

А. В. Доль¹, М. Н. Михин²

РЕГРЕССИОННЫЕ МОДЕЛИ БИОМЕХАНИКИ АТЕРОСКЛЕРОТИЧЕСКИХ БЛЯШЕК И ИХ СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ

¹Саратовский национальный исследовательский государственный университет
имени Н. Г. Чернышевского, Саратов, Россия

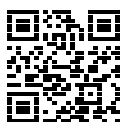
²Филиал Российского государственного гуманитарного университета, Домодедово,
Россия

Аннотация. В работе рассматривается круг вопросов, связанных с изучением стеноза сонных артерий. Для оценки риска отрыва бляшки методами биомеханики необходимо знать модули упругости компонентов атеросклеротических бляшек. In vivo они могут определяться на основе значения чисел Хаунсфилда (HU) на компьютерной томограмме (КТ). В ходе серии экспериментов (для 26 пациентов) по одноосному сжатию удаленных в ходе эндартерэктомии атеросклеротических бляшек были определены модули Юнга рассматриваемых образцов, после чего для каждой бляшки по компьютерной томограмме определялось среднее значение чисел Хаунсфилда. На основе полученных данных строилась регрессионная зависимость между модулями Юнга и числами Хаунсфилда. Полученная регрессионная зависимость позволяет определять механические характеристики отдельных структурных элементов бляшек по КТ и использовать их при биомеханическом моделировании для оценки риска отрыва и дальнейшего тромбообразования.

Ключевые слова: модуль упругости, числа Хаунсфилда, атеросклероз, бляшка, статистика, регрессия.

Доль Александр Викторович, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник учебной лаборатории цифровых медицинских технологий; e-mail: dolav86@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0001-5842-1615>; AuthorID: 601135

Михин Михаил Николаевич, кандидат физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой математических и естественнонаучных дисциплин; e-mail: mmikhin@inbox.ru; AuthorID: 493518



для цитирования: Доль А. В., Михин М. Н. Регрессионные модели биомеханики атеросклеротических бляшек и их статистическая оптимизация // Вестник Чувашского государственного педагогического университета им. И.Я. Яковлева. Серия: Механика предельного состояния. 2025. № 1(63). С. 29–39. DOI: 10.37972/chgpu.2025.63.1.011. EDN: RNUJXW

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0).

A. V. Dol¹, M. N. Mikhin²

REGRESSION MODELS OF ATHEROSCLEROTIC PLAQUE BIOMECHANICS AND THEIR STATISTICAL OPTIMISATION

¹*Saratov State University, Saratov, Russia*

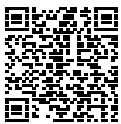
²*Russian State University for the Humanities, Domodedovo, Russia*

Abstract. The paper addresses a number of issues related to the study of carotid artery stenosis. To assess the risk of plaque detachment by biomechanical methods, it is necessary to know the elastic moduli of atherosclerotic plaque components. They can be determined in vivo from the value of the Hounsfield units (HU) on a computed tomography (CT) scan. In a series of experiments (26 patients), the Young's moduli of the specimens considered were determined by uniaxial compression of atherosclerotic plaques removed during endarterectomy, and then the average Hounsfield unit for each plaque was determined on CT. A regression relationship between Young's modulus and Hounsfield units was constructed from the data obtained. The obtained regression relationship allows us to determine the mechanical properties of individual structural elements of plaques by CT and use them in biomechanical modelling to assess the risk of detachment and further thrombosis.

Keywords: elastic modulus, Hounsfield units, atherosclerosis, plaque, statistics, regression.

