

Известия Алтайского государственного университета. 2025. № 1 (141). С. 81–87.  
Izvestiya of Altai State University. 2025. No 1 (141). P. 81–87.

Научная статья

УДК 519.6

DOI: 10.14258/izvasu(2025)1-10

## Корреляция интегральных гемодинамических показателей кровотока в персонально-специфических моделях каротидной бифуркации

Владимир Геральдович Борисов<sup>1</sup>, Юрий Николаевич Захаров<sup>2</sup>,  
Роман Александрович Виноградов<sup>3</sup>, Виктория Павловна Дербилова<sup>4</sup>,  
Элина Эльбрусовна Хетеева<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Кемеровский государственный университет, Кемерово, Россия; Федеральный исследовательский центр Информационных и вычислительных технологий, Новосибирск, Россия, vborkuzbassnet@gmail.ru

<sup>2</sup>Федеральный исследовательский центр Информационных и вычислительных технологий, Новосибирск, Россия, zaxarovyn@yandex.ru

<sup>3</sup>Кубанский государственный медицинский университет, НИИ — Краевая клиническая больница № 1, Краснодар, Россия, viromal@mail.ru

<sup>4</sup>Кубанский государственный медицинский университет, НИИ — Краевая клиническая больница № 1, Краснодар, Россия, 100.100@mail.ru

<sup>5</sup>Кубанский государственный медицинский университет, НИИ — Краевая клиническая больница № 1, Краснодар, Россия, elina.kheteeva@mail.ru

Original article

## Correlation of Integral Hemodynamic Indices of Blood Flow in Personal-Specific Models of Carotid Bifurcation

Vladimir G. Borisov<sup>1</sup>, Yury N. Zakharov<sup>2</sup>, Roman A. Vinogradov<sup>3</sup>,  
Victoriya P. Derbilova<sup>4</sup>, Elina E. Kheteeva<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Kemerovo State University, Kemerovo, Russia; Federal Research Center for Information and Computing Technologies, Novosibirsk, Russia, vborkuzbassnet@gmail.ru

<sup>2</sup>Federal Research Center for Information and Computing Technologies, Novosibirsk, Russia, zaxarovyn@yandex.ru

<sup>3</sup>Kuban State Medical University, Research Institute — Regional Clinical Hospital No 1, Krasnodar, Russia, viromal@mail.ru

<sup>4</sup>Kuban State Medical University, Research Institute — Regional Clinical Hospital No 1, Krasnodar, Russia, 100.100@mail.ru

<sup>5</sup>Kuban State Medical University, Research Institute — Regional Clinical Hospital No 1, Krasnodar, Russia, elina.kheteeva@mail.ru

**Аннотация.** В работе исследуются взаимозависимость интегральных гемодинамических показателей, характеризующих зоны риска возникновения атеросклероза в области бифуркации сонной артерии. На основании данных КТ ангиографии пациентов строились геометрические модели сосудов, в которых выполнялись численные расчеты установленногося периодического кровотока и гемодинамических показателей, связанных с пристеночным напряжением сдвига. По результатам численных расчетов

**Abstract.** The paper studies the interdependence of integral hemodynamic indices characterizing the risk zones for atherosclerosis development in the carotid artery bifurcation region. Geometric models of vessels are constructed using the CT angiography data from patients to perform numerical calculations of steady-state periodic blood flow and hemodynamic indices related to parietal shear stress. Then, the regions with critical values of the indices higher than values for healthy arteries are mapped on the walls

на стенках моделей строились области (критические зоны), в которых нарушались критические значения показателей, присущие здоровой артерии. По этим областям вычислялись интегральные значения показателей, которые затем сравнивались как для моделей здоровых сосудов, так и для моделей, построенных по данным пациентов, перенесших операцию эндартерэктомии. Была установлена сильная линейная корреляция показателей по выборке из 101 модели. Исследовался также вопрос о влиянии критических значений, характеризующих критическую область, на взаимосвязь интегральных показателей.

