного вмешательства. Все вышесказанное указывает на то, что исследование и классификация отдельных случаев бифуркации сонной артерии в норме и при патологии заслуживают внимания.

Однако ограничением данного исследования является небольшая выборка, позволяющая провести лишь качественные оценки. Различия в величинах параметров могут быть обусловлены возрастной разницей между выборками. Однако, принимая во внимание [31], можно надеяться на сохранение регрессионного соотношения в целом даже с расширением выборки. На данном этапе исследования не представляется возможным связать величины геометрических характеристик сонных артерий и атеросклеротической бляшки, что ценно для понимания биомеханики артерии с бляшкой [32].

В предположении о том, что большая длина ОСА сопряжена с более высокой бифуркацией, обнаруженное различие длины ОСА между группами здоровых добровольцев и пациентов с атеросклерозом согласуется с данными [17] о том, что по мере увеличения высоты и угла бифуркации напряжение сдвига на стенке сосуда уменьшается, это рассматривается как фактор риска атеросклеротических изменений. Таким образом, различие длины ОСА, выявленное в настоящей работе, может указывать на геометрическую перестройку сосудистого русла, приводящую к не-

благоприятным гемодинамическим условиям. А изменение характера зависимости параметра закона Мюррея (см. рис. 2) после операции говорит и об изменении гидродинамических характеристик бифуркации, что требует дальнейшего тщательного изучения.

Новизна исследования заключается в том, что впервые получено регрессионное соотношение для здоровых артерий при условии высокой статистической значимости регрессии, а также получен оптимальный показатель закона Мюррея для бифуркации здоровых сонных артерий ($1,8 \pm 0,2$), который согласуется с величиной 1,3–1,6 в работе [33]. Важность этого факта состоит в том, что, если на большой выборке указанное соотношение подтвердится, это будет означать возможность диагностики сосудистой патологии на уровне оценки геометрических характеристик просвета артерии: при возникновении малейших отклонений от соотношения оператору УЗИ (рутинная процедура исследования брахиоцефальных артерий) следует уделить особое внимание наличию атеросклеротических бляшек бифуркации сонной артерии. Полученное соотношение может также быть использовано для автоматического построения геометрии сонных артерий для численных расчетов, а также для изготовления медицинских фантомов [34].

Заключение

Обнаружена линейная зависимость диаметров ОСА и ВСА и диаметров ОСА и НСА, а также зависимость диаметра ОСА от диаметров НСА и ВСА в выборке здоровых артерий, не выявленные в выборке артерий со стенозом. Закон Мюррея в выборке здоровых артерий показал меньшую максимальную ошибку (10 %) по сравнению с выборкой артерий со стенозом (25–30 %). Выявлено статистически значимое различие между выборками по четырем морфологическим параметрам бифуркации ОСА: диаметру ОСА ($p = 0,0004$) и НСА ($p = 0,0003$), длине каротидного синуса ($p = 0,05$) и ОСА ($p = 0,01$), величины указанных параметров в выборке пациентов со стенозом на 20–30 % выше, чем у лиц со здоровыми артериями. Полученный результат может быть использован как специалистами в области численного моделирования для создания виртуальных выборок 3D-моделей бифуркаций сонных артерий и последующих манипуляций с ними, так и при наблюдении пациентов – нарушение соотношения целого ряда геометрических параметров, как правило, говорит о наличии стеноза бифуркации сонной артерии. Дальнейшее исследование с увеличением объема выборки мо-

жет помочь определить, отклонение каких именно из обозначенных параметров достаточно для автоматической диагностики вероятности стеноза.