Alexander V. Dol, PhD in Physics and Mathematics; **e-mail:** dolav86@yandex.ru;
<https://orcid.org/0000-0001-5842-1615>; AuthorID: 601135

Mikhail N. Mikhin, PhD in Physics and Mathematics; **e-mail:** mmikhin@inbox.ru;
AuthorID: 493518



to cite this article: Dol A. V., Mikhin M. N. Regression models of atherosclerotic plaque biomechanics and their statistical optimisation // Vestn. Chuvash. Gos. Ped. Univ. im. I.Ya. Yakovleva Ser.: Mekh. Pred. Sost. 2025. No 1(63). p. 29–39. DOI: 10.37972/chgpu.2025.63.1.011

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC-BY 4.0)

1. Введение. По данным Министерства здравоохранения РФ, на десять тысяч человек населения первичная регистрация случаев заболевания сердечно-сосудистой системы составляет около 312-ти единиц [1, 2]. При этом по данным исследователей из Центрального научно-исследовательского института организации и информатизации здравоохранения, смертность от болезней системы кровообращения составляет 28% у мужчин и 31% у женщин [3].

Стеноз сонных артерий, обусловленный атеросклеротическим поражением, является одной из самых распространенных патологий сосудов шеи, и служит одним из факторов возникновения сопутствующих патологий, таких как аневризмы сосудов головного мозга и церебральной недостаточности [4–7]. При этом одним из важных аспектов прогнозирования возникновения осложнений является оценка риска отрыва атеросклеротической бляшки с последующим образованием тромба и закупоркой сосудов, лежащих выше по артериальному руслу, что, в свою очередь, может приводить к транзиторно-ишемическим атакам или ишемическому инсульту [8, 9]. В клинике стабильность бляшки определяется на основе данных о ее составе и примерной плотности компонентов, которые могут оцениваться в ходе ультразвукового исследования (УЗИ) [10–12]. Как правило, бляшка имеет относительно мягкую липидную составляющую, близкую по плотности к артериальной стенке, а также плотное и жесткое кальцинированное ядро. Для оценки риска отрыва бляшки методами биомеханики необходимо знать модули упругости компонентов атеросклеротических бляшек. *In vivo* они могут определяться на основе значения чисел Хаунсфилда (*HU*) на компьютерной томограмме (КТ): этот параметр определяется по оттенку серого цвета и характеризует плотность тканей, при этом уже существуют работы с построенными регрессионными зависимостями модулей Юнга (*E*) от *HU* [13]. Чтобы построить аналогичную зависимость, необходимо провести серию экспериментов на одноосное сжатие атеросклеротических бляшек с целью определения их модуля Юнга, после чего проанализировать КТ и вычислить средние значения *HU* для соответствующих компонентов.

Целью данной работы является построение регрессионной зависимости между модулями Юнга отдельных компонентов атеросклеротических бляшек и значениями чисел Хаунсфилда.

2. Материалы и методы. В ФГБУ “Российский научный центр радиологии и хирургических технологий имени академика А.М. Гранова” был проведен ряд экспериментов, направленных на исследование механических характеристик атеросклеротических бляшек разной плотности и локализации. Модуль Юнга отдельных участков бляшек определялся в ходе экспериментов по одноосному сжатию образцов, которые выполнялись не позднее 2 часов после эндартерэктомии (хирургической операции по удалению атеросклеротических бляшек). Все образцы имели форму правильного параллелепипеда или цилиндра с линейным размером в направлении оси сжатия, превышающим характерный размер поперечного сечения не менее, чем в два раза. Скорость нагружения

составляла 2 мм/мин. Модуль Юнга каждого образца определялся по линейному участку кривой “напряжение-деформация” по классической формуле закона Гука для случая одноосного растяжения: $E = \sigma/\varepsilon$.

Для 26 пациентов были получены компьютерные томограммы, по которым в программе просмотра КТ определялись средние значения чисел Хаунсфилда отдельных компонент бляшек в сечениях, соответствующих разрезу сосуда, пораженного атеросклерозом.

На рис. 1 приведена характерная картина измерения чисел Хаунсфилда в кальцинированной бляшке.



Рис. 1. Результат измерения чисел Хаунсфилда

3. Построение регрессионной модели. Полученные значения модулей Юнга и чисел Хаунсфилда для 26 пациентов приведены в таблице 1.