**Ключевые слова:** моделирование кровотока, вычислительная гидродинамика, гемодинамические показатели, бифуркация сонной артерии, корреляция показателей

**Для цитирования:** Борисов В.Г., Захаров Ю.Н., Виноградов Р.А., Дербилова В.П., Хетеева Э.Э. Корреляция интегральных гемодинамических показателей кровотока в персонально-специфических моделях каротидной бифуркации // Известия Алтайского государственного университета. 2025. № 1 (141). С. 81–87. DOI: 10.14258/izvasu(2025)1-10

**Финансирование:** исследование выполнено при финансовой поддержке Кубанского научного фонда в рамках научного проекта № НИП-20.1.

## Введение

Гемодинамические показатели, распределенные на стенках кровеносных сосудов, несут важную информацию о рисках возникновения различных патологий, связанных с нарушением кровотока. Актуальность темы расчетов этих показателей состоит в том, что понимание характера их распределения на стенке сосуда позволяет, в частности, предсказать риски возникновения атеросклероза. Анализу гемодинамических показателей кровотока в каротидной

бифуркации посвящено много работ (см., например, [1–5]). В качестве основного показателя, характеризующего взаимодействие потока крови с клетками эндотелия сосуда, принимается так называемый WSS (Wall Shear Stress), который представляет собой модуль тангенциальной составляющей тензора напряжения сдвига, распределенный по стенке сосуда. Помимо этого, используются следующие показатели, получающиеся из WSS (см. [2, 5]):

**Keywords:** blood flow simulation, computational fluid dynamics, carotid bifurcation, hemodynamic indices, correlation of indices

**For citation:** Borisov V.G., Zakharov Yu.N., Vinogradov R.A., Derbilova V.P., Kheteeva E.E. Correlation of Integral Hemodynamic Indices of Blood Flow in Personal-Specific Models of Carotid Bifurcation. *Izvestiya of Altai State University*. 2025. No 1 (141). P. 81–87. (In Russ.). DOI: 10.14258/izvasu(2025)1-10

**Funding:** the study was funded by the Kuban Science Fund (project No NIP-20.1.).

бифуркации посвящено много работ (см., например, [1–5]). В качестве основного показателя, характеризующего взаимодействие потока крови с клетками эндотелия сосуда, принимается так называемый WSS (Wall Shear Stress), который представляет собой модуль тангенциальной составляющей тензора напряжения сдвига, распределенный по стенке сосуда. Помимо этого, используются следующие показатели, получающиеся из WSS (см. [2, 5]):

$$TAWSS = \frac{1}{T} \int_0^T |WSS| dt, OSI = \frac{1}{2} \cdot \left( 1 - \left| \int_0^T WSS dt \right| \right), RRT = \frac{1}{(1 - 2 \cdot OSI) \cdot TAWSS}, \quad (1)$$

здесь Т — длина интервала сердечного цикла. Областям аномального пристеночного кровотока: застойным зонам, зонам ретроградного, осцилляторного течения, соответствуют аномальные значения этих показателей. Малые значения показателя TAWSS свидетельствуют о застойности пристеночного кровотока, а большие (ближкие к 0.5) значения OSI — о его осцилляторном характере. Показатель RRT отражает одновременное воздействие этих двух неблагоприятных факторов, способствующих возникновению атеросклероза, поэтому его можно считать основным [2]. Разные авторы приводят несколько различающиеся границы значений показателей (1), выше (для TAWSS) и ниже (для OSI и RRT) которых риски развития атеросклероза будут минимальны [5–8]. В на-

стоящей работе, так же как и в [9], в качестве критических приняты значения TAWSS=0.2 Па, OSI=0.25, RRT=6.25 Па<sup>-1</sup>, кроме этого исследуется возможность вариации критических значений показателя RRT в интервале [3.125 Па<sup>-1</sup>, 12.5 Па<sup>-1</sup>].

