

Прогнозирование рестеноза после каротидной эндартерэктомии методом компьютерного моделирования

А.Н. Казанцев¹ ✉, Р.А. Виноградов², Ю.Н. Захаров³, В.Г. Борисов³, М.А. Чернявский⁴, В.Н. Кравчук^{5,6}, Д.В. Шматов⁷, К.П. Черных¹, А.А. Сорокин⁷, Г.Ш. Багдавадзе⁶, С.В. Артюхов¹, Г.Г. Хубулава^{5,8}

Отделение хирургии № 3

¹ СПб ГБУЗ «Городская Александровская больница»

Российская Федерация, 193312, Санкт-Петербург, просп. Солидарности, д. 4

² ГБУЗ «НИИ – Краевая клиническая больница № 1 им. проф. С.В. Очаповского» МЗ Краснодарского края
Российская Федерация, 350086, Краснодар, ул. 1 Мая, д. 167

³ ФГБОУ ВО «Кемеровский государственный медицинский университет» МЗ РФ

Российская Федерация, 650056, Кемерово, ул. Ворошилова, д. 22а

⁴ ФГБУ «Национальный медицинский исследовательский центр им. В.А. Алмазова» Минздрава России

Российская Федерация, 197341, Санкт-Петербург, ул. Аккуратова, д. 2

⁵ ФГБВОУ ВО «Военно-медицинская академия им. С.М. Кирова» МО РФ

Российская Федерация, 194044, Санкт-Петербург, ул. Академика Лебедева, д. 6, л. «ж»

⁶ ФГБОУ ВО «Северо-Западный государственный медицинский университет им. И.И. Мечникова»

Российская Федерация, 191015, Санкт-Петербург, ул. Кирочная, д. 41

⁷ Санкт-Петербургский государственный университет, Клиника высоких медицинских технологий им. Н.И. Пирогова

Российская Федерация, 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., д. 7/9

⁸ ФГБОУ ВО «Первый Санкт-Петербургский государственный медицинский университет им. акад. И.П. Павлова» МЗ РФ

Российская Федерация, 197022, Санкт-Петербург, ул. Льва Толстого, д. 6–8

✉ Контактная информация: Казанцев Антон Николаевич, сердечно-сосудистый хирург, отделение хирургии № 3, Городская Александровская больница. Email: dr.antonio.kazantsev@mail.ru

РЕЗЮМЕ

В статье описана методика компьютерного моделирования, позволяющая прогнозировать развитие рестеноза внутренней сонной артерии после каротидной эндартерэктомии (КЭЭ). Продемонстрирован клинический случай, доказывающий эффективность разработанного способа. Указано, что для корректности формирования геометрической модели необходимы данные мультиспиральной компьютерной томографии с ангиографией у пациента после КЭЭ с толщиной слоя 0,6 мм и током 355 мА. Для построения модели течения необходимы данные цветного дуплексного сканирования в трех сечениях: 1. В проксимальном сечении общей сонной артерии (на 3 см проксимальнее бифуркации); 2. В сечении наружной сонной артерии на 2 см дистальнее каротидного синуса; 3. В сечении внутренней сонной артерии на 2 см дистальнее каротидного синуса. Результатом компьютерных вычислений с использованием специализированного программного обеспечения (*Sim Vascular, Python, Open Foam*) становится математическая модель кровотока в сосуде. Она представляет собой массив расчетных данных, описывающих скорость и другие характеристики кровотока в каждой точке артерии. На основе анализа показателей *RRT, TAWSS* формируется компьютерная модель бифуркации, позволяющая прогнозировать зоны повышенного риска развития рестеноза. Таким образом, разработанная методика способна выделить когорту пациентов после КЭЭ, подверженных высокой вероятности потери просвета сосуда. Такая возможность обеспечит более прецизионную курацию этих больных в послеоперационном периоде с целью ранней диагностики рестеноза и своевременной профилактики развития неблагоприятных кардиоваскулярных событий.

Ключевые слова:

каротидная эндартерэктомия, классическая каротидная эндартерэктомия, эверсионная каротидная эндартерэктомия, заплатка, рестеноз, компьютерное моделирование

Для цитирования

Казанцев А.Н., Виноградов Р.А., Захаров Ю.Н., Борисов В.Г., Чернявский М.А., Кравчук В.Н. и др. Прогнозирование рестеноза после каротидной эндартерэктомии методом компьютерного моделирования. Журнал им. Н.В. Склифосовского Неотложная медицинская помощь. 2021;10(2):401–407. <https://doi.org/10.23934/2223-9022-2021-10-2-401-407>

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Благодарность, финансирование

Исследование не имеет спонсорской поддержки

АГ	— ангиография
АСБ	— атеросклеротическая бляшка
БЦА	— брахиоцефальные артерии
ВСА	— внутренняя сонная артерия
КЭЭ	— каротидная эндартерэктомия

МСКТ АГ	— мультиспиральная компьютерная томография с ангиографией
НСА	— наружная сонная артерия
ОСА	— общая сонная артерия
ЦДС	— цветное дуплексное сканирование

