

АНАЛИЗ ПЕРСПЕКТИВНЫХ НАПРАВЛЕНИЙ В ПРОЕКТИРОВАНИИ ПРОТЕЗОВ СТОПЫ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

С.Л. Сашенков¹, sashensl@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6007-1041>
А.Н. Панасенко², a_panasenko@list.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1125-3946>
А.А. Епишева³, epishevaaa@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3225-0373>
Ф.В. Меркульев³, fvmerkulyev@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0001-3160-577X>
Я.В. Бурнашов³, yaroslav.burnashov1337@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8978-5526>
А.А. Пискаев³, aleksander.piskaev@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2199-6893>

¹ Южно-Уральский государственный медицинский университет, Челябинск, Россия

² Иркутский государственный университет путей сообщения, Иркутск, Россия

³ Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

Аннотация. Цель: определение перспективных направлений в проектировании протезов стопы нового поколения. **Материалы и методы.** С использованием баз данных Scopus, Web of Science и Google Scholar проведен анализ и обобщение современных подходов к проектированию протезов голени. Акцент был сделан на применяемые технологии изготовления, материалы и научно-технологические подходы, приводящие к снижению стоимости конечного изделия при сохранении высоких потребительских свойств. **Результаты.** Разработанные ранее 2000-х годов протезы стопы SACH (Solid Ankle Cushion Heel) предназначались преимущественно для восстановления вертикальной устойчивости и базовой ходьбы и представляли собой простейшую конструкцию, изготовленную из дерева или пластика, окруженную сжимаемым пеноуретаном. Эволюцией протезов стопы SACH являются протезы по технологии Energy-Storing-and-Returning (ESR), подразделяемые на Early ESR, Advanced ESR и Articulated ESR. С начала 2000-х годов начались разработки бионических протезов (bionic feet) или активных и гибридных адаптивных протезов стопы. Наиболее перспективным, на наш взгляд, является дальнейшее совершенствование протезов (ESR) с применением различных подходов – внесение конструктивных изменений (добавление имитации суставов пальцев стопы), поиск недорогих альтернатив углепластику (трехмерная печать нейлоновой нитью, армированной углеволокном), возможность индивидуализации протеза (новая методология проектирования с одним (one-keel) или несколькими киями (Multi-Keel)). **Заключение.** Наиболее перспективным направлением улучшения потребительских свойств и снижения стоимости протезов голени является разработка новых подходов к их проектированию. Научно-технологический задел должен формироваться, исходя из принципов персонализированной медицины с применением композитных материалов, обеспечивающих близкие по параметрам функции здоровой стопы.

Ключевые слова: протез голени, композитный материал, проектирование, углеволокно, нейлон

Благодарности. Работа выполнена в рамках госзадания Министерства науки и высшего образования РФ FENU-2023-0017 (2023217ГЗ).

Для цитирования: Анализ перспективных направлений в проектировании протезов стопы нового поколения / С.Л. Сашенков, А.Н. Панасенко, А.А. Епишева и др. // Человек. Спорт. Медицина. 2023. Т. 23, № 4. С. 155–162. DOI: 10.14529/hsm230419

ANALYSIS OF OPPORTUNITIES FOR THE DEVELOPMENT OF A BRAND-NEW PROSTHETIC FOOT

S.L. Sashenkov¹, sashensl@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6007-1041>

A.N. Panasenko², a_panasenko@list.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1125-3946>

A.A. Episheva³, epishevaaa@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3225-0373>

F.V. Merkulyev³, fvmerkulyev@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0001-3160-577X>

Ya.V. Burnashov³, yaroslav.burnashov1337@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8978-5526>

A.A. Piskaev³, aleksander.piskaev@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2199-6893>

