

КОМПЕНСАТОРНЫЕ ПРОЦЕССЫ У ЛИЦ С ОДНОСТОРОННЕЙ АМПУТАЦИЕЙ НИЖНЕЙ КОНЕЧНОСТИ (ОБЗОР)

П.А. Байгужин, baiguzhinpa@susu.ru, <http://orcid.org/0000-0002-5092-0943>

В.В. Эрлих, erlih-vadim@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0003-4416-1925>

Я.В. Бурнашов, yaroslav.burnashov1337@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8978-5526>

Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

Аннотация. Цель: дать характеристику компенсаторным процессам и механизмам функциональных систем у лиц с односторонней ампутацией нижней конечности. **Материалы и методы.** Проведены анализ и обобщение 27 публикаций (PubMed), предметом исследования которых являлись параметры компенсаторных механизмов организма односторонних транстибиальных и трансфеморальных ампутантов. **Результаты.** представлены в виде характеристики общих и специфических параметров компенсаторных процессов и механизмов организма ампутантов со стороны мышечной, центральной и автономной нервной, сердечно-сосудистой систем. Обобщено содержание факторов, уточняющих методы исследования и составляющих протоколы оценки компенсаторных механизмов организма при обследовании ампутантов (социально-демографический, медико-биологический, протезная реабилитация, функционального тестирования, технико-эргономические показатели протеза). **Заключение.** Учет коррелятов функциональных состояний организма и эффективности протезной реабилитации позволит оптимизировать замещающую функцию здоровой конечности у односторонних ампутантов, совершенствовать существующие программы реабилитации, обосновать и реализовать биопсихосоциальную адаптацию лиц с ампутациями нижних конечностей к условиям жизнедеятельности.

Ключевые слова: компенсаторные реакции, компенсаторные процессы, компенсаторные механизмы, транстибиальные ампутанты, трансфеморальные ампутанты, протезная реабилитация

Благодарности. Работа выполнена в рамках госзадания Министерства науки и высшего образования РФ FENU-2023-0017 (2023217Г3).

Для цитирования: Байгужин П.А., Эрлих В.В., Бурнашов Я.В. Компенсаторные процессы у лиц с односторонней ампутацией нижней конечности (обзор) // Человек. Спорт. Медицина. 2024. Т. 24, № 4. С. 165–172. DOI: 10.14529/hsm240421

Review article
DOI: 10.14529/hsm240421

COMPENSATORY PROCESSES IN INDIVIDUALS WITH UNILATERAL LOWER LIMB AMPUTATION (REVIEW)

P.A. Baiguzhin, baiguzhinpa@susu.ru, <http://orcid.org/0000-0002-5092-0943>

V.V. Erlikh, erlih-vadim@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0003-4416-1925>

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

South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

Abstract. Aim: this paper aims to systematically review the literature on compensatory processes and functional mechanisms in individuals with unilateral lower limb amputation. **Materials and methods.** This paper provides a comprehensive analysis of 27 publications from PubMed, examining the compensatory mechanisms in transtibial and transfemoral amputees. **Results.** This review encompassed parameters from muscular, central nervous, autonomic nervous, and cardiovascular systems. The paper summarizes information on socio-demographic factors, biomedical indicators, prosthetic rehabilitation protocols, functional testing methods, and ergonomic characteristics of prosthetic devices. **Conclusion.** This comprehensive review

provides a framework for understanding compensatory processes in individuals with lower limb amputation. The findings suggest that consideration of these correlates can lead to optimized prosthetic rehabilitation programs and improved biopsychosocial adaptation of amputees to their living conditions.

Keywords: compensatory reactions, compensatory processes, compensatory mechanisms, transtibial amputees, transfemoral amputees, prosthetic rehabilitation

Acknowledgments. This work was carried out within the framework of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation: FENU-2023-0017 (2023217Г3).

For citation: Baiguzhin P.A., Erlikh V.V., Burnashov Ya.V. Compensatory processes in individuals with unilateral lower limb amputation (review). *Human. Sport. Medicine.* 2024;24(4):165–172. (In Russ.) DOI: 10.14529/hsm240421

Введение. По данным литературных источников в России отмечается рост абсолютного числа ампутаций нижних конечностей [2, 3], исключая инвалидов – участников СВО, у которых статистика подобных операций [1] обусловлена специфическими причинами и особенностями травматизации.