Показатели (1) представляют собой скалярные поля, распределенные на стенке сосуда. Упомянутые в заголовке статьи интегральные показатели, характеризующие зоны возможного развития атеросклероза, определяются следующим образом. Строится область Z на стенке сосуда (критическая зона), в которой показатель RRT превышает выбранное критическое значение. Затем по следующим формулам вычисляются четыре интегральных показателя:

$$Sz = \int_z ds, \quad TAWz = \int_z TAWSS \, ds, \quad OSIZ = \int_z OSIZ \, ds, \quad RRTz = \int_z RRT \, ds. \quad (2)$$

В настоящей работе исследуется вопрос о корреляции интегральных показателей (2), построенных по результатам численных расчетов, проведенных на персонально-специфических моделях сосудов.

#### Построение геометрических моделей и численные расчеты

Модели, включающие бифуркацию, отрезки Общей (OCA), Внутренней (BCA) и Наружной (HCA) Сонных Артерий, строились по данным компьютерной ангиографии (КТА) пациентов возрастного интервала от 24 до 74 лет. Процесс построения описан в [9, 10]. Все построенные модели разделены на 3 группы:

- Norm — модели здоровых артерий, с естественным изгибом ОСА перед бифуркацией (35 шт.);
- Norm\_S — модели здоровых артерий, с прямолинейной осью ОСА перед бифуркацией (50 шт.);

- Post — модели артерий после операции каротидной эндартерэктомии (16 шт.).

При этом группа Norm\_S разбивается на две подгруппы: 15 моделей (обозначаемых далее Norm\_SO) с естественной прямолинейной осью ОСА, и 35 модифицированных моделей Norm со «спрямленной» ОСА (см. [11]), обозначаемых далее Norm\_SC.

Построение геометрических моделей и численные расчеты кровотока выполнялись методом конечных элементов в приложении [12] с идентичными для всех моделей исходными данными расчетов, описанными в [10]. По результатам численных расчетов для всех моделей строились критические зоны и вычислялись показатели (2). При этом принимались во внимание только части зон, лежащие на внутренней стенке ОСА — ВСА (см. рис. 1а), которые подвержены наибольшему риску развития атеросклероза.

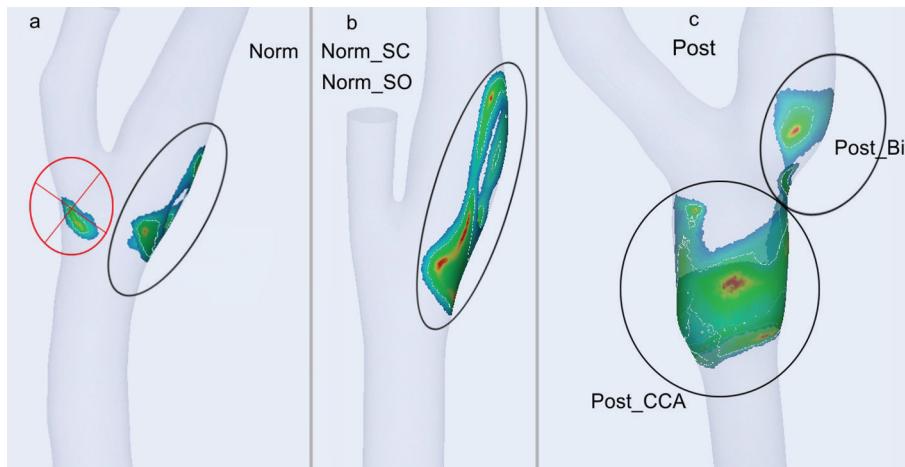


Рис. 1. Примеры геометрических моделей с критическими зонами

У каждой модели группы Post выделялись две критические зоны (см. рис. 1с):

- Post\_Bif — зоны, лежащие на внутренней стенке ОСА — ВСА, как и у моделей Norm;
- Post\_CCA — зоны, возникшие в дистальной части ОСА в результате операции эндартерэктомии.

#### Результаты и обсуждение

Все зоны моделей групп Norm, Norm\_S, объединенные с зонами Post\_Bif, составили основную выборку объемом  $n=101$ . На этой выборке вычислялись коэффициенты линейной корреляции Пирсона  $r$  для пар показателей (2) и строились доверительные интервалы  $[r_{\min}, r_{\max}]$  с уровнем значимости  $p=0.05$ .