ВВЕДЕНИЕ

Каротидная эндартерэктомия (КЭЭ) стала рутинным вмешательством на сонных артериях во многих сосудистых стационарах страны [1–3]. Национальные рекомендации приводят строгие стандарты качества для выполнения данной операции [1]. Известны допустимые показатели частоты возможных неблагоприятных кардиоваскулярных событий для учреждений, которые занимаются реконструктивными вмешательствами на брахиоцефальных артериях (БЦА) [1]. Однако по поводу рестеноза внутренней сонной артерии (ВСА) критериев не разработано [1]. Несмотря на это, существуют крупные исследования и метаанализы, которые пришли к выводам, что ранняя и поздняя потеря просвета сосуда является важным предиктором развития ишемического инсульта [4–7]. И большинство из этих работ демонстрируют высокую склонность к формированию данной патологии после классической КЭЭ относительно эверсионной техники [4–7]. По мнению ряда авторов, физическое искажение свойств потока крови после расширения каротидной луковицы образует зоны пристеночного застоя и турбулентного течения, что провоцирует гиперплазию неоинтимы в этой локализации [8–11]. Но рестеноз ВСА формируется, по разным источникам, лишь в 5–20% случаев от общей выборки [2, 4, 12–14]. Возможной причиной является то, что не всегда ширина заплатки дилатирует просвет артерии до тех размеров, которые искажают гемоциркуляцию с индукцией последующих патологических явлений [2, 8–10, 12]. На сегодня действующие рекомендации не предлагают методов, способных дифференцировать данную когорту пациентов с целью дальнейшего прецизионного ведения и раннего выявления потери просвета сосуда [1].

Целью настоящего клинического примера стала демонстрация эффективности разработанной методики компьютерного моделирования, прогнозирующей вероятность развития рестеноза ВСА после классической КЭЭ.

Клинический пример

Пациент В., 62 лет, мужчина, предъявлял жалобы на головокружение, шум в ушах, ангинозные боли в области сердца при физической нагрузке. По данным скринингового цветного дуплексного сканирования (ЦДС) дифференцировано стенотическое поражение правой ВСА. По результатам коронарографии гемодинамически значимых стенозов не выявлено. По данным ангиографии (АГ) визуализирован 70% стеноз правой ВСА с признаками нестабильной атеросклеротической бляшки (АСБ) (рис. 1).

Мультидисциплинарным консилиумом, включающим сердечно-сосудистого хирурга, эндоваскулярного хирурга, нейрохирурга, кардиолога, невролога, анестезиолога-реаниматолога, ввиду наличия протяженного атеросклеротического поражения каротидной бифуркации принято решение о выполнении плановой классической КЭЭ справа с пластикой зоны реконструкции заплатой из диэпоксиперикарда. Послеоперационный период протекал без особенностей. Для контроля проходимости зоны реконструкции пациенту проведена мультиспиральная компьютерная томография с ангиографией

мультиспиральная компьютерная томография с ангиографией (МСКТ АГ). По данным исследования признаков рестеноза не выявлено (рис. 2).

С целью выявления рисков формирования каротидного рестеноза в среднеотдаленном и отдаленном периодах наблюдения данные МСКТ АГ (с толщиной слоя 0,6 мм и током 355 mA) использованы для компьютерного моделирования зоны реконструкции каротидной бифуркации настоящего пациента. Файлы в формате .dcm обработаны при помощи программы *Sim Vascular*, в результате чего построена геометрическая модель (рис. 3).

Далее для построения модели течений производили ЦДС зоны реконструкции в трех сечениях: 1. В проксимальном сечении общей сонной артерии (ОСА) (на 3 см проксимальнее бифуркации); 2. В сечении наружной сон-

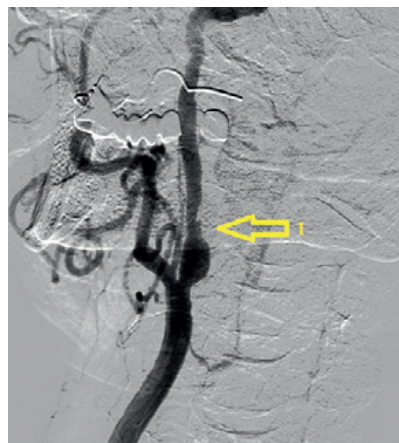


Рис. 1. Ангиография брахиоцефальных артерий: 1 — 70% стеноз правой внутренней сонной артерии
Fig. 1. Angiography of the brachiocephalic arteries: 1 — 70% stenosis of the right internal carotid artery

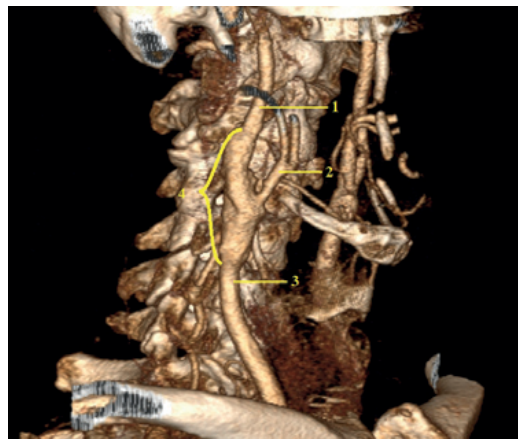


Рис. 2. Мультиспиральная компьютерная томография с ангиографией брахиоцефальных артерий: 1 — внутренняя сонная артерия; 2 — наружная сонная артерия; 3 — общая сонная артерия; 4 — зона имплантации заплаты
Fig. 2. Multislice computed tomography with angiography of the brachiocephalic arteries: 1 — internal carotid artery; 2 — external carotid artery; 3 — common carotid artery; 4 — patch implantation area

ной артерии (НКА) на 2 см дистальнее каротидного синуса; 3. В сечении ВСА на 2 см дистальнее каротидного синуса. Ввиду того, что в каротидном синусе происходит рециркуляция, которая искажает данные по основному потоку, наиболее оптимальным отрезком измерения показателей является именно расстояние на 2 см дистальнее. Входящий поток моделировался в соответствии со скоростными диаграммами течения в ОСА (рис. 4).

Данные (TAPV и Area) по ВСА и НКА использовались для формирования правильного распределения выходящих потоков между этими сосудами (рис. 5).