Основной задачей реабилитации инвалидов-ампутантов является протезирование как вариант восстановления утраченной конечности (ее части) при помощи искусственных изделий. Однако замещение утраченной части конечности не значит замена ее функций – достижения полноценного функционирования. В рамках оказания протезно-ортопедической помощи населению актуализируется вопрос о прогнозировании результатов протезирования и эффективности реабилитационных мероприятий.

Ампутация нижних конечностей в основном является результатом травмы, сосудистого заболевания, диабета или врожденных нарушений. Лица с ампутацией теряют способность к равновесию (при стоянии, ходьбе) в зависимости от уровня ампутации. По данным обзора [17], неоднозначными и спорными являются результаты исследований роли в оценке степени нарушения равновесия таких факторов, как уровень и тип ампутации, равно как и причины ампутации.

Материалы и методы. В поисковой системе по биомедицинским исследованиям – PubMed – проведена выборка 123 публикаций исследований по комбинациям ключевых слов и словосочетаний: «компенсаторные процессы» (compensatory processes), «компенсаторные механизмы» (compensatory mechanisms), «ампутанты» (amputees), «односторонняя ампутация» (unilateral amputation), «нижние конечности» (lower limbs). Проведен анализ 27 работ, предмет исследования которых со-

гласован с целью нашего исследования. Проведены анализ и обобщение результатов исследования, подходов к оценке параметров компенсаторных механизмов организма транстибиальных и трансфеморальных ампутантов.

Результаты. Качество походки и осанки детерминируется равновесием – целевым показателем, характеризующим физическую работоспособность ампутантов, которому в ходе реабилитации уделяется основное внимание. Совершенствование, в том числе компенсаторных механизмов, способности к равновесию обеспечивает повышение самоэффективности, автономности и безопасности передвижения [31].

В мировой практике для оценки эффективности протезной реабилитации используются около десятка диагностических инструментов: например, самоотчеты «Протезный профиль ампутанта» [12] или «Опросник пользователей ортопедических протезов» [16]; методы измерения физической эффективности «Оценка проблем мобильности» [27] или «Функциональная досягаемость» [10]. Однако, руководствуясь преимуществами объективной оценки, нашего внимания заслуживают «Шкала баланса Берг» (BBS) [5] и AMPPRO (предиктор мобильности ампутантов с протезом) [11].

Предложенная К. Берг в 1989 году BBS позволяет, наблюдая за смещением центра давления при выполнении различных функциональных действий в положениях сидя и стоя, оценить статические и динамические компоненты равновесия (14 двигательных задач). Различная степень успеха выполнения задачи указывает на определенный риск падения ампутанта [5].

Надежным и валидным является комплексный диагностический инструмент AMPPRO (предикторы мобильности ампутантов с про-

тезом), включающий тестирование равновесия при осуществлении различных двигательных задач (равновесие сразу после вставания, при поднимании предмета с пола и т. п.), а также базовых двигательных актов (вставание со стула, ходьба, повороты в движении, подъём и спуск по лестнице) – всего 21 тест. Критерии оценивания функциональных способностей инвалидов-ампутантов позволяют проводить дифференциацию на пять функциональных уровней [2, 11]. Целесообразность применения указанных выше и подобных инструментов лежит в рамках концепции «динамической оценки функционального баланса».

Ключевые параметры, характеризующие «функциональный баланс» в большинстве методик оценивания кинематики двигательных задач, отражают статическое и динамическое функциональное равновесие. Наиболее информативными показателями, тесно связанными с динамическим балансом, являются: скорость походки (м/с), каденция (шаг/мин), процент фазы опоры левой и правой ног (L%, R%) и их двойная опора (%). Статические характеристики баланса включают стабиллографические показатели – площадь смещения эллипса (мм²), длину пути эллипса (мм) и среднюю скорость смещения эллипса (мм/с), процентное соотношение подошвенного давления на пораженной и здоровой ноге (%) [31].