¹ South Ural State Medical University, Chelyabinsk, Russia

² Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Russia

³ South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

Abstract. Aim. To identify opportunities for the development of a brand-new prosthetic foot. **Materials and methods.** Based on the data from Scopus, Web of Science, and Google Scholar, the paper provides a review of modern approaches to prosthetic design. Attention was focused on production technologies, materials, and scientific approaches that reduce the price of the finished product while preserving its consumer properties. **Results.** Before 2000, the SACH foot (Solid Ankle Cushion Heel) was mainly used for restoring vertical balance and basic gait patterns and was provided as a simple construction made of wood or plastic and surrounded by compressed urethane foam. The SACH technology evolved into ESR (Energy-Storing-and-Returning), including early ESR, advanced ESR, and articulated ESR. Starting in the 00s, bionic feet and active/hybrid adaptive foot prostheses have been actively developed. The most promising field of study, in our opinion, is further improvement of ESR prostheses through constructive changes (such as imitation of toes), the search for low-cost alternatives to carbon-fiber-reinforced polymers (nylon 3D printing with carbon fiber-reinforced nylon), prosthesis customization (one-keel or multi-keel prostheses). **Conclusion.** The most promising way to improve consumer properties and reduce costs is through the development of new approaches to prosthetic design. Scientific and technological foundations should be formed with respect to the principles of personified medicine and using composite materials that provide parameters close to a healthy foot.

Keywords: ankle prosthesis, composite material, design, carbon fibers, nylon

Acknowledgements. This work was accomplished as part of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation FENU-2023-0017 (2023217Г3).

For citation: Sashenkov S.L., Panasenko A.N., Episheva A.A., Merkulyev F.V., Burnashov Ya.V. Analysis of opportunities for the development of a brand-new prosthetic foot. *Human. Sport. Medicine.* 2023;23(4):155–162. (In Russ.) DOI: 10.14529/hsm230419

Введение. Люди с ампутациями нижних конечностей сталкиваются со значительными трудностями при повседневном передвижении. Это нарушение по разным данным затрагивает от 37 до 55,7 млн человек во всем мире, причем наибольшее количество ампутаций приходится на Азию [4]. Высокая социальная значимость определяет и значительный научный интерес к разработке новых технологий и подходов к проектированию протезов конечностей. Так, по данным Shi Q-Q в период с 1 января 2000 г. по 31 октября 2022 г. было опубликовано 1827 публикаций по данной тематике, причем количество статей удвоилось в период с 2000 по 2008 г., в период с 2009 по 2022 г. наблюдался их стабильный рост [11].

Цель исследования – определение перспективных направлений в проектировании протезов стопы нового поколения.

Материалы и методы. С использованием баз данных Scopus, Web of Science и Google Scholar нами проведен анализ и обобщение современных подходов к проектированию протезов голени. Акцент был сделан на применяемые технологии изготовления, материалы и научно-технологические подходы, приводящие к снижению стоимости конечного изделия при сохранении высоких потребительских свойств.

Результаты. Стопа человека состоит из сложных суставов, что затрудняет разработку протеза стопы, который мог бы имитировать

биомеханику голеностопного сустава. Она состоит из трех сводов: поперечного свода, продольного свода (латерального и медиального), содержит сухожилия, связки и мышцы, обеспечивая ее функциональность [6, 12].

Разработанные ранее 2000-х годов протезы стопы SACH (Solid Ankle Cushion Heel) предназначались преимущественно для восстановления вертикальной устойчивости и базовой ходьбы и представляли собой простейшую конструкцию, изготовленную из дерева или пластика, окруженную сжимаемым пеноуретаном (рис. 1). Стопа SACH является наиболее часто используемым традиционным протезом стопы, который является отраслевым стандартом с 1980 года. Применение стоп SACH имеет ряд ограничений, может быть рекомендовано с ограниченной двигательной активностью, но она все еще используется из-за ее долговечности, доступности, меньшей стоимости и возможности использования [8].

Эволюцией протезов стопы SACH являются протезы по технологии Energy-Storing-and-Returning (ESR) (рис. 2–4), которые по данным Chiriас O.A. и Bucur D. можно подразделить на Early ESR, Advanced ESR и Articulated ESR [3].

Протезы SACH и ESR позволяют использовать только энергию, генерируемую самим человеком с ампутированной конечностью, чтобы имитировать функции здоровой стопы и голеностопного сустава.

С начала 2000-х годов начались активные разработки бионических протезов (bionic feet) (рис. 5) или активных и гибридных адаптивных протезов стопы.

Аппаратную конструкцию адаптивных протезов стопы можно разделить на несколько категорий, которые классифицируются по способу приведения в действие, степени свободы и типам приводов, на основе метода передачи энергии, метода регенерации энергии и метода крепления к остаточной конечности [12]:

1. Принцип срабатывания – в зависимости от метода источника энергии. В отличие от пассивных протезов активные протезы приводятся в действие с помощью внешних источников питания. Большинство современных адаптивных протезов стопы сочетают как с пассивными, так и с активными суставами, что повышает эффективность использования энергии во время ходьбы через пассивные суставы.