Затем полученные данные ЦДС и сетка геометрической модели загружались в программу *Open Foam*. Первым этапом строились линии тока крови. Градацией цвета отображается скорость движения частиц вдоль траектории синий — медленно, красный — быстро (рис. 6).

После этого строилось поле скоростей в различных плоскостях. Стрелками отображалось направление проекции вектора скорости на данную плоскость, градацией цвета — величина скорости кровотока в данной точке в соответствии со шкалой (рис. 7).

Диаграммы такого рода продемонстрировали зоны рециркуляции и зоны ветвления потока на стенке сосуда (красные точки).

Далее в режиме постпроцессинга по результатам полученных расчетов строились гемодинамические характеристики на стенке сосуда. На рис. 8 изображено распределение показателя *RRT*: красное и желтое — зоны повышенного риска возникновения рестеноза.

На рис. 9 изображено векторное поле показателя *TAWSS*, отображающего направление пристеночного перемещения частиц крови. Линиями представлено разделение стенки сосуда на зоны пристеночного застоя и турбулентности. Розовое — область притяжения устойчивой стационарной точки (красная точка в этой зоне).

Таким образом, у данного пациента при анализе показателей *RRT* и *TAWSS* выделено 5 зон повышенного риска формирования рестеноза, 3 из которых локализованы во ВСА (рис. 10).

Через 6 месяцев после КЭЭ пациента приглашают в клинику для проведения контрольного ЦДС зоны реконструкции, по данным которого диагностируется гемодинамически значимый рестеноз правой ВСА. По результатам МСКТ АГ визуализирован 80% рестеноз (рис. 11). При этом



Рис. 3. Геометрическая модель правой внутренней сонной артерии после каротидной эндартерэктомии с пластикой заплатой из ксеноперикарда
Fig. 3. Geometric model of the right internal carotid artery after carotid endarterectomy with plastic xenopericardial patch

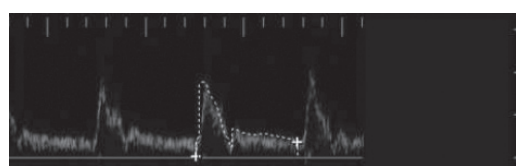


Рис. 4. Скоростная диаграмма течения в общей сонной артерии
Fig. 4. Velocity diagram of the flow in the common carotid artery

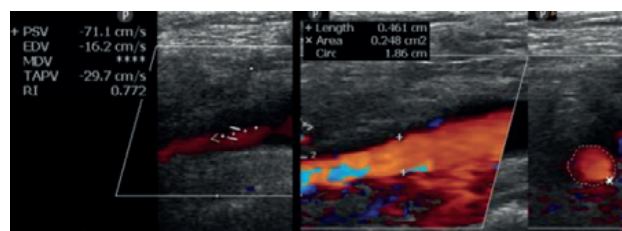


Рис. 5. Данные TAPV и Area по внутренней и наружной сонной артериям
Fig. 5. TAPV and Area data for the internal and external carotid arteries

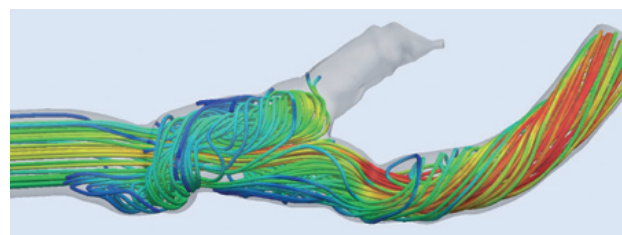


Рис. 6. Построение линий тока
Fig. 6. Construction of streamlines

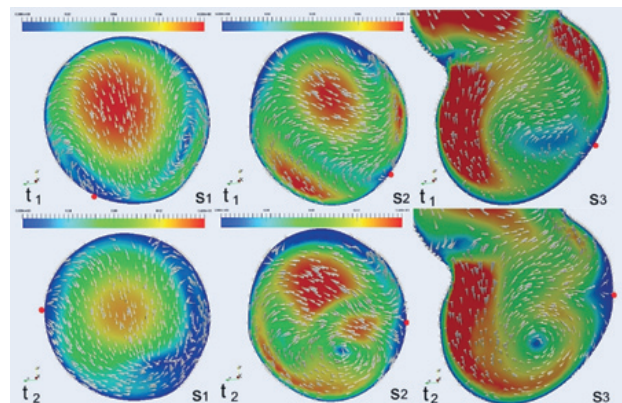


Рис. 7. Построение поля скоростей в различных плоскостях
Fig. 7. Construction of the velocity field in different planes

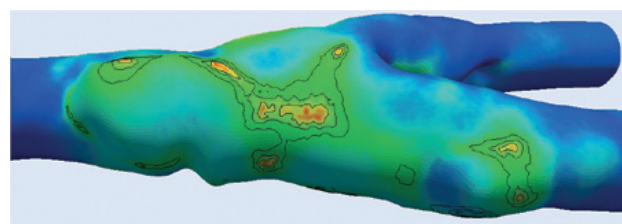


Рис. 8. Распределение показателя *RRT*: красное и желтое — зоны повышенного риска возникновения рестеноза
Fig. 8. Distribution of the RRT indicator: red and yellow - areas of increased risk of restenosis

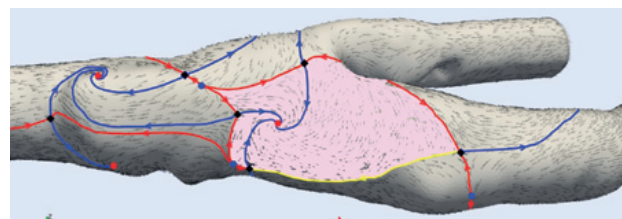


Рис. 9. Векторное поле показателя *TAWSS*, отображающего направление пристеночного перемещения частиц крови
Fig. 9. Vector field of the TAWSS index, which reflects the direction of the parietal movement of blood particles

необходимо отметить, что локализация поражения соответствует 3-й и 4-й зонам риска, как указано на рис. 10.