Для построения регрессионной модели воспользуемся аппаратом корреляционно-регрессионного анализа [14, 15].

Наличие взаимосвязи выражается величиной коэффициента корреляции, оценкой которого является выборочный коэффициент корреляции:

$$r(HU, E) = \frac{n \sum_{i=1}^n (HU)_i E_i - \sum_{i=1}^n (HU)_i \sum_{i=1}^n E_i}{\sqrt{\left[n \sum_{i=1}^n (HU)_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n (HU)_i \right)^2 \right] \left(n \sum_{i=1}^n E_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n E_i \right)^2 \right)}}$$

где n – количество единиц совокупности (пациентов).

№	Средние HU	Средние модули Юнга, МПА	№	Средние HU	Средние модули Юнга, МПА
1	262	1.200	14	398	1.830
2	373	1.662	15	163	0.110
3	440	1.540	16	128	0.100
4	342	1.440	17	168	0.210
5	177	0.330	18	138	0.170
6	130	0.326	19	150	0.460
7	222	0.415	20	140	0.550
8	179	0.218	21	152	0.550
9	192	0.200	22	165	0.650
10	180	0.175	23	159	0.440
11	169	0.190	24	295	0.890
12	230	0.827	25	364	1.130
13	240	0.860	26	344	1.010

Таблица 1. Данные по модулям Юнга и числам Хаунсфилда

В нашем случае $r(HU, E) = 0.9057$, что согласно шкале Чеддока, свидетельствует о весьма высокой зависимости между числами Хаунсфилда HU и модулями Юнга E [16].

Выборочный коэффициент корреляции, как и любая выборочная статистическая величина, не может рассматриваться как истинная (теоретическая) величина, так как является его точечной оценкой (т.е. функцией, зависящей от выборки). Это требует проверки выборочного коэффициента корреляции на достоверность. Для проверки выборочного коэффициента корреляции на значимость применяется критерий Стьюдента, основанный на t -статистике [14]

$$t = \frac{r(HU, E)}{\sqrt{1 - r^2(HU, E)}} \sqrt{n - 2}. \quad (1)$$

Используя t -статистику (1), вычисляем расчетное значение критерия $t_{\text{расч}} = 10.47$. Далее расчетное значение критерия сравнивается с критическим (теоретическим) значением $t_{\text{кр}} = t(\alpha, v)$ (где α – заданный уровень значимости, $v = n - 2$ число степеней свободы). Для уровня значимости $\alpha = 0.05$ получим

$$t_{\text{кр}} = t(\alpha, v) = t(0.05, 24) = 2.064.$$

Учитывая выполнение условия $t_{\text{расч}} > t_{\text{кр}}$, с вероятностью $\gamma = 0.95$ можно гарантировать наличие линейной взаимосвязи между числами Хаунсфилда HU и модулями Юнга E .

Наряду с линейной регрессионной моделью построим, используя метод наименьших квадратов, другие известные регрессионные модели:

$$\begin{aligned}\tilde{E}_{\text{лин}} &= 0.00503HU - 0.46819, \\ \tilde{E}_{\text{СТ}} &= 0.000025 (HU)^{1.8437}, \\ \tilde{E}_{\text{ЛОГ}} &= 1.20932 \ln(HU) - 5.7978, \\ \tilde{E}_{\text{ГИП}} &= 1.9671 - \frac{255.4826}{HU}, \\ \tilde{E}_{\text{КВ}} &= 0.000002 (HU)^2 + 0.004HU - 0.3528, \\ \tilde{E}_{\text{ПОК}} &= 0.0883 \cdot 1.0075^{HU}.\end{aligned}$$

Тесноту взаимосвязи между числами Хаунсфилда HU и модулями Юнга E , оценивает коэффициент (индекс) детерминации R^2 :

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (E_i - \tilde{E}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (E_i - \bar{E})^2},$$

где E_i – истинные (исходные) значения модулей Юнга, $\tilde{E}_i$ – расчетные значения модулей Юнга, $\bar{E}$ – выборочная средняя (средняя арифметическая) чисел Хаунсфилда.