При критическом значении  $6,25 \text{ Па}^{-1}$  наиболее тесная связь обнаружена между показателями Sz и OSIZ:

$r > 0.993$ ,  $[0.990, 0.996]$ . Для этой пары получена формула линейной регрессии  $OSIZ = 0.324 \cdot Sz$  с индексом детерминации  $R^2 = 0.986$ . Столь сильная связь вызвана тем фактом, что диапазон изменения переменной Sz по выборке составляет более двух порядков, а интервал возможного изменения переменной OSIZ в критической зоне не шире  $[0.25, 0.5]$ . Как следствие, на интегральный показатель OSIZ давящее влияние оказывает площадь зоны Sz, а вариация значений OSIZ оказывается слабо. Для критических значений из интервала  $[3.125, 12.5]$  коэффициент корреляции пары Sz — OSIZ изменяется в интервале  $[0.977, 0.998]$ . Корреляция между остальными парами переменных также очень сильна, но слабее, чем для пары Sz — OSIZ.

Таблица 1

Коэффициенты корреляции и доверительные интервалы для основной выборки

|       | RRTz-Sz |       |       | RRTz-TAWz |       |       | TAWz-OSIz |       |       |
|-------|---------|-------|-------|-----------|-------|-------|-----------|-------|-------|
|       | 3.125   | 6.25  | 12.5  | 3.125     | 6.25  | 12.5  | 3.125     | 6.25  | 12.5  |
| r     | 0.920   | 0.968 | 0.975 | 0.791     | 0.920 | 0.950 | 0.893     | 0.965 | 0.984 |
| r_min | 0.880   | 0.953 | 0.964 | 0.695     | 0.883 | 0.926 | 0.840     | 0.949 | 0.976 |
| r_max | 0.948   | 0.978 | 0.984 | 0.859     | 0.945 | 0.966 | 0.929     | 0.976 | 0.989 |

В таблице 1 представлены данные трех пар показателей с наиболее слабой корреляцией для трех критических значений: 3.125, 6.25 и 12.5.

Отметим, что объем основной выборки для критического значения 12.5 равен 98, это связано с тем, что при ужесточении критерия из выборки выбывают три модели в связи с исчезновением критических зон. Критические зоны, соответствующие значению 12.5, изображены на рисунке 1 — это области, расположенные внутри изолиний белого цвета.

Для критерия 3.125 данные в таблице 1 приведены по основной выборке, из которой исключены шестнадцать зон Post\_Bif (объем выборки n=85). Это сделано потому, что у большинства моделей группы Post при уменьшении критерия до 3.125 зоны Post\_CCA

и Post\_Bif (см. рис. 1 с) увеличиваются настолько, что становятся трудноразделимыми. Поэтому попытка их сравнения с зонами моделей Norm оказывается некорректной.

Корреляционный анализ проводился и для выборки объемом n=32, объединяющей зоны Post\_Bif и Post\_CCA моделей Post. Для критического значения 6,25 Па<sup>-1</sup> наиболее тесная связь также обнаружена между показателями Sz и OSIz: r>0.988, [0.975, 0.994]. Получена формула линейной регрессии  $OSIz = 0.3346 \cdot Sz - 0.0049$  с  $R^2=0.976$ . В таблице 2 для выборки Post\_Bif + Post\_CCA приведены данные по тем же показателям, что и в таблице 1. По приведенной выше причине критерий 3.125 для моделей Post не использовался.

Таблица 2

Коэффициенты корреляции и доверительные интервалы для выборки Post\_Bif+Post\_CCA

|       | RRTz-Sz |       | RRTz-TAWz |       | TAWz-OSIz |       |
|-------|---------|-------|-----------|-------|-----------|-------|
|       | 6.25    | 12.5  | 6.25      | 12.5  | 6.25      | 12.5  |
| r     | 0.933   | 0.983 | 0.828     | 0.944 | 0.941     | 0.981 |
| r_min | 0.867   | 0.964 | 0.674     | 0.888 | 0.881     | 0.961 |
| r_max | 0.967   | 0.991 | 0.913     | 0.973 | 0.971     | 0.991 |

Для пар показателей строились диаграммы рассеяния на различных выборках. На рисунке 2а изображена диаграмма рассеяния для пары RRTz — Sz с критерием 6.25 по основной выборке. Цвет точек обозначает тип моделей: синий соответствует моде-

лям Norm, красный и зеленый — моделям Norm\_SO и Norm\_SC, а желтый — зонам Post\_Bif. Пунктирная линия — это график полиномиальной регрессии с формулой  $Sz = -0.0005 \cdot RRTz^2 + 0.0622 \cdot RRTz + 0.0383$  и  $R^2 = 0.949$ .