2. Количество суставов с внешним приводом.



Рис. 1. Конструкции протезов стоп, изготовленных по технологии SACH (Solid Ankle Cushion Heel)
Fig. 1. SACH foot



Рис. 2. Конструкции протезов стоп, изготовленных по технологии Early ESR (Early Energy-Storing-and-Returning)
Fig. 2. Early ESR foot



Рис. 3. Конструкции протезов стоп, изготовленных по технологии Advanced ESR (Advanced Energy-Storing-and-Returning)
Fig. 3. Advanced ESR foot



Рис. 4. Конструкции протезов стоп, изготовленных по технологии Articulated ESR (Articulated Energy-Storing-and-Returning)
Fig. 4. Articulated ESR foot



Рис. 5. Конструкции протезов стоп, изготовленных по технологии бионических протезов или активных и гибридных адаптивных протезов стопы.
Fig. 5. Bionic feet or active/hybrid adaptive foot prostheses

3. Типы приводов – бесщеточные двигатели, сервоприводы и т. п.

4. Принцип передачи энергии – использование зубчатых, цепных, ременных передач, рычажных механизмов, тросовых приводов.

5. Принцип регенерации энергии – наличие или отсутствие механизма рекуперации

энергии в различных технических комбинациях.

6. Способ крепления – использование соединения по типу «лодыжка – стопа» или пирамидального адаптера.

Несмотря на развитие конструкции протезов стоп, для восстановления подвижности

после перенесенной ампутации люди чаще всего используют пассивные протезы стоп, такие как протезы ESR или более распространенные и традиционные протезы SACH. Стопы SACH остаются наиболее широко используемыми и распространенными протезами в мире благодаря простоте изготовления и низкой стоимости [7]. Например, реализуемый проект Open-source Leg [1] создания бионической ноги имеет открытый исходный код, содержит интегрированное аппаратное решение с программным обеспечением для низкоуровневого управления и связи с системами управления (рис. 6). Однако даже в этом случае стоимость составляет 19 тыс. долларов США, что недоступно для большинства людей.

Наиболее перспективным, на наш взгляд, является дальнейшее совершенствование протезов с накоплением и возвратом энергии (ESR), так как было доказано, что они обеспечивают более высокие потребительские преимущества и повышают эффективность ходьбы по сравнению с традиционными стопами SACH [2, 14].

Существуют различные подходы к совершенствованию протезов ESR – внесение конструктивных изменений, поиск недорогих альтернатив углепластику с возможностью индивидуализации протеза. McDonald с соавт. предложили изменение в конструкцию к пассивному протезу стопы, заключающееся в

добавлении имитации суставов пальцев [5] (рис. 7).

Исследование данной конструкции показало, что во время ходьбы на беговой дорожке у участников наблюдалось снижение энергозатрат в толчковой фазе на 10–16 % по сравнению с обычно используемым протезом ESR.

V. Prost с соавт. предложили иной подход к созданию индивидуального, недорогого и массового протеза стопы ESR, обеспечивающего здоровую походку и качество жизни инвалидов в странах с низким и средним уровнем дохода [9]. Данный подход базируется на новой методологии проектирования – «модель ошибки траектории голени» (LLTE) – это математическая модель эталонного набора кинетических и кинематических данных ходьбы, которая масштабируется в соответствии с характеристиками тела человека (массой, ростом и длиной стопы). На основании расчетов появляется возможность детерминированно проектировать протезы для конкретного пользователя путем количественной связи механических характеристик протеза стопы с походкой человека с ампутированной конечностью (рис. 8). Высота протеза стопы была выбрана таким образом, что его высота и длина культы голени оставалась ниже длины голени испытуемого.