К настоящему времени созданы аппаратно-программные комплексы для оценки кинематических параметров походки и успешно применяются в реабилитации ампутантов, носящих протезы [4, 14].

В проблемном поле реабилитации находится знание о компенсаторных процессах, выраженных в особенностях проявления функций в условиях жизнедеятельности с протезом. «Задача» компенсации как реакции организма на «препятствие» к адаптации заключается в сохранении жизнеобеспечивающих функций и замещении функциональной недостаточности поврежденных элементов системы деятельностью неповрежденных ее элементов. Такого рода «адаптация с опорой на несобственные ресурсы» у инвалидов-ампутантов проявляется на различных уровнях организации биологической системы.

Характеристика компенсаторных процессов организма ампутантов описывает как общие, так и специфические параметры адекватной организации управления движением.

В работе N. Rubin с соавторами (2024) показано, что периферическое нервно-мышечное повреждение приводит к функциональным реорганизациям на уровне спинного мозга [23]. Также активно обсуждаются функциональные и перцептивные процессы функциональной реорганизации коры *головного мозга*, связанные с ампутацией [18, 19].

В работе [18] показано, что корковое представление конечности остается стабильным, несмотря на потерю ее основного периферического входа. Более того, предположительно массивная реорганизация является результатом в первую очередь формирования или потенцирования новых путей в подкорковых структурах и не создает новых функциональных сенсорных представлений. В более поздней работе [19] автор указывает, что «ни в какой период, включая ранний этап развития, кора не предлагает структурных возможностей для функциональной плюрипотентности». Реорганизация как отдельная форма пластичности коры, часто вызываемая такими словами, как «перестройка» и «перемонтаж», не существует.

В этой связи востребованными являются результаты исследования компенсаторных механизмов, лежащих в основе нейромышечной адаптации и выраженных в нарушении сенсомоторной интеграции после ампутации нижней конечности и, следовательно, в асимметричной стойке и походке [9].

В клинической практике с целью снижения компенсаторной напряженности организма разработан способ операции по ампутации «агонист – антагонист мионевральный интерфейс», направленный на сохранение сигнальных механизмов центрально-периферической нервной системы [8]. Поскольку нейронные сигналы в остаточных мышцах ампутированных конечностей часто декодируются для управления силовыми протезами [23], данный подход инициирует целевую функциональную реорганизацию нейросети, оптимизируя нейронную конфигурацию для протезного контроля.

Мышечная система – основное звено компенсаторного процесса двигательных актов ампутантов [13, 15, 28]. Основным «внешним» компенсаторным механизмом походки, используемым людьми с односторонней ампутацией для облегчения перемещения стопы во время фазы протезного переноса, является

опорный ход. Однако общая стратегия компенсаторной механики безопорной походки представлена сниженной скоростью ходьбы и сокращением длины шага неповрежденной конечности, что, в свою очередь, снижает скорость центра масс при контакте с пяткой [21]. Следовательно, увеличение остаточной силы и отдачи разгибателя бедра ноги может быть полезным механизмом для уменьшения асимметрии нагрузки импульсов силы реакции опоры между неповрежденной и протезированной ногами [24].

Из всех вариаций походки поворот требует модуляции сил реакции опоры для ускорения центра масс тела по пути его совершения. Поскольку подошвенные сгибатели голеностопного сустава вносят значительный вклад в движущие силы реакции опоры, важно, как трансфибиальные ампутанты выполняют задачи поворота при отсутствии этих мышц [28].

Очевидно, что ампутанты и здоровые люди используют разные стратегии суставного движения при повороте: в первом случае – это работа тазобедренного сустава в сагиттальной плоскости, во втором – голеностопного сустава в сагиттальной плоскости и работа тазобедренного сустава во фронтальной плоскости. Указанные различия обусловлены минимальной выходной мощностью, обеспечиваемой пассивными протезами стоп и необходимостью минимизировать риск падения [28].

В работе [13] в результате трехмерного анализа походки 17 испытуемых с односторонней трансфибиальной ампутацией установлено, что в неповрежденных конечностях ранняя отрицательная работа бедра (торможение) способствовала поглощению энергии в дополнение к коленному суставу, вероятно, для компенсации более низкого уровня поглощения энергии, оказываемого протезными конечностями.