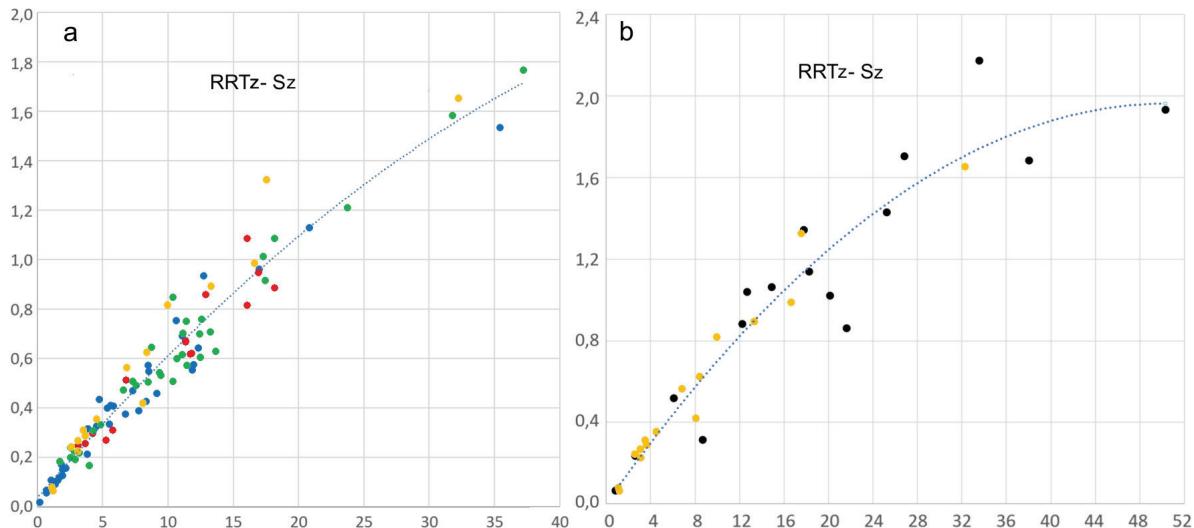


Рис. 2. Диаграммы рассеяния для показателей RRTz — Sz: а) по основной выборке, б) по зонам Post\_Bif+Post\_CCA

На рисунке 2б изображена диаграмма рассеяния пары RRTz — Sz с критерием 6.25 для выборки объемом n=32, состоящей из зон Post\_CCA и Post\_Bif. Желтый цвет, как и на рисунке 2а, соответствует зонам Post\_Bif, а черный — зонам Post\_CCA. Пунктирная линия — это график полиномиальной регрессии с формулой  $Sz = -0.0008 \cdot RRTz^2 + 0.0773 \cdot RRTz + 0.0095$  и  $R^2 = 0.927$ .

В связи с продемонстрированной выше сильной корреляцией интегральных показателей как для моделей Norm, так и для постоперационных моделей, можно сделать вывод, что при анализе гемодинамики достаточно использовать только показатель RRTz, значения которого отражают оба рисковых фактора атерогенеза. Как видно из полученных результа-

тов при вариации критического значения в довольно широких пределах, характер взаимосвязи показателей не изменяется. Однако при слишком большом критическом значении часть моделей может выпасть из анализа, а при слишком малом — критические зоны могут оказаться слишком большими и несравнимыми между собой.

Выполнялось сравнение средних M и медианных Me значений RRTz между двумя выборками: Norm+Post\_Bif и Norm\_S. Первая из них содержит модели с естественным изгибом ОСА, а у моделей второй выборки осевая линия ОСА прямолинейна. Для критического значения 3.125 аналогичное сравнение проводилось между выборками Norm и Norm\_SC. Полученные данные приведены в таблице 3.