Для оптимальной регрессионной модели величина суммы квадратов отклонений истинных значений E_i от расчетных значений $\tilde{E}_i$, должна быть минимальной, т.е. удовлетворять условию

$$Q_{\text{opt}} = \sum_{i=1}^n (E_i - \tilde{E}_i)^2 \rightarrow \min.$$

Еще одним коэффициентом, дающим характеристику соответствия расчетных моделей реальным, является средняя ошибка аппроксимации, для расчета которой воспользуемся формулой [16]

$$\bar{A} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{E_i - \tilde{E}_i}{E_i} \right| \cdot 100\%.$$

В таблице 2 для каждой регрессионной модели представлены коэффициент детерминации R^2 , средняя ошибка аппроксимации $\bar{A}$ и сумма Q квадратов отклонений истинных значений E_i от расчетных значений $\tilde{E}_i$.

Исходя из полученных результатов, линейную и квадратическую регрессионные модели следует признать оптимальными. Сделаем выбор в пользу линейную модель, которая в использовании гораздо проще, чем квадратическая модель.

Следует обратить внимание на большие значения средней ошибки аппроксимации для каждой регрессионной модели. В каждом случае значение средней ошибки аппроксимации превышает допустимый предел 10% [17]. Очевидно, что

Регрессионная модель	Коэффициент детерминации	Сумма квадратов отклонений истинных от расчетных значений	Средняя ошибка аппроксимации
Линейная модель, $\tilde{E}_{\text{лин}}$	$R^2_{\text{лин}} = 0.820$	$Q_{\text{лин}} = 1.226$	$\bar{A}_{\text{лин}} = 54.6\%$
Степенная модель, $\tilde{E}_{\text{ст}}$	$R^2_{\text{ст}} = 0.653$	$Q_{\text{ст}} = 1.330$	$\bar{A}_{\text{ст}} = 46.7\%$
Логарифмическая модель, $\tilde{E}_{\text{лог}}$	$R^2_{\text{лог}} = 0.789$	$Q_{\text{лог}} = 1.441$	$\bar{A}_{\text{лог}} = 58.1\%$
Гиперболическая модель, $\tilde{E}_{\text{гип}}$	$R^2_{\text{гип}} = 0.718$	$Q_{\text{гип}} = 1.927$	$\bar{A}_{\text{гип}} = 72.6\%$
Квадратическая модель, $\tilde{E}_{\text{кв}}$	$R^2_{\text{кв}} = 0.821$	$Q_{\text{кв}} = 1.222$	$\bar{A}_{\text{кв}} = 54.8\%$
Показательная модель, $\tilde{E}_{\text{пок}}$	$R^2_{\text{пок}} = 0.648$	$Q_{\text{пок}} = 1.980$	$\bar{A}_{\text{пок}} = 47.4\%$

Таблица 2. Коэффициенты детерминации и сумма квадратов отклонений истинных от расчетных значений регрессионных моделей.

этому есть простое объяснение. В формуле для расчета средней ошибки аппроксимации присутствуют значения E_i , близкие к нулю, что сильно завышает значение $\bar{A}$, вне зависимости от адекватности построенной модели.

При этом, в случае линейной модели, сделав замену $Y=E+2$ (см. [15]), получим линейное уравнение регрессии:

$$\tilde{Y} = 0.00503HU + 1.53181,$$

для которого средняя ошибка аппроксимации уже менее 10%, т.е. $\bar{A}_{\text{лин}} = 7.7\%$. Далее, произведя обратную замену $E=Y-2$, получим прежнее уравнение

$$\tilde{E}_{\text{лин}} = 0.00503HU - 0.46819.$$

4. Проверка значимости уравнения регрессии. Проверим значимость линейной регрессионной модели

$$\tilde{E}_{\text{лин}} = a_0 + a_1HU = -0.4682 + 0.00503HU.$$

Согласно F -критерия Фишера нужно найти $F_{\text{расч}}$ расчетное значение критерия и $F_{\text{кр}}$ критическое значение при уровне значимости α и числе степеней свободы $k_2 = n - 2$ и $k_1 = 1$. Если выполняется неравенство

$$F_{\text{расч}} > F_{\text{кр}} = F(\alpha, 1, n - 2), \quad (2)$$

то уравнение регрессии является значимым.