Пациент госпитализирован для проведения классической реКЭЭ справа. Послеоперационный период протекал без особенностей. Больной выписан на 7-е сутки после операции.

ОБСУЖДЕНИЕ

По данным национальных рекомендаций выбор вида КЭЭ осуществляет только оперирующий хирург [1]. При решении в пользу классической техники, как правило, применяют биологическую, синтетическую или аутовенозную заплату [1]. Ширина последней в первых 2 случаях имеет стандартные заводские значения. Однако диаметр артерии у разных людей может значительно варьировать [8–10]. Из этого следует, что универсального размера заплаты быть не может. Поэтому в некоторых ситуациях сосудистый хирург уменьшает ширину заплаты, чтобы та излишне не дилатировала каротидную луковицу [2]. Но единой техники и правил, по которым может быть установлен персонализированный размер заплаты, на сегодня не существует [1]. Отсюда следует, что калибровку последней выполняют на основе опыта оператора в формате “hand-made”. В условиях доказательной медицины такой подход не может быть оправданным. Сложившаяся ситуация требует разработки новых принципов и способов, которые будут отвечать требованиям персонализированной медицины. Представленный метод компьютерного моделирования продемонстрировал возможности прогнозирования развития рестеноза после классической КЭЭ. Таким же образом, используя данные МСКТ АГ БЦА больного до операции, в виртуальном формате можно удалять атеросклеротические бляшки, проецировать линию артериотомии, имплантировать разные размеры заплаты. Данный подход позволяет подобрать наиболее подходящую модель реконструкции, характеризующуюся минимальной деформацией физических свойств потока крови. Однако нужно помнить, что не всегда сосудистый хирург сможет с точностью до миллиметра реализовать те параметры, которые задает компьютерная программа. В любом случае линию артериотомии, как и калибровку заплаты, будет осуществлять сам оператор. Поэтому в будущем возможно два направления дальнейшего развития персонализированного подхода в каротидной хирургии: 1. Заплату будут изготавливать индивидуально, на заводском этапе, по тем данным, которые представит компьютерная модель; 2. Саму КЭЭ будет осуществлять робот. Топографическая локализация каротидной бифуркации и особенности местной анатомии позволяют опытному сосудистому хирургу выполнять выделение последней за 5–10 минут, что значительно отличается по длительности от тех же доступов, к примеру, к брюшной аорте. Сама же КЭЭ чаще всего от разреза до кожных швов не превышает 1–1,5 часа. Сегодня прогресс медицинских технологий дошел до того, что применение робота-хирурга (*Da Vinci, Intuitive Surgical, США*) возможно при сложных операциях на аорте [15, 16]. Таким образом, использо-

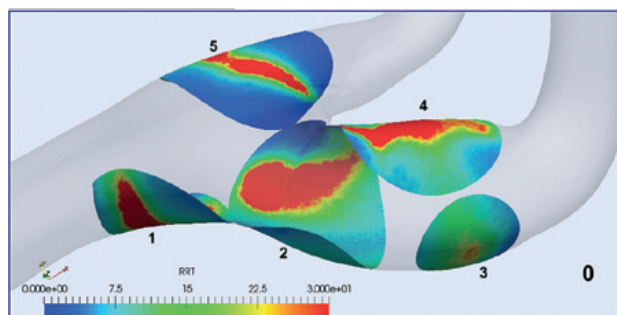


Рис. 10. Зоны повышенного риска формирования рестеноза
Fig. 10. Areas of increased risk of restenosis formation

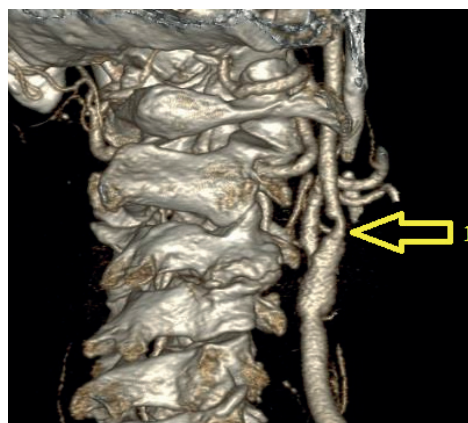


Рис. 11. Мультиспиральная компьютерная томография с ангиографией брахиоцефальных артерий через 6 месяцев после каротидной эндартерэктомии: 1 — 80% рестеноз правой внутренней сонной артерии
Fig. 11. Multislice computed tomography with angiography of the brachiocephalic arteries 6 months after carotid endarterectomy: 1 — 80% restenosis of the right internal carotid artery