Таблица 3

Средние и медианные значения показателя RRTz по группам критических зон

|    | 3.125 |         | 6.25          |        | 12,5          |        |
|----|-------|---------|---------------|--------|---------------|--------|
|    | Norm  | Norm_SC | Norm+Post_Bif | Norm_S | Norm+Post_Bif | Norm_S |
| n  | 35    | 35      | 51            | 50     | 49            | 49     |
| M  | 9.90  | 13.67   | 7.62          | 10.66  | 4.95          | 7.20   |
| Me | 8.54  | 12.98   | 5.59          | 10.54  | 2.98          | 7.08   |

Из таблицы 3 видно, что средние значения RRTz по группе Norm\_SC почти на 50 % выше, чем по группе Norm. Эта тенденция заметна и визуально — по взаиморасположению синих и желтых точек на рисунке 2а. Иными словами, моделям с естественным изгибом ОСА перед бифуркацией в среднем соответствуют более низкие значения RRTz по сравнению с моделями, у которых осевая линия ОСА прямолинейна, что соответствует результатам, полученным в [11].

### **Заключение**

Проведенные расчеты показали наличие сильной корреляции между шестью парами числовых интегральных показателей атерогенеза как для мо-

делей здоровых сосудов, так и для постоперационных моделей. Предлагается для оценки критических зон использовать показатель RRTz как наиболее информативный. Установлено, что увеличение или уменьшение критического показателя в определенных пределах не влияет существенным образом на сравнительный анализ гемодинамических показателей между различными моделями. Показано, что для группы моделей с естественным изгибом ОСА средние значения RRTz существенно меньше, чем для моделей, у которых ОСА имеет прямолинейную осевую линию, т.е. модели с естественным изгибом ОСА менее подвержены риску возникновения атеросклероза.

### **Библиографический список**

1. Ku D.N., Giddens D.P., Zarins C.K., Glagov S. Pulsatile Flow and Atherosclerosis in the Human Carotid Bifurcation. Positive Correlation Between Plaque Location and Low Oscillating Shear Stress // Arteriosclerosis. 1985. Vol. 5. No 3. P. 293–302. DOI: 10.1161/01.atv.5.3.293
2. Lee S.-W., Antiga L., Steinman D.A. Correlations Among Indicators of Disturbed Flow at the Normal Carotid Bifurcation // Journal of Biomechanics. 2009. Vol. 131. No 6. P. 1–7. DOI: 10.1115/1.3127252
3. Gallo D., Bijari P.B., Morbiducci U., et al. Segment-Specific Associations Between Local Haemodynamic and Imaging Markers of Early Atherosclerosis at the Carotid Artery: An In-Vivo Human Study // Journal of the Royal Society International. 2018. Vol. 15 (147). No 10. P. 1–11. DOI: 10.1098/rsif.2018.0352
4. Lopes D., Puga H., Teixeira J., Lima R. Blood Flow Simulations in Patient-Specific Geometries of the Carotid Artery: A Systematic Review // Journal of Biomechanics. 2020. Vol. 111. No 10. P. 1–15. DOI: 10.1016/j.jbiomech.2020.110019
5. Jung H., Kang T., Lee C-H., et al. Comparison of Haemodynamics in Carotid Endarterectomy: Primary Closure Versus Patch Angioplasty // Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics. 2022. Vol. 16. No 1. P. 1601–1618. DOI: 10.1080/19942060.2022.2102078