Механически обработанные детали (Great Light)	~9000\$
Приводы и энкодеры (Dephy Inc)	~6900\$
Ремни (SDPSI)	~100
Подшипники и крепежные детали (McMaster-Carr)	\$ ~800
Валы (Misumi)	\$ ~20\$
Угловые подшипники (Motion Industries)	~700
Батареи и корпус (Amazon)	\$ ~400
Магниты (K&J)	\$ ~100
Стоимость доставки	\$ ~500
Общая стоимость	\$ ~19000\$

Рис. 6. Проект создания бионической ноги с открытым исходным кодом Open-source Leg

Fig. 6. Bionic foot – open-source leg design

Дальнейшие исследования V. Prost с соавт. показали, что данные протезы (one-keel, однокилевые) не обеспечивают необходимой долговечности [10]. На основании «модели ошибки траектории голени» (LLTE) они разработали параметрическую модель стопы с несколькими киями (Multi-Keel) (рис. 9).

В обоих случаях материалом протезов был выбран нейлон 6/6 из-за его низкой стоимости и высокой энергии деформации (плотность $\rho \approx 2,4 \cdot 10^3$ Дж/кг) и простота изготовления. Характеристики материала, включенные в «модель ошибки траектории голени» (LLTE):

- модуль упругости $E = 2,51$ ГПа;
- предел текучести при растяжении $\sigma = 82,7$ МПа;
- модуль упругости при изгибе $E_f = 3,15$ ГПа;
- предел текучести при изгибе $\sigma_f = 92,0$ МПа;
- коэффициент Пуассона $\nu = 0,41$;
- плотность $\rho = 1130$ кг/м³.

Исследование данной конструкции показало, что она на 76 % более эффективна, проходит нагрузочные тестирования на долговечность и экономически является более эффективной.

В исследовании Н.Н. Warder с соавт. [13] был применен метод трехмерной печати протезов голени. Полученная физическая модель из нейлоновой нити армировалась углеволокном для придания ей свойств, характерных для протезов с накоплением и возвратом энергии (ESR) стоимостью более двух тысяч долларов США (рис. 10). Конечная стоимость моделей не превышала 200 долларов США.

По результатам испытаний на сервогидравлической машине Instron 1321 трехмерно напечатанные ступни достигли энергетических профилей, которые были аналогичны, а в некоторых случаях даже предпочтительнее энергетическим профилям Renegade MX. Профили жесткости трехмерно напечатанных ножек широко варьировались и во многом

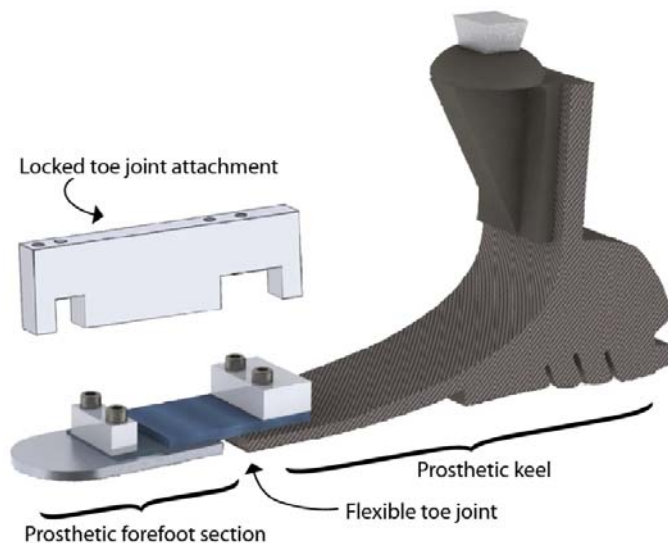


Рис. 7. Пассивный протез стопы с имитацией суставов пальцев
Fig. 7. Passive foot prosthesis with toe joints

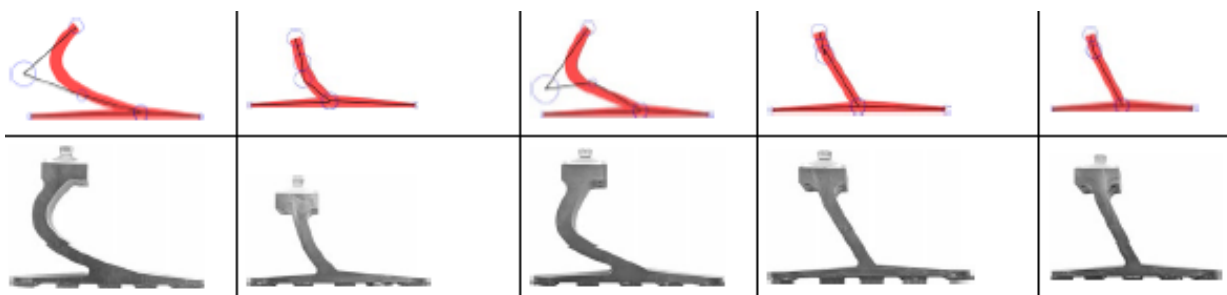


Рис. 8. Пример индивидуального проектирования протеза стопы согласно «модели ошибки траектории голени» (LLTE)
Fig. 8. Customized foot prostheses designed with lower leg trajectory error (LLTE)