вание роботизированной техники на КЭЭ — операции, которая стала фактически «конвейерной», составляет лишь вопрос времени. В будущем коллаборация данной возможности с результатами компьютерного моделирования позволит с максимальной точностью, исключая вероятные ошибочные «предпочтения» человека, осуществлять персонализированную КЭЭ, повышая установленные стандарты качества.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Продемонстрированный способ компьютерного моделирования на представленном клиническом примере подтвердил свою эффективность в прогнозировании каротидного рестеноза после классической каротидной эндартерэктомии. Рутинное применение данной методики среди всей когорты больных после реконструктивных вмешательств на брахиоцефальных артериях позволит определять пациентов с высоким риском развития потери просвета сосуда, осуществлять их прецизионную курацию в среднеотдаленном и отдаленном периодах наблюдения, избегая развития ишемических событий.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Национальные рекомендации по ведению пациентов с заболеваниями брахиоцефальных артерий. URL: http://www.angiolsurgery.org/recommendations/2013/recommendations_brachiocephalic.pdf [Дата обращения 20.05.2021]
2. Казанцев А.Н., Тарасов Р.С., Бурков Н.Н., Шабаев А.Р., Лидер Р.Ю., Миронов А.В. Каротидная эндартерэктомия: трехлетние результаты наблюдения в рамках одноцентрового регистра. *Ангиология и сосудистая хирургия*. 2018;24(3):101–108.
3. Виноградов Р.А., Матусевич В.В. Результаты применения гломуссохраняющих каротидных эндартерэктомий. *Медицинский вестник Северного Кавказа*. 2017;12(4):467–468.
4. Гавриленко А.В., Куллин А.В., Аль-Юсеф Н.Н., Ван Сяочэнь, Булатова Л.Р., Ли Жуй. Метаанализ результатов эверсионной каротидной эндартерэктомии и эндартерэктомии с пластикой заплатой. *Ангиология и сосудистая хирургия*. 2020;26(1):176–183. <https://doi.org/10.33529/ANGIO202012>
5. Дуданов И.П., Абузаб Б.С., Ахметов В.В. Сравнительная характеристика классической и эверсионной эндартерэктомии сонных артерий. *Исследования и практика в медицине*. 2017;4(3):8–15. <https://doi.org/10.17709/2409-2231-2017-4-3-1>
6. Казанцев А.Н., Черных К.П., Лидер Р.Ю., Багдавадзе Г.Ш., Андрейчук К.А., Калинин Е.Ю., и др. Сравнительные результаты классической и эверсионной каротидной эндартерэктомии. *Кардиология и сердечно-сосудистая хирургия*. 2020;13(6):550–555. <https://doi.org/10.17116/kardio202013061550>
7. Бокерия Л.А., Бахметьев А.С., Коваленко В.И., Темрезев М.Б., Шумилина М.В., Чехонацкая М.Л. Выбор метода каротидной эндартерэктомии при атеросклеротическом поражении внутренней сонной артерии. *Аннaлы хирургии*. 2017;22(5):265–271. <https://doi.org/10.18821/1560-9502-2017-22-5-265-271>
8. Demirel S, Chen D, Mei Y, Partovi S, von Tengg-Kobligk H, Dadrich M, et al. Comparison of morphological and rheological conditions between conventional and eversion carotid endarterectomy using computational fluid dynamics a pilot study. *Vascular*. 2015;23(5):474–482. PMID: 25298137 <https://doi.org/10.1177/1708538114552836>
9. Domanin M, Bissacco D, Le Van D, Vergara C. Computational fluid dynamic comparison between patch-based and primary closure techniques after carotid endarterectomy. *J Vasc Surg*. 2018;67(3):887–897. PMID: 29246640 <https://doi.org/10.1016/j.jvs.2017.08.094>
10. Guerciotti B, Vergara C, Azzimonti L, Forzenigo L, Buora A, Biondetti P, et al. Computational study of the fluid-dynamics in carotids before and after endarterectomy. *J Biomech*. 2016;49(1):26–38. PMID: 26617369 <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2015.11.009>
11. Ištvanic T, Vrselja Z, Brkić H, Radić R, Lekšan I, Curic G. Extended Eversion Carotid Endarterectomy: Computation of Hemodynamics. *Ann Vasc Surg*. 2015;29(8):1598–1605. PMID: 26319145 <https://doi.org/10.1016/j.avsg.2015.05.034>
12. Казанцев А.Н., Богомолова А.В., Бурков Н.Н., Баяндин М.С., Грищенко Е.В., Гусельникова Ю.И., и др. Морфология рестеноза после классической каротидной эндартерэктомии с применением заплат из диэпоксидобработанного ксеноперикарда. *Кардиология и сердечно-сосудистая хирургия*. 2020;13(1):68–71. <https://doi.org/10.17116/kardio20201301168>
13. Liu D, Li ZL, Wang M, Wu RD, Wang JS, Wang SM, et al. Comparative Analysis of Patch Angioplasty Versus Selective Primary Closure During Carotid Endarterectomy Performed at a Single Vascular Centre in China. *Ann Vasc Surg*. 2020;S0890–5096(20)31079–7. PMID: 33383139 <https://doi.org/10.1016/j.avsg.2020.11.036>
14. Lazarides MK, Christaina E, Argyriou C, Georgakarakos E, Tripsianis G, Georgiadis GS. Network Meta-Analysis of Carotid Endarterectomy Closure Techniques. *Eur J Vasc Endovasc Surg*. 2021;61(2):181–190. PMID: 33257115 <https://doi.org/10.1016/j.ejvs.2020.10.009>
15. Helgetveit I, Krog AH. Totally laparoscopic aortobifemoral bypass surgery in the treatment of aortoiliac occlusive disease or abdominal aortic aneurysms — a systematic review and critical appraisal of literature. *Vasc Health Risk Manag*. 2017;13:187–199. PMID: 28572732 <https://doi.org/10.2147/VHRM.S130707>
16. Colvard B, Georg Y, Lejay A, Ricco JB, Swanstrom L, Lee J, et al. Total robotic iliac aneurysm repair with preservation of the internal iliac artery using sutureless vascular anastomosis. *J Vasc Surg Cases Innov Tech*. 2019;5(3):218–224. PMID: 31297470 <https://doi.org/10.1016/j.jvscit.2019.01.001>