6. Harrison, G.J., How, T.V., Poole, et al. Closure Technique After Carotid Endarterectomy Influences Local Hemodynamics // *Journal of Vascular Surgery*. 2014. Vol. 60. No 2. P. 1–10. DOI: 10.1016/j.jvs.2014.01.069
7. Domanin M., Gallo D., Vergara C., et al. Prediction of Long Term Restenosis Risk After Surgery in the Carotid Bifurcation by Hemodynamic and Geometric Analysis // *Ann Biomed Eng.* 2019. Vol. 47. No 4. P. 1129–1140. DOI 10.1007/s10439-019-02201-8
8. Tzirakis K., Kamarianakis Y., Kontopodis N., Ioannou C.V. Classification of Blood Rheological Models Through an Idealized Symmetrical Bifurcation // *Symmetry*. 2023. Vol. 10. No 2. P. 1–17. DOI: 10.3390/sym15030630
9. Borisov V.G., Zakharov Y.N., Vinogradov R.A., et al. Mathematical Modeling in Assessing the Risk of Restenosis After Carotid Endarterectomy // *Biomedical Physics and Engineering Express*. 2024. Vol. 10. No 3. P. 035011. DOI: 10.1088/2057-1976/ad30cb
10. Борисов В.Г., Захаров Ю.Н., Виноградов Р.А. и др. Численное исследование гемодинамических показателей в персонально-специфической модели сонной артерии // Известия Алтайского государственного университета. 2024. Т. 135. № 1 С. 82–88. DOI: 10.14258/izvasu(2024)1-11
11. Borisov V.G., Zakharov Y.N., Derbilova V.P., et al. The Influence of Inlet Flow Asymmetry on the Carotid Bifurcation Hemodynamics // *Journal of Physics: Conference Series*. 2024. Vol. 2701. P. 012010. DOI: 10.1088/1742-6596/2701/1/012010
12. Updegrove A., Wilson N.M., Merkow J., et al. Simvascular: An Open Source Pipeline for Cardiovascular Simulation // *Annals of Biomedical Engineering*. 2017. Vol. 45. No 3. P. 525–541. DOI: 10.1007/s10439-016-1762-8

## References

1. Ku D.N., Giddens D.P., Zarins C.K., Glagov S. Pulsatile Flow and Atherosclerosis in the Human Carotid Bifurcation. Positive Correlation Between Plaque Location and Low Oscillating Shear Stress. *Arteriosclerosis*. 1985. Vol. 5. No 3. P. 293–302. DOI: 10.1161/01.atv.5.3.293
2. Lee S.-W., Antiga L., Steinman D.A. Correlations Among Indicators of Disturbed Flow at the Normal Carotid Bifurcation. *Journal of Biomechanics*. 2009. Vol. 131. No 6. P. 1–7. DOI: 10.1115/1.3127252
3. Gallo D., Bijari P.B., Morbiducci U., et al. Segment-Specific Associations Between Local Haemodynamic and Imaging Markers of Early Atherosclerosis at the Carotid Artery: An In-Vivo Human Study. *Journal of the Royal Society International*. 2018. Vol. 15 (147). No 10. P. 1–11. DOI: 10.1098/rsif.2018.0352
4. Lopes D., Puga H., Teixeira J., Lima R. Blood Flow Simulations in Patient-Specific Geometries of the Carotid Artery: A Systematic Review. *Journal of Biomechanics*. 2020. Vol. 111. No 10. P. 1–15. DOI: 10.1016/j.jbiomech.2020.110019
5. Jung H., Kang T., Lee C-H., et al. Comparison of Haemodynamics in Carotid Endarterectomy: Primary Closure Versus Patch Angioplasty. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*. 2022. Vol. 16. No 1. P. 1601–1618. DOI: 10.1080/19942060.2022.2102078
6. Harrison, G. J., How, T. V., Poole, et al. Closure Technique After Carotid Endarterectomy Influences Local Hemodynamics. *Journal of Vascular Surgery*. 2014. Vol. 60. No 2. P. 1–10. DOI: 10.1016/j.jvs.2014.01.069
7. Domanin M., Gallo D., Vergara C., et al. Prediction of Long Term Restenosis Risk After Surgery in the Carotid Bifurcation by Hemodynamic and Geometric Analysis. *Ann Biomed Eng.* 2019. Vol. 47. No 4. P. 1129–1140. DOI: 10.1007/s10439-019-02201-8
8. Tzirakis K., Kamarianakis Y., Kontopodis N., Ioannou C.V. Classification of Blood Rheological Models Through an Idealized Symmetrical Bifurcation. *Symmetry*. 2023. Vol. 10. No 2. P. 1–17. DOI: 10.3390/sym15030630
9. Borisov V.G., Zakharov Y.N., Vinogradov R.A., et al. Mathematical Modeling in Assessing the Risk of Restenosis After Carotid Endarterectomy. *Biomedical Physics and Engineering Express*. 2024. Vol. 10. No 3. P. 035011. DOI: 10.1088/2057-1976/ad30cb
10. Borisov V.G., Zakharov Y.N., Vinogradov R.A., et al. Numer Study of Hemodynamic Indices in a Patient-Specific Model of the Carotid Aartery. *Izvestiya of Altai State University*. 2024. Vol. 135. No 1 P. 82–88. (In Russ.). DOI: 10.14258/izvasu(2024)1-1
11. Borisov V.G., Zakharov Y.N., Derbilova V.P., et al. The Influence of Inlet Flow Asymmetry on the Carotid Bifurcation Hemodynamics. *Journal of Physics: Conference Series*. 2024. Vol. 2701. P. 012010. DOI: 10.1088/1742-6596/2701/1/012010
12. Updegrove A., Wilson N.M., Merkow J., et al. Simvascular: An Open Source Pipeline for Cardiovascular Simulation. *Annals of Biomedical Engineering*. 2017. Vol. 45. No 3. P. 525–541. DOI: 10.1007/s10439-016-1762-8