Во время ходьбы сагиттальный баланс постоянно нарушается поддержкой одной ноги. Так, например, оценен вклад неповрежденных и контралатеральных мышц здоровой конечности в ускорение центра масс тела во время ходьбы у трансфеморальных ампутантов [15]. Авторами установлено, что передний наклон таза и диапазон движения бедра в сагиттальной и фронтальной плоскостях неповрежденной конечности, средний вклад мышц бедра неповрежденной конечности в поддержку центра массы тела, продвижение вперед и ме-

диолатеральный баланс были значительно больше, чем в культе. Большая ягодичная мышца внесла больший вклад в продвижение и поддержку, в то время как средняя ягодичная мышца внесла больший вклад в равновесие, чем другие мышцы в здоровой конечности, чем в культе [15]. Максимальное сгибание в коленном суставе, его общая работа при ходьбе значительно выше в неповрежденных конечностях по сравнению с протезными конечностями; при этом кинетика колена протезной конечности не изменялась, что предполагает сформированность компенсаторного механизма [6].

Очевидно, что у людей с различными вариантами ампутации нижней конечности – низкий уровень ежедневной двигательной активности: 5929 ± 3047 шагов для трансфибиальных и 3553 ± 2030 – для трансфеморальных ампутантов [29]. Закономерно снижение мышечной массы, уровня физической работоспособности, фактических резервных возможностей организма ампутантов.

Вышеописанные параметры компенсаторных механизмов мышечной системы у трансфибиальных и трансфеморальных ампутантов определяют разные соотношения между метаболическими затратами и механикой ходьбы (латеральный баланс и затраты на увеличение скорости). По данным R.H. Miller с соавторами (2024), метаболические затраты после трансфеморальной потери конечности закономерно увеличиваются в зависимости от массы тела, конструктивных особенностей протеза [20].

Анализ *метаболических* реакций на умеренную и интенсивную нагрузку (20-минутных циклов езды на велосипеде) у мужчин ($39,0 \pm 15,0$ года), перенесших трансфибиальную ампутацию, выявил, что уровни ЧСС и потребления кислорода не имели различий с группой контроля; высокоинтенсивная интервальная нагрузка сопровождается существенным накоплением лактата в крови в группе ампутантов [26].

В работе H. Younesian с соавторами (2021), предметом исследования была реактивность организма у лиц (5 женщин, 6 мужчин; $57,9 \pm 15,6$ года) с односторонней ампутацией нижней конечности на тест «6-минутная ходьба». Реакция ЧСС максимальна в начале теста. С каждой последующей минутой теста соотношение опор цикла походки увеличивалось,

снижались скорость и каденция, что свидетельствовало о развитии утомления [30].

Аналогичное обследование 35 лиц с различными уровнями ампутации нижних конечностей (19 мужчин, 16 женщин) с применением теста «2-минутная ходьба» проведено J.D. Smith и G. Guerra (2021). Очевидными были результаты сравнения частоты шагов в зависимости от пола и уровня ампутации. При этом не выявлено значимых различий по показателям потребления кислорода и ЧСС [25].

Малочисленными являются результаты исследования компенсаторных механизмов *автономной нервной системы* у ампутантов. Компенсаторный механизм при адаптации к ходьбе с трансфеморальным протезом выражен в увеличении периферического сосудистого сопротивления в нижних конечностях и стимуляции барорефлекса, что в свою очередь стабилизирует динамику системного кровотока при выполнении теста «Наклон головы вверх» (Head-up tilt) [22]. В другой работе [7] установлено, что реакция автономной нервной системы по показателям сердечного ритма во время ходьбы одинакова в группах сравнения (ампутанты и контроль) и регулируется в зависимости от скорости ходьбы.

Анализ источников информации позволил заключить, что компенсаторные процессы и механизмы организма, специфичность их реализации определяется рядом факторов, учет которых существенно повысит эффективность протезной реабилитации.