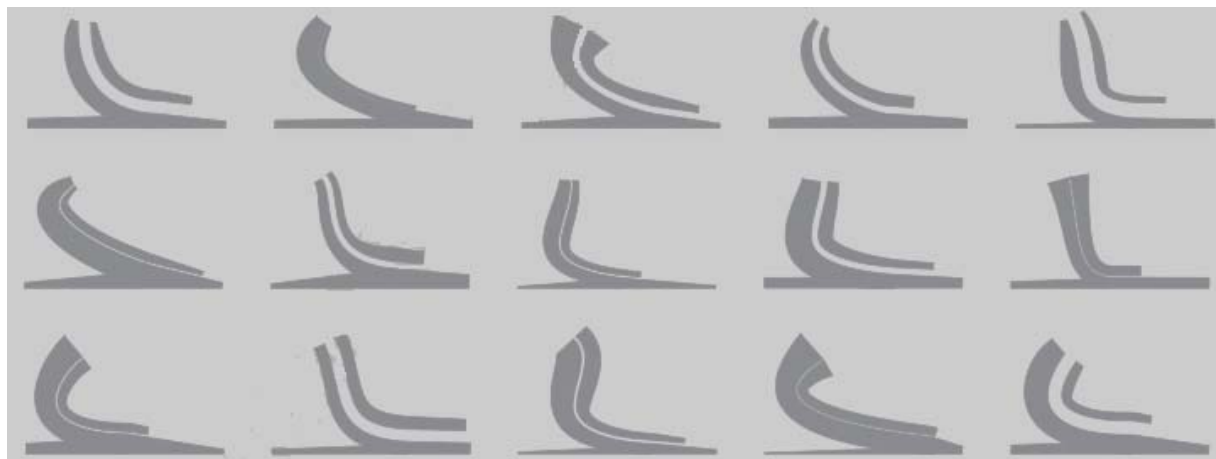


Рис. 9. Пример индивидуального проектирования протеза стопы с несколькими киями (Multi-Keel) согласно «модели ошибки траектории голени» (LLTE)
Fig. 9. Examples of a customized multi-keel prosthesis with LLTE



Рис. 10. Пример применения метода трехмерной печати протезов голени с армированием углеволокном
Fig. 10. Examples of 3D-printed carbon fiber-reinforced prostheses

зависели от конструкции, а также от количества и расположения армирующих волокон.

Заключение. Таким образом, наиболее перспективным направлением улучшения потребительских свойств и снижения стоимости протезов голени является разработка новых

подходов к их проектированию. Научно-технологический задел должен формироваться, исходя из принципов персонализированной медицины с применением композитных материалов, обеспечивающих близкие по параметрам функции здоровой стопы.

Список литературы / References

1. Azocar A.F., Mooney L.M., Duval J.F. et al. Design and Clinical Implementation of an Open-Source Bionic Leg. *Nat Biomedical Eng.*, 2020, no. 4, pp. 941–953. DOI: 10.1038/s41551-020-00619-3
2. Barr A.E. Biomechanical Comparison of the Energy-Storing Capabilities of SACH and Carbon Copy II Prosthetic Feet During the Stance Phase of Gait in a Person with Below-Knee Amputation. *Physical Therapy*, 1992, no. 72, pp. 344–354. DOI: 10.1093/ptj/72.5.344
3. Chiriac O.A., Bucur D. From Conventional Prosthetic Feet to Bionic Feet. A Review. *Proceedings of the International Conference of Mechatronics and Cyber-MixMechatronics*, 2020, vol. 143. DOI: 10.1007/978-3-030-53973-3_14
4. McDonald C.L., Westcott-McCoy S., Weaver M.R. Global Prevalence of Traumatic Non-Fatal Limb Amputation. *Prosthet. Orthot. Int.*, 2021, 0309364620972258.
5. McDonald K.A., Teater R.H., Cruz J.P. et al. Adding a toe Joint to a Prosthesis: Walking Biomechanics, Energetics, and Preference of Individuals with Unilateral Below-Knee Limb Loss. *Science Rep.*, 2021, 1924 p. DOI: 10.1038/s41598-021-81565-1
6. Muscolino J.E. *Kinesiology-E-Book: The Skeletal System and Muscle Function*. Elsevier Health Sciences, 2010.
7. Organization W.H. World Report on Disability: Standards for Prosthetics and Orthotics. *Technical Report*, 2017, 214 p.
8. Ottobock Homepage, Sach Foot. Available at: https://www.ottobock.co.uk/prosthetics/info_for_new_amputees/prosthetic-technologyexplained/about_feet/index.html (accessed 12.05.2020).