Список литературы / References

1. The top 10 causes of death. WHO. Available at: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/the-top-10-causes-of-death>
2. Парфенов В.А. Факторы риска и профилактика ишемических цереброваскулярных заболеваний. *PMЖ*. 2002;(17):770.
Parfenov V.A. Risk factors and prevention of ischemic cerebrovascular diseases. *Russkiy meditsinskiy zhurnal = Russian Medical Journal*. 2002;(17):770. [In Russian]
3. Kadow B.T., Smaldone M.C. Safety and delayed intervention rates of active surveillance for small renal masses in an elderly population. *Ann. Transl. Med.* 2019; 7(6):S182–S182. doi: 10.21037/atm.2019.07.68
4. Vitali F., Torrandell-Haro G., Branigan G., Arias Aristizabal J., Reiman E., Bedrick E.J., Brinton R.D., Weinkauff C. Asymptomatic carotid artery stenosis is associated with increased Alzheimer's disease and non-Alzheimer's disease dementia risk. *Stroke Vasc. Neurol.* 2025;10(3):289–296. doi: 10.1136/svn-2024-003164
5. Zahra S., Rubab Khakwani K.Z., Acosta D., Arias J.C., French S., Bedrick E.J., Vitali F., Beach T.G., Serrano G., Weinkauff C.C. Neurofibrillary tangles predict dementia in patients with carotid stenosis. *J. Vasc. Surg.* 2025;81(6):1381–1388. doi: 10.1016/j.jvs.2025.02.007
6. Тарасов Р.С., Казанцев А.Н., Ануфриев А.И., Бурков Н.Н., Шабаетв А.Р., Бухтоярова В.И., Грачев К.И. Хирургические факторы рестеноза внутренней сонной артерии после каротидной эндартерэктомии. *Кардиол. и сердеч.-сосуд. хирургия*. 2018;11(4):47–53.
Tarasov R.S., Kazantsev A.N., Anufriev A.I., Burkov N.N., Shabaev A.R., Bukhtoyarova V.I., Grachev K.I. Surgical factors of internal carotid artery restenosis after carotid endarterectomy. *Kardiologiya i serdechno-sosudistaya khirurgiya = Cardiology and Cardiovascular Surgery*. 2018;11(4):47–53. [In Russian]. doi: 10.17116/kardio201811447
7. Huang X., Yin X., Xu Y., Jia X., Li J., Niu P., Shen W., Kassab G.S., Tan W., Huo Y. Morphometric and hemodynamic analysis of atherosclerotic progression in human carotid artery bifurcations. *Am. J. Physiol. Heart Circ. Physiol.* 2016;310(5):H639–H647. doi: 10.1152/ajpheart.00464.2015.
8. Bijari P.B., Wasserman B.A., Steinman D.A. Carotid bifurcation geometry is an independent predictor of early wall thickening at the carotid bulb. *Stroke*. 2014;45(2):473–478. doi: 10.1161/STROKEAHA.113.003454.
9. Huang T., Zou S.L., Shen X., Jin J., Bai J., Wu J.J., Wang L., Jiang Q.J., Qu L.F. Evaluation of the level of carotid bifurcation and the morphology of extracranial internal carotid artery in patients with carotid stenosis by color doppler ultrasound and digital subtraction angiography. *Zhonghua Yi Xue Za Zhi*. 2022;102(11):781–786. doi: 10.3760/cma.j.cn112137-20210605-01285
10. Özdemir H.İ. The structural properties of carotid arteries in carotid artery diseases – a retrospective computed tomography angiography study. *Pol. J. Radiol.* 2020;85:e82–e89. doi: 10.5114/pjr.2020.93367
11. Sia S.F., Zhao X., Li R., Zhang Y., Chong W., He L., Chen Y. Evaluation of the carotid artery stenosis based on minimization of mechanical energy loss of the blood flow. *Proc. Inst. Mech. Eng. H*. 2016;230(11):1051–1058. doi:10.1177/0954411916671752
12. Lee S.W., Antiga L., Spence J.D., Steinman D.A. Geometry of the carotid bifurcation predicts its exposure to disturbed flow. *Stroke*. 2008;39(8):2341–2347. doi: 10.1161/strokeaha.107.510644
13. Дербилова В.П., Виноградов Р.А., Захаров Ю.Н., Борисов В.Г., Хетеева Э.Э., Виноградова Э.Р., Ивашук В.Ю., Мещерякова О.М., Гагин В.А., Зяблова Е.И., Барышев А.Г., Порханов В.А. Влияние угла бифуркации общей сонной артерии на изменение параметров локальной гемодинамики. *Клин. физиол. кровообращ.* 2023;4(20):371–379. doi: 10.24022/1814-6910-2023-20-4-371-379
Derbilova V.P., Vinogradov R.A., Zakharov Yu.N., Borisov V.G., Kheteeva E.E., Vinogradova E.R., Ivashchuk V.Yu., Meshcheryakova O.M., Gagin V.A., Zhablova E.I., Baryshev A.G., Porkhanov V.A. Influence of the angle of bifurcation of the common carotid artery on changes in local hemodynamics. *Klinicheskaya fiziologiya krovoobrashcheniya = Clinical Physiology of Circulation*. 2023;4(20):371–379. [In Russian]. doi: 10.24022/1814-6910-2023-20-4-371-379
14. Eigenbrodt M.L., Bursac Z., Rose K.M., Couper D.J., Tracy R.E., Evans G.W., Brancati F.L., Mehta J.L. Common carotid arterial interadventitial distance (diameter) as an indicator of the damaging effects of age and atherosclerosis, a cross-sectional study of the atherosclerosis Risk in Community Cohort Limited Access Data (ARICLAD), 1987–89. *Cardiovasc. Ultrasound*. 2006;4(1):1. doi:10.1186/1476-7120-4-1
15. Phan T.G., Beare R.J., Jolley D., Das G., Ren M., Wong K., Chong W., Sinnott M.D., Hilton J.E., Srikanth V. Carotid artery anatomy and geometry as risk factors for carotid atherosclerotic disease. *Stroke*. 2012;43(6):1596–1601. doi: 10.1161/strokeaha.111.645499
16. Tan Q., Qin C., Yang J., Wang T., Lin H., Lin C., Chen X. Inner diameters of the normal carotid arteries measured using three-dimensional digital subtraction catheter angiography: a retrospective analysis. *BMC Neurol.* 2021;21(1):292. doi: 10.1186/s12883-021-02328-z