REFERENCES

1. *Natsional'nye rekomendatsii po vedeniyu patsientov s zabolevaniyami brakhiocefal'nykh arteriy*. at: http://www.angiolsurgery.org/recommendations/2013/recommendations_brachiocephalic.pdf [Accessed 20 May 2021] (in Russ.).
2. Kazantsev AN, Tarasov RS, Burkov NN, Shabaev AR, Lider RYu, Mironov AV. Carotid endarterectomy: three-year results of follow up within the framework of a single-centre register. *Angiology and Vascular Surgery*. 2018;24(3):101–108. (in Russ.)
3. Vinogradov RA, Matusevich VV. Carotid body saving techniques in carotid artery surgery. *Medical News of the North Caucasus*. 2017;12(4):467–468. (In Russ.). <https://doi.org/10.14300/mnnc.2017.12130>
4. Gavrilenko AV, Kuklin AV, Al-Yousef NN, Wang Xiaochen, Bulatova LR, Li Rui. Meta-Analysis of the Results of Eversion Carotid Endarterectomy and Endarterectomy with Patch Plasty. *Angiology and Vascular Surgery*. 2020;26(1):176–183. (In Russ.) <http://doi.org/10.33529/ANGIO2020121>
5. Dudanov IP, Abuazab BS, Akhmetov VV. Comparative characteristics of classical and eversion endarterectomy of the carotid arteries. *Research'n Practical Medicine Journal*. 2017;4(3):8–15. (in Russ.). <https://doi.org/10.17709/2409-2231-2017-4-3-1>
6. Kazantsev AN, Chernykh KP, Lider RYu, Bagdavadze GSh, Andreychuk KA, Kalinin EYu, et al. Comparative results of conventional and eversion carotid endarterectomy. *Kardiologiya i Serdechno-Sosudistaya Khirurgiya*. 2020;13(6):550–555. (in Russ.) <https://doi.org/10.17116/kardio202013061550>
7. Bockeria LA, Bakhmet'ev AS, Kovalenko VI, Temrezov MB, Shumilina MV, Chekhonatskaya ML. The Choice of Carotid Endarterectomy Method in Atherosclerotic Disease of Internal Carotid Artery. *Annals of Surgery (Russia)*. 2017;22(5):265–271. (in Russ.). <https://doi.org/10.18821/1560-9502-2017-22-5-265-271>
8. Demirel S, Chen D, Mei Y, Partovi S, von Tengg-Kobligk H, Dadrich M, et al. Comparison of morphological and rheological conditions between conventional and eversion carotid endarterectomy using computational fluid dynamics a pilot study. *Vascular*. 2015;23(5):474–482. PMID: 25298137 <https://doi.org/10.1177/1708538114552836>
9. Domanin M, Bissacco D, Le Van D, Vergara C. Computational fluid dynamic comparison between patch-based and primary closure techniques after carotid endarterectomy. *J Vasc Surg*. 2018;67(3):887–897. PMID: 29246640 <https://doi.org/10.1016/j.jvs.2017.08.094>
10. Guerciotti B, Vergara C, Azzimonti L, Forzenigo L, Buora A, Biondetti P, et al. Computational study of the fluid-dynamics in carotids before and after endarterectomy. *J Biomech*. 2016;49(1):26–38. PMID: 26617369 <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2015.11.009>
11. Ištvanic T, Vrselja Z, Brkić H, Radić R, Lekšan I, Curic G. Extended Eversion Carotid Endarterectomy: Computation of Hemodynamics. *Ann Vasc Surg*. 2015;29(8):1598–1605. PMID: 26319145 <https://doi.org/10.1016/j.avsg.2015.05.034>
12. Kazantsev AN, Bogomolova AV, Burkov NN, Bayandin MS, Grishchenko EV, Guselnikova YuI, et al. Morphological features of restenosis after carotid endarterectomy with diepoxide-treated xenopericardial patch angioplasty. *Kardiologiya i Serdechno-Sosudistaya Khirurgiya*. 2020;13(1):68–71. (in Russ.) <https://doi.org/10.17116/kardio20201301168>
13. Liu D, Li ZL, Wang M, Wu RD, Wang JS, Wang SM, et al. Comparative Analysis of Patch Angioplasty Versus Selective Primary Closure During Carotid Endarterectomy Performed at a Single Vascular Centre in China. *Ann Vasc Surg*. 2020;S0890–5096(20)31079–7. PMID: 33383139 <https://doi.org/10.1016/j.avsg.2020.11.036>
14. Lazarides MK, Christaina E, Argyriou C, Georgakarakos E, Tripsianis G, Georgiadis GS. Network Meta-Analysis of Carotid Endarterectomy Closure Techniques. *Eur J Vasc Endovasc Surg*. 2021;61(2):181–190. PMID: 33257115 <https://doi.org/10.1016/j.ejvs.2020.10.009>
15. Helgetveit I, Krog AH. Totally laparoscopic aortobifemoral bypass surgery in the treatment of aortoiliac occlusive disease or abdominal aortic aneurysms – a systematic review and critical appraisal of literature. *Vasc Health Risk Manag*. 2017;13:187–199. PMID: 28572732 <https://doi.org/10.2147/VHRM.S130707>
16. Colvard B, Georg Y, Lejay A, Ricco JB, Swanstrom L, Lee J, et al. Total robotic iliac aneurysm repair with preservation of the internal iliac artery using sutureless vascular anastomosis. *J Vasc Surg Cases Innov Tech*. 2019;5(3):218–224. PMID: 31297470 <https://doi.org/10.1016/j.jvscit.2019.01.001>