9. Prost V., Johnson W.B., Kent J.A. et al. Biomechanical Evaluation Over Level Ground Walking of User-Specific Prosthetic Feet Designed Using the Lower Leg Trajectory Error Framework. *Science Rep.*, 2022, vol. 12, p. 5306. DOI: 10.1038/s41598-022-09114-y

10. Prost V., Peterson H.V., Winter V.A.G. Multi-Keel Passive Prosthetic Foot Design Optimization Using the Lower Leg Trajectory Error Framework. *Journal of Mechanisms and Robotics*, 2023, vol. 15, no. 4, 041001. DOI: 10.1115/1.4055107

11. Shi Q.-Q., Yick K.-L., Wu J. et al. A Scientometric Analysis and Visualization of Prosthetic Foot Research Work: 2000 to 2022. *Bioengineering*, 2023, vol. 10, no. 10, p. 1138. DOI: 10.3390/bioengineering10101138

12. Thilina H.W., Lalitharatne Thilina Dulantha, Gopura R.A.R.C. Adaptive Foot in Lower-Limb Prosthesis. *Journal of Robotics*, 2017, vol. 2017, art. 9618375. DOI: 10.1155/2017/9618375

13. Warder H.H., Fairley I.I.I., Coutts J.K. et al. Examining the Viability of Carbon Fiber Reinforced Three-Dimensionally Printed Prosthetic Feet Created by Composite Filament Fabrication. *Prosthetics and Orthotics International*, 2018, vol. 42, no. 6, pp. 644–651. DOI: 10.1177/0309364618785726

14. Wezenberg D., Cutti A.G., Bruno A. et al. Differentiation between Solid-Ankle Cushioned Heel and Energy Storage and Return Prosthetic Foot Based on Step-to-Step Transition Cost. *Journal Rehabilitation Research Dev.*, 2014, vol. 51, pp. 1579–1590. DOI: 10.1682/JRRD.2014.03.0081

Информация об авторах

Сашенков Сергей Львович, доктор медицинских наук, профессор, заведующий кафедрой нормальной физиологии имени академика Ю.М. Захарова, Южно-Уральский государственный медицинский университет, Челябинск, Россия.

Панасенко Александр Николаевич, доцент кафедры физической культуры и спорта, Иркутский государственный университет путей сообщения, Иркутск, Россия.

Епишева Алина Азатовна, преподаватель кафедры физического воспитания и здоровья, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия.

Меркульев Федор Владимирович, лаборант-исследователь управления научно-исследовательской деятельности, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия.

Бурнашов Ярослав Владимирович, студент кафедры теории и методики физической культуры и спорта, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия.

Пискаев Александр Александрович, аспирант кафедры теории и методики физической культуры и спорта, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия.

Information about the authors

Sergey L. Sashenkov, Doctor of Medical Sciences, Professor, Head of the Academician Zakharov Department of Normal Physiology, South Ural State Medical University, Chelyabinsk, Russia.

Alexander N. Panasenko, Associate Professor of the Department of Physical Education and Sport, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Russia.

Alina A. Episheva, Lecturer, Department of Physical Education and Health, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia.

Fedor V. Merkulyev, Laboratory Assistant, Department of Scientific Research Activities, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia.

Yaroslav V. Burnashov, Undergraduate Student, Department of Theory and Methods of Physical Education and Sport, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia.

Alexander A. Piskaev, Graduate Student of the Department of Theory and Methods of Physical Culture and Sports, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 11.07.2023

The article was submitted 11.07.2023