17. Дербилова В.П., Виноградов Р.А., Капран Т.И., Захаров Ю.Н., Борисов В.Г., Виноградова Э.Р., Сухоручкин П.В., Барышев А.Г. Анатомия и геометрия бифуркации общей сонной артерии. *Клин. физиол. кровообращ.* 2022;1(19):25–32. doi: 10.24022/1814-6910-2022-19-1-25-32
- Derbilova V.P., Vinogradov R.A., Kapran T.I., Zakharov Yu.N., Borisov V.G., Vinogradova E.R., Sukhoruchkin P.V., Baryshev A.G. Anatomy and geometry of bifurcation of the common carotid artery. *Klinicheskaya fiziologiya krovoobrashcheniya = Clinical Physiology of Circulation.* 2022;1(19):25-32. [In Russian] doi:10.24022/1814-6910-2022-19-1-25-32
18. Ingebrigtsen T., Morgan M.K., Faulder K., Ingebrigtsen L., Sparr T., Schirmer H. Bifurcation geometry and the presence of cerebral artery aneurysms. *J. Neurosurg.* 2004;101(1):108–113. doi:10.3171/jns.2004.101.1.0108
19. Strecker C., Krafft A.J., Kaufhold L., Hüllebrandt M., Treppner M., Ludwig U., Köber G., Hennemuth A., Hennig J., Harloff A. Carotid geometry and wall shear stress independently predict increased wall thickness — A longitudinal 3D MRI study in high-risk patients. *Front. Cardiovasc. Med.* 2021;8:723860. doi: 10.3389/fcvm.2021.723860
20. Schulz U.G.R., Rothwell P.M. Major variation in carotid bifurcation anatomy: a possible risk factor for plaque development? *Stroke.* 2001;32(11):2522–2529. doi: 10.1161/hs1101.097391
21. Ngo M.T., Kwak H.S., Chung G.H., Koh E.J. Longitudinal study of carotid artery bifurcation geometry using magnetic resonance angiography. *Vascular.* 2019;27(3):312–317. doi: 10.1177/1708538119828262
22. Baz R.A., Scheau C., Niscoveanu C., Bordei P. Morphometry of the entire internal carotid artery on CT angiography. *Medicina (Kaunas).* 2021;57(8):832. doi: 10.3390/medicina57080832
23. Smith R.F., Rutt B.K., Holdsworth D.W. Anthropomorphic carotid bifurcation phantom for MRI applications. *J. Magn. Reson. Imaging.* 1999;10(4):533–544. doi: 10.1002/(sici)1522-2586(199910)10:4<533::aid-jmri6>3.0.co;2-z.
24. Rezazadeh M., Ostadi R. Numerical simulation of the wall shear stress distribution in a carotid artery bifurcation. *J. Mech. Sci. Technol.* 2022;36(10):5035–5046. doi: 10.1007/s12206-022-0917-9
25. Jiang P., Chen Z., Hippe D.S., Watase H., Sun B., Lin R., Yang Z., Xue Y., Zhao X., Yuan C. Association between carotid bifurcation geometry and atherosclerotic plaque vulnerability: a chinese atherosclerosis risk evaluation study. *Arterioscler. Thromb. Vasc. Biol.* 2020;40(5):1383–1391. doi: 10.1161/ATVBAHA.119.313830
26. Cui Y., Lv X., Wang F., Kong J., Zhao H., Ye Z., Si C., Pan L., Liu P., Wen J. Geometry of the carotid artery and its association with pathologic changes in a Chinese population. *Front. Physiol.* 2020;10:1628–1628. doi: 10.3389/fphys.2019.01628
27. Bressloff N.W. Parametric geometry exploration of the human carotid artery bifurcation. *J. Biomech.* 2007;40(11):2483–2491. doi: 10.1016/j.jbiomech.2006.11.002
28. Abhilash H.N., Yanagita Y., Pai R., Zuber M., Tamagawa M., K P., Kamath S. G., R P., Barboza A.B.V., Rao V.R.K., Khader S.M.A. Effect of vascular geometry on haemodynamic changes in a carotid artery bifurcation using numerical simulation. *Clin. Neurol. Neurosurg.* 2024;237:108153–108153. doi: 10.1016/j.clineuro.2024.108153
29. Kwon W., Kim Y., Kim J., Jo J., Jeon S., Lee U.Y., Kwak H.S. Bilateral carotid artery geometry using magnetic resonance angiography: a 10-year longitudinal single center study. *Sci. Rep.* 2022;12(1):4932–4932. doi: 10.1038/s41598-022-09062-7
30. Underhill H.R., Yuan C., Terry J.G., Chen H., Espeland M.A., Hatsukami T.S., Saam T., Chu B., Yu W., Oikawa M... Crouse J.R. 3rd. Differences in carotid arterial morphology and composition between individuals with and without obstructive coronary artery disease: A cardiovascular magnetic resonance study. *J. Cardiovasc. Magn. Reson.* 2008;10(1):31. doi: 10.1186/1532-429x-10-31
31. Thomas J.B., Antiga L., Che S.L., Milner J.S., Steinman D.A., Spence J.D., Rutt B.K., Steinman D.A. Variation in the carotid bifurcation geometry of young versus older adults. *Stroke.* 2005;36(11):2450–2456. doi: 10.1161/01.str.0000185679.62634.0a
32. Spanos K., Petrocheilou G., Karathanos C., Labropoulos N., Mikhailidis D., Giannoukas A. Carotid bifurcation geometry and atherosclerosis. *Angiology.* 2017;68(9):757–764. doi: 10.1177/0003319716678741
33. Beare R.J., Das G., Ren M., Chong W., Sinnott M.D., Hilton J.E., Srikanth V., Phan T.G. Does the principle of minimum work apply at the carotid bifurcation: a retrospective cohort study. *BMC Med. Imaging.* 2011;11(1):17. doi: 10.1186/1471-2342-11-17
34. Chee A.J.Y., Ho C.K., Yiu B.Y.S., Yu A.C.H. Walled carotid bifurcation phantoms for imaging investigations of vessel wall motion and blood flow dynamics. *IEEE Trans. Ultrason., Ferroelect., Freq. Contr.* 2016;63(11):1852–1864. doi: 10.1109/TUFFC.2016.2591946