Расчетное значение критерия

$$F_{\text{рас}} = \frac{R^2}{1 - R^2} (n - 2) = 109.6.$$

Критическое значение критерия

$$F_{\text{кр}} = F(\alpha, 1, n - 2) = F(0,05, 1, 24) = 4.54.$$

На основании (2) заключаем, что линейное уравнение регрессии является значимым.

В парной линейной регрессии оценивается значимость не только уравнения в целом, но и отдельных его параметров. С этой целью по каждому из параметров определяется его стандартные ошибки параметров m_1 и m_0 :

$$\begin{aligned} m_0 &= \sqrt{\frac{1}{n-2} \sum_{i=1}^n (E_i - \tilde{E}_i)^2 \frac{\sum_{i=1}^n (HU)_i^2}{n \sum_{i=1}^n ((HU)_i - \overline{HU})^2}} = 0.11762, \\ m_1 &= \sqrt{\frac{1}{n-2} \frac{\sum_{i=1}^n (E_i - \tilde{E}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (HU_i - \overline{HU})^2}} = 0.00048. \end{aligned} \quad (3)$$

Используя стандартные ошибки (3) вычисляются t -статистики, т.е. определяется фактическое значение t -критерия Стьюдента:

$$\begin{aligned} t_0 &= \frac{|a_0|}{m_0} = \frac{0.46819}{0.11762} = 3.98061, \\ t_1 &= \frac{|a_1|}{m_1} = \frac{0.00503}{0.00048} = 10.46911. \end{aligned}$$

Расчетные значения t -статистик превосходят критическое значение:

$$t_0 = 3.98061 > t_{\text{кр}} = 2.064; \quad t_1 = 10.46911 > t_{\text{кр}} = 2.064;$$

поэтому коэффициенты a_1 и a_0 статистически значимы.

5. Построение доверительных интервалов. Полученное уравнение

$$\tilde{E}_{\text{лин}} = a_0 + a_1 HU = -0.4682 + 0.005 HU,$$

является оценкой истинного (генерального) уравнения регрессии

$$E = A_0 + A_1 HU.$$

Поэтому целесообразно указать интервальные оценки (доверительные интервалы) параметров A_0 и A_1 .

Доверительные интервал для параметров линейного уравнения регрессии

$$\begin{aligned} A_0 &\in (a_0 - m_0 t_{\text{кр}}; a_0 + m_0 t_{\text{кр}}), \\ A_1 &\in (a_1 - m_1 t_{\text{кр}}; a_1 + m_1 t_{\text{кр}}). \end{aligned}$$

С учетом значений (3) стандартных ошибок параметров m_1 и m_0 , при уровне значимости $\alpha = 0,05$ доверительные интервалы будут иметь вид:

$$\begin{aligned} A_0 &\in (-0.71094; -0.22544), \\ A_1 &\in (0.004035; 0.006017). \end{aligned}$$

Это означает, что с доверительной вероятностью $\gamma = 0.95$ можно утверждать, что при увеличении HU (среднего числа Хаунсфилда) на единицу средний модуль Юнга E изменится в пределах от 0.004035 МПа до 0.006017 МПа.

6. Заключение и выводы.

- Построена регрессионная зависимость, связывающая значения чисел Хаунсфилда и модулей Юнга атеросклеротических бляшек.
- Для параметров регрессионной модели, построены доверительные интервалы, что позволяет указать диапазон изменения модулей Юнга при изменении среднего числа Хаунсфилда.
- Полученная регрессионная зависимость позволяет определять механические характеристики отдельных структурных элементов бляшки по КТ. Т.е. для конкретного пациента при необходимости уточняющего расчета могут быть определены модули Юнга всех участков бляшки.