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

- Казанцев Антон Николаевич** сердечно-сосудистый хирург, отделение хирургии № 3, СПб ГБУЗ «Городская Александровская больница»;
<https://orcid.org/0000-0002-1115-609X>, dr.antonio.kazantsev@mail.ru;
 20%: выполнение операций, написание статьи, утверждение окончательного варианта статьи
- Виноградов Роман Александрович** доктор медицинских наук, заведующий отделением сосудистой хирургии ГБУЗ «НИИ – ККБ № 1 им. проф. С.В. Очаповского»;
<http://orcid.org/0000-0001-9421-586X>, viromal@mail.ru;
 19%: концепция и дизайн, написание статьи, утверждение окончательного варианта статьи
- Захаров Юрий Николаевич** доктор физико-математических наук, заведующий кафедрой, ФГБОУ ВО КемГМУ;
<http://orcid.org/0000-0002-2895-1428>, zaharovyn@yandex.ru;
 18%: концепция и дизайн, утверждение окончательного варианта статьи
- Борисов Владимир Геральдович** кандидат физико-математических наук, ФГБОУ ВО КемГМУ;
<http://orcid.org/0000-0002-9117-9661>, aaarppmmmo00@rambler.ru;
 14%: концепция и дизайн, утверждение окончательного варианта статьи
- Чернявский Михаил Александрович** доктор медицинских наук, руководитель научно-исследовательского отдела сосудистой и интервенционной хирургии, ФГБУ «НМИЦ им. В.А. Алмазова»;
<http://orcid.org/0000-0003-1214-0150>, GibridSSH2@yandex.ru
 7%: написание статьи, утверждение окончательного варианта статьи
- Кравчук Вячеслав Николаевич** доктор медицинских наук, профессор, заведующий кафедрой сердечно-сосудистой хирургии ФГБОУ ВО «СЗГМУ им. И.И. Мечникова»;
<http://orcid.org/0000-0002-6337-104X>, kravchuk9@yandex.ru;
 6%: написание статьи, утверждение окончательного варианта статьи
- Шматов Дмитрий Викторович** доктор медицинских наук, профессор, заместитель главного врача по кардиохирургии, Клиника высоких медицинских технологий им. Н.И. Пирогова СПбГУ;
<https://orcid.org/0000-0002-1296-8161>, dv.shmatov@gmail.com;
 5%: концепция и дизайн, утверждение окончательного варианта статьи
- Черных Константин Петрович** сердечно-сосудистый хирург, отделение хирургии № 3, СПб ГБУЗ «Городская Александровская больница»;
<https://orcid.org/0000-0002-5089-5549>, cvs.doc@yandex.ru;
 4%: выполнение операций, написание статьи, исправление статьи, утверждение окончательного варианта статьи
- Сорокин Андрей Александрович** сердечно-сосудистый хирург, Клиника высоких медицинских технологий им. Н.И. Пирогова СПбГУ;
<https://orcid.org/0000-0003-0493-4209>, sorokin@gmail.com;
 3%: выполнение операций, исправление статьи, утверждение окончательного варианта статьи
- Багдавадзе Годерзи Шотаевич** ординатор, кафедра хирургии им. Н.Д. Монастырского ФГБОУ ВО «СЗГМУ им. И.И. Мечникова»;
<https://orcid.org/0000-0001-5970-6209>, gud_777@bk.ru;
 2%: выполнение операций, исправление статьи, утверждение окончательного варианта статьи
- Артюхов Сергей Викторович** кандидат медицинских наук, заведующий операционным блоком, СПб ГБУЗ «Городская Александровская больница»;
<http://orcid.org/0000-0001-8249-3790>, art_serg@mail.ru;
 1%: концепция и дизайн, утверждение окончательного варианта статьи
- Хубулава Геннадий Григорьевич** доктор медицинских наук, профессор, академик РАН, заведующий первой кафедрой и клиникой хирургии (усовершенствования врачей) им. П.А. Куприянова, ФГБОУ ВО «ВМА им. С.М. Кирова» МО РФ;
<http://orcid.org/0000-0002-9242-9941>, ggkh07@rambler.ru;
 1%: концепция и дизайн, исправление статьи, утверждение окончательного варианта статьи

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Prediction of Resthenosis After Carotid Endarterectomy by the Method of Computer Simulation

A.N. Kazantsev¹✉, R.A. Vinogradov², Yu.N. Zakharov³, V.G. Borisov³, M.A. Chernyavsky⁴, V.N. Kravchuk^{5,6}, D.V. Shmatov⁷, K.P. Chernykh¹, A.A. Sorokin⁷, G.Sh. Baghdavadze⁶, S.V. Artyukhov¹, G.G. Khubulava^{5,8}

Department of Surgery No. 3

¹ St. Petersburg City Alexandrovskaya Hospital

4 Solidarnosti St., St. Petersburg, 193312, Russian Federation

² S.V. Ochapovsky Research Institute and Regional Clinical Hospital No. 1 of the Ministry of Health of Russian Federation

167 1 Maya St., Krasnodar, 350086, Russian Federation

³ Kemerovo State Medical University of the Ministry of Health of the Russian Federation

22a Voroshilova St., Kemerovo, 650056, Russian Federation

⁴ V.A. Almazov National Medical Research Center of the Ministry of Health of Russian Federation

2 Akkuratova St., St. Petersburg, 197341, Russian Federation

⁵ S.M. Kirov Military Medical Academy of the Ministry of Defense of the Russian Federation

6 Akademika Lebedeva St., St. Petersburg, 194044, Russian Federation

⁶ I.I. Mechnikov North-Western State Medical University

41 Kirochnaya St., St. Petersburg, 191015, Russian Federation

⁷ St. Petersburg State University, N.I. Pirogov Clinic of High Medical Technologies

7/9 Universitetskaya nab., St. Petersburg, 199034, Russian Federation

⁸ I.P. Pavlov First St. Petersburg State Medical University of the Ministry of Health of the Russian Federation

6-8 Lva Tolstogo, St. Petersburg, 197022, Russian Federation

✉ **Contacts:** Anton N. Kazantsev, Cardiovascular Surgeon, Department of Surgery № 3, Aleksandrovskaya City Hospital. Email: dr.antonio.kazantsev@mail.ru