## Информация об авторах

**В.Г. Борисов**, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры фундаментальной математики, Кемеровский государственный университет, Кемерово, Россия; научный сотрудник лаборатории информационно-вычислительных технологий, Федеральный исследовательский центр Информационных и вычислительных технологий, Новосибирск, Россия;

**Ю.Н. Захаров**, доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории информационно-вычислительных технологий, Федеральный исследовательский центр Информационных и вычислительных технологий, Новосибирск, Россия;

**Р.А. Виноградов**, доктор медицинских наук, профессор кафедры хирургии № 1 ФПК и ППС, Кубанский государственный медицинский университет; сосудистый хирург, заведующий отделением сосудистой хирургии № 1, НИИ — ККБ № 1 им. С.В. Очаповского, Краснодар, Россия;

**В.П. Дерболова**, аспирант кафедры хирургии № 1 ФПК и ППС, Кубанский государственный медицинский университет; сосудистый хирург, отделение сосудистой хирургии № 1, НИИ — ККБ № 1 им. С.В. Очаповского, Краснодар, Россия;

**Э.Э. Хетеева**, аспирант кафедры хирургии № 1 ФПК и ППС, Кубанский государственный медицинский университет; сосудистый хирург, отделение сосудистой хирургии № 1, НИИ — ККБ № 1 им. С.В. Очаповского, Краснодар, Россия.

*Information about the authors*

**V.G. Borisov**, Candidate of Sciences in Physics and Mathematics, Associate Professor of the Department of Fundamental Mathematics, Kemerovo State University, Kemerovo, Russia; Researcher, Federal Research Center for Information and Computing Technologies, Laboratory of Information and Computing Technologies, Novosibirsk, Russia;

**Yu.N. Zakharov**, Doctor of Sciences in Physics and Mathematics, Senior Researcher, Federal Research Center for Information and Computing Technologies, Laboratory of Information and Computing Technologies, Novosibirsk, Russia;

**R.A. Vinogradov**, Doctor of Sciences in Medicine, Professor of the Surgery Department No 1, Kuban State Medical University; Vascular Surgeon, Head of the Department of Vascular Surgery, Ochapovsky Clinical Hospital No 1, Krasnodar, Russia;

**V.P. Derbilova**, Postgraduate Student of the Surgery Department No 1, Kuban State Medical University; Vascular Surgeon, Department of Vascular Surgery, Ochapovsky Clinical Hospital No 1, Krasnodar, Russia;

**E.E. Kheteeva**, Postgraduate Student of the Surgery Department No. 1, Kuban State Medical University; Vascular Surgeon, Department of Vascular Surgery, Ochapovsky Clinical Hospital No 1, Krasnodar, Russia.