ДОПОЛНИТЕЛЬНО

Вклад авторов. Вклад авторов равноценен.

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Источник финансирования. Исследование выполнено в рамках Государственного задания, проект FSRR-2023-0009.

ADDITIONAL INFORMATION

Authors' contribution. The authors' contributions are equal.

Competing interests. The authors declare that they have no competing interests.

Funding. The study was conducted within the framework of the State Assignment, project FSRR-2023-0009.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] High-Resolution CT Imaging of Carotid Artery Atherosclerotic Plaques / M. Wintermark [et al.] // American Journal of Neuroradiology. 2008. Vol. 29, no. 5. P. 875–882.
- [2] Здравоохранение в России / С. Ю. Никитина [и др.]. Москва : Росстат, 2019. С. 170.
- [3] Воробьев Р. В., Короткова А. В. Аналитический обзор проблемы здорового старения в странах Европейского региона ВОЗ и Российской Федерации // Социальные аспекты здоровья населения. 2016. № 5. С. 1–20.
- [4] Li Y., Payner T. D., Cohen-Gadol A. A. Spontaneous regression of an intracranial aneurysm after carotid endarterectomy // Surgical Neurology International. 2012. Vol. 3. P. 66.
- [5] Khan U. A., Shalhoub J., Davies A. H. Risk of intracerebral aneurysm rupture during carotid revascularization // Journal of Vascular Surgery. 2012. Vol. 56, no. 6. P. 1739–1747.
- [6] Small, unruptured intracranial aneurysms and management of symptomatic carotid artery stenosis. North American Symptomatic Carotid Endarterectomy Trial Group / L. J. Kappelle [et al.] // Neurology. 2000. Vol. 55. P. 307–309.
- [7] Российский консенсус по диагностике и лечению пациентов со стенозом сонных артерий / М. А. Чернявский [и др.] // Российский кардиологический журнал. 2022. Т. 27, № 11. С. 5284.
- [8] Численное исследование влияния стеноза внутренних сонных артерий на гемодинамику артерий Виллизиева круга / А. В. Доль [и др.] // Российский журнал биомеханики. 2021. Т. 25, № 4. С. 356–368.

- [9] Иванов Д. В., Доль А. В., Кузык Ю. И. Биомеханические основы прогнозирования протекания каротидного атеросклероза // Российский журнал биомеханики. 2017. Т. 21, № 1. С. 29–40.
- [10] Evaluating the impact of calcification on plaque vulnerability from the aspect of mechanical interaction between blood flow and artery based on MRI / J. Benitez [et al.] // Annals of Biomedical Engineering. 2020. Vol. 49. P. 1169–1182.
- [11] A convolutional neural network for automatic characterization of plaque composition in carotid ultrasound / K. Lekadir [et al.] // IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics. 2017. Vol. 21, no. 1. P. 48–55.
- [12] Lou Z., Yang J., Tang L. Shear Wave Elastography Imaging for the Features of Symptomatic Carotid Plaques: A Feasibility Study // Journal of Ultrasound in Medicine. 2017. Vol. 36, no. 6. P. 1213–1223.
- [13] Constructing the dependence between the Young's modulus value and the Hounsfield units of spongy tissue of human femoral heads / L. V. Bessonov [et al.] // Izvestiya of Saratov University. Mathematics. Mechanics. Informatics. 2021. Vol. 21, no. 2. P. 182–193.
- [14] Мхитарян В. С. Эконометрика. Москва : Проспект, 2015. С. 384.
- [15] Айвазян С. А., Мхитарян В. С. Прикладная статистика и основы эконометрики. Москва : Юнити, 1998. С. 1022.
- [16] Chaddock R. E. Principles and Methods of Statistics. Boston, New York, etc., 1925. P. 471.
- [17] Эконометрика: учебник для вузов / Под ред. И. И. Елисеева, др. Москва : Издательство Юрайт, 2022. С. 449.