Кроме того, считаем необходимым обобщить факторы (параметры, показатели), уточняющие методы исследования и составляющие протоколы оценки компенсаторных механизмов организма при обследовании ампутантов:

– социально-демографические показатели (пол, возраст, род деятельности, уровень двигательной активности и физической подготовленности, качество жизни);

– медико-биологические или клинические (антропометрический профиль, показатели функционального состояния (в том числе сопутствующие заболевания), реактивность организма, качество медикаментозной поддержки, биоритмологический тип (хронотип));

– режимы протезной реабилитации (причина и вид ампутации, стаж реабилитации,

особенности программы реабилитации (двигательный компонент), уровень болевой чувствительности);

– тестирование кондиций (сезон обследования, целесообразность (обоснование) теста, стандартные условия к проведению функциональных проб, критерии включения и исключения, пространственно-временные параметры функциональной пробы с учетом особенностей ампутантов);

– технические и эргономические показатели протеза (масса, габариты, особенности конструкции, обуви).

В рамках настоящей статьи не рассматривался не менее важный фактор – психофизиологическое состояние и психологический тип лиц с ампутациями. По нашему мнению, данный фактор является определяющим в достижении положительных эффектов в ходе и результате протезной реабилитации.

Заключение. Знания о компенсаторных механизмах позволят уточнять и корректировать протокол биомеханического и физиологического исследования в области «подбора» параметров (чувствительных и информативных) – коррелятов эффективности протезной реабилитации. К настоящему времени разработаны количественные методы оценки эффективности протезной реабилитации на любом ее этапе [31], постоянно совершенствуются эргономические характеристики протезов.

Перспективность данного направления исследования, на наш взгляд, – в учете коррелятов функциональных состояний организма и эффективности протезной реабилитации, что позволит оптимизировать замещающую функцию здоровой конечности у односторонних ампутантов и совершенствовать существующие программы реабилитации, сокращать их срок. Учет компенсаторных процессов и механизмов в своей совокупности расширяет возможности биопсихосоциальной адаптации лиц с ампутациями нижних конечностей к условиям жизнедеятельности. Востребованными будут результаты взаимосвязи кинематических и кинетических параметров движений (походки) с показателями функциональных систем, прямо и косвенно обеспечивающих компенсацию утраченной конечности.

Список литературы / References

1. Ампутиации перенесли 54 % участников СВО, признанных инвалидами // Интерфакс: информационная группа. 17 окт. 2023 г. <https://www.interfax.ru/russia/926239> (дата обращения: 07.04.2024). [Amputations were carried out by 54% of the participants of the SVO recognized as disabled. *Interfax: information group*. October 17, 2023. Available at: <https://www.interfax.ru/russia/926239> (accessed 07.04.2024). (in Russ.)].
2. Васильченко Е.М. Динамика частоты ампутаций нижней конечности в городе Новокузнецке. Ретроспективное исследование // Медицина в Кузбассе. 2018. Т. 17, № 4. С. 5–10. [Vasilchenko E.M. [The Dynamics of the Frequency of Lower Limb Amputations in the City of Novokuznetsk. A Retrospective Study]. *Meditsina v Kuzbasse* [Medicine in Kuzbass], 2018, vol. 17, no. 4, pp. 5–10. (in Russ.)].
3. Чернядьев С.А., Погосян В.А., Фадин Б.В. Ампутиации нижних конечностей // Клиническая и экспериментальная хирургия. Журнал имени академика Б.В. Петровского. 2022. Т. 10, № 2. С. 54–59. [Chernyad'ev S.A., Pogosian V.A., Fadin B.V. Lower Limb Amputation]. *Klinicheskaya i eksperimental'naya khirurgiya. Zhurnal imeni akademika B.V. Petrovskogo* [Clinical and Experimental Surgery. Petrovsky Journal], 2022, vol. 10 (2), pp. 54–59. (in Russ.)] DOI: 10.33029/2308-1198-2022-10-2-54-59
4. Эрлих, В.В. Биомеханика ходьбы в норме и при наличии протеза ноги с использованием комплекса Xsens / В.В. Эрлих, В.В. Епишев, С.Б. Сапожников // Человек. Спорт. Медицина. 2023. Т. 23, № 4. С. 145–154. [Erlikh V.V., Epishev V.V