Сведения об авторах:

Чутков Денис Сергеевич, ORCID: 0009-0007-6365-6823, e-mail: dench123456787@mail.ru

Тихвинский Денис Вячеславович, ORCID: 0000-0001-8661-5345, e-mail: d.tikhvinskii@g.nsu.ru

Дубовой Андрей Владимирович, ORCID: 0000-0002-0927-2841

Гоголев Алексей Владимирович, e-mail: a_gogolev@neuronsk.ru

Паршин Даниил Васильевич, к.ф.-м.н., ORCID: 0000-0002-2496-3042, e-mail: danilo.skiman@gmail.com

Information about the authors:

Denis S. Chutkov, ORCID: 0009-0007-6365-6823, e-mail: dench123456787@mail.ru

Denis V. Tikhvinskii, ORCID: 0000-0001-8661-5345, e-mail: d.tikhvinskii@g.nsu.ru

Andrey V. Dubovoy, ORCID: 0000-0002-0927-2841

Alexey V. Gogolev, e-mail: a_gogolev@neuronsk.ru

Daniil V. Parshin, candidate of physical and mathematical sciences, ORCID: 0000-0002-2496-3042,
e-mail: danilo.skiman@gmail.com

Поступила в редакцию 31.08.2025

После доработки 08.12.2025

Принята к публикации 20.01.2026

Received 31.08.2025

Revision received 08.12.2025

Accepted 20.01.2026