REFERENCES

- [1] High-Resolution CT Imaging of Carotid Artery Atherosclerotic Plaques / M. Wintermark [et al.] // American Journal of Neuroradiology. 2008. Vol. 29, no. 5. P. 875–882.
- [2] Health Care in Russia / S. Y. Nikitina [et al.]. Moscow : Rosstat, 2019. P. 170. (In Russian).
- [3] Vorobyev R. V., Korotkova A. V. Analytical Review of the Problem of Healthy Ageing in the Countries of the European Region and the Russian Federation // Social Aspects of Public Health. 2016. no. 5. P. 1–20. (In Russian).
- [4] Li Y., Payner T. D., Cohen-Gadol A. A. Spontaneous Regression of an Intracranial Aneurysm after Carotid Endarterectomy // Surgical Neurology International. 2012. Vol. 3. P. 66.
- [5] Khan U. A., Shalhoub J., Davies A. H. Risk of Intracerebral Aneurysm Rupture During Carotid Revascularization // Journal of Vascular Surgery. 2012. Vol. 56, no. 6. P. 1739–1747.
- [6] Small, Unruptured Intracranial Aneurysms and Management of Symptomatic Carotid Artery Stenosis. North American Symptomatic Carotid Endarterectomy Trial Group / L. J. Kappelle [et al.] // Neurology. 2000. Vol. 55. P. 307–309.
- [7] Russian Consensus on the Diagnosis and Treatment of Patients with Carotid Artery Stenosis / M. A. Chernyavsky [et al.] // Russian Cardiological Journal. 2022. Vol. 27, no. 11. P. 5284. (In Russian).
- [8] Numerical Study of the Effect of Internal Carotid Artery Stenosis on the Haemodynamics of the Villous Circle Arteries / A. V. Dol [et al.] // Russian Journal of Biomechanics. 2021. Vol. 25, no. 4. P. 356–368. (In Russian).
- [9] Ivanov D. V., Dol A. V., Kuzyk Y. I. Biomechanical Basis for Predicting the Course of Carotid Atherosclerosis // Russian Journal of Biomechanics. 2017. Vol. 21, no. 1. P. 29–40. (In Russian).
- [10] Evaluating the Impact of Calcification on Plaque Vulnerability from the Aspect of Mechanical Interaction Between Blood Flow and Artery Based on MRI / J. Benitez [et al.] // Annals of Biomedical Engineering. 2020. Vol. 49. P. 1169–1182.

- [11] A Convolutional Neural Network for Automatic Characterization of Plaque Composition in Carotid Ultrasound / K. Lekadir [et al.] // IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics. 2017. Vol. 21, no. 1. P. 48–55.
- [12] Lou Z., Yang J., Tang L. Shear Wave Elastography Imaging for the Features of Symptomatic Carotid Plaques: A Feasibility Study // Journal of Ultrasound in Medicine. 2017. Vol. 36, no. 6. P. 1213–1223.
- [13] Constructing the Dependence Between the Young's Modulus Value and the Hounsfield Units of Spongy Tissue of Human Femoral Heads / L. V. Bessonov [et al.] // Izvestiya of Saratov University. Mathematics. Mechanics. Informatics. 2021. Vol. 21, no. 2. P. 182–193.
- [14] Mkhitarian V. S. Econometrics. Moscow : Prospect, 2015. P. 384. (In Russian).
- [15] Aivazyan S. A., Mkhitarian V. S. Applied Statistics and Fundamentals of Econometrics. Moscow : Unity, 1998. P. 1022. (In Russian).
- [16] Chaddock R. E. Principles and Methods of Statistics. Boston, New York, etc., 1925. P. 471.
- [17] Econometrics: Textbook for Universities / Ed. by I. I. Eliseeva [et al.]. Moscow : Yurait Publishing House, 2022. P. 449. (In Russian).