ABSTRACT The article describes a computer modeling technique that allows predicting the development of restenosis of the internal carotid artery after carotid endarterectomy (CEE). A clinical case has been demonstrated that proves the effectiveness of the developed method. It is indicated that for the correct formation of the geometric model, data from multispiral computed tomography with angiography of the patient after CEE with a layer thickness of 0.6 mm and a current of 355 mA are required. To build a flow model, data of color duplex scanning in three sections are required: 1. In the proximal section of the common carotid artery (3 cm proximal to the bifurcation); 2. In the section of the external carotid artery, 2 cm distal to the carotid sinus; 3. In the section of the internal carotid artery, 2 cm distal to the carotid sinus. The result of computer calculations using specialized software (Sim Vascular, Python, Open Foam) is a mathematical model of blood flow in a vessel. It is an array of calculated data describing the speed and other characteristics of the flow at each point of the artery. Based on the analysis of RRT and TAWSS indicators, a computer model of bifurcation is formed, which makes it possible to predict areas of increased risk of restenosis development. Thus, the developed technique is able to identify a cohort of patients after CEE, subjected to a high probability of loss of the vessel lumen. Such an opportunity will provide a more precise supervision of these patients in the postoperative period with the aim of early diagnosis of restenosis and timely prevention of the development of adverse cardiovascular events.

Keywords: carotid endarterectomy; classic carotid endarterectomy; eversion carotid endarterectomy; patch; restenosis; computer modelling

For citation Kazantsev AN, Vinogradov RA, Zakharov YuN, Borisov VG, Chernyavsky MA, Kravchuk VN, et al. Prediction of Restenosis After Carotid Endarterectomy by the Method of Computer Simulation. *Russian Sklifosovsky Journal of Emergency Medical Care*. 2021;10(2):401–407. <https://doi.org/10.23934/2223-9022-2021-10-2-401-407> (in Russ.)

Conflict of interest Authors declare lack of the conflicts of interests

Acknowledgments, sponsorship The study had no sponsorship

Affiliations

Anton N. Kazantsev	Cardiovascular Surgeon, Department of Surgery No. 3, Aleksandrovsky City Hospital; https://orcid.org/0000-0002-1115-609X , dr.antonio.kazantsev@mail.ru; 20%, performing operations, writing an article, approving the final version of the article
Roman A. Vinogradov	Doctor of Medical Sciences, Head of Department of Cardiovascular Surgery, S.V. Ochapovsky Research Institute-Regional Clinical Hospital No. 1; http://orcid.org/0000-0001-9421-586X , viromal@mail.ru; 19%, concept and design, article writing, approval of the final version of the article
Yuri N. Zakharov	Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Head of the Department Kemerovo State Medical University; http://orcid.org/0000-0002-2895-1428 , zaxarovyn@yandex.ru; 18%, concept and design, approval of the final version of the article
Vladimir G. Borisov	Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Kemerovo State Medical University; http://orcid.org/0000-0002-9117-9661 , aaapppmmoooo@rambler.ru; 14%, concept and design, approval of the final version of the article
Mikhail A. Chernyavsky	Doctor of Medical Sciences, Head of the Research Department of Vascular and Interventional Surgery, V.A. Almazov National Medical Research Center; http://orcid.org/0000-0003-1214-0150 , GibridSSH2@yandex.ru 7%, writing an article, approval of the final version of the article
Vyacheslav N. Kravchuk	Doctor of Medical Sciences, Professor, Head of the Department of Cardiovascular Surgery, I.I. Mechnikov North-Western State Medical University; http://orcid.org/0000-0002-6337-104X , kravchuk9@yandex.ru; 6%, writing an article, approval of the final version of the article
Dmitry V. Shmatov	Doctor of Medical Sciences, Professor, Deputy Chief Physician for Cardiac Surgery, N.I. Pirogov Clinic of High Medical Technologies, St. Petersburg State University; https://orcid.org/0000-0002-1296-8161 , dv.shmatov@gmail.com; 5%, concept and design, approval of the final version of the article
Konstantin P. Chernykh	Cardiovascular Surgeon, Department of Surgery No. 3, Alexandrovsky City Hospital; https://orcid.org/0000-0002-5089-5549 , cvs.doc@yandex.ru; 4%, performing operations, writing an article, correcting an article, approving the final version of an article
Andrey A. Sorokin	Cardiovascular Surgeon, N.I. Pirogov Clinic of High Medical Technologies, St. Petersburg State University; https://orcid.org/0000-0003-0493-4209 , sorokin@gmail.com; 3%, execution of operations, correction of the article, approval of the final version of the article
Goderzi Sh. Bagdavadze	Resident, N.D. Monastyrsky Department of Surgery, I.I. Mechnikov North-Western State Medical University; https://orcid.org/0000-0001-5970-6209 , gud_777@bk.ru; 2%, execution of operations, correction of the article, approval of the final version of the article
Sergey V. Artyukhov	Candidate of Medical Sciences, Head of the Operating Unit, Alexandrovsky City Hospital; http://orcid.org/0000-0001-8249-3790 , art_serg@mail.ru; 1%, concept and design, approval of the final version of the article
Gennady G. Khubulava	Doctor of Medical Sciences, Professor, Head of the P.A. Kupriyanov First Department and Surgery Clinic of Advanced Training for Doctors, S.M. Kirov Military Medical Academy; http://orcid.org/0000-0002-9242-9941 , ggkh07@rambler.ru; 1%, concept and design, correction of the article, approval of the final version of the article

Received on 27.01.2021

Review completed on 11.03.2021

Accepted on 30.03.2021

Поступила в редакцию 27.01.2021

Рецензирование завершено 11.03.2021

Принята к печати 30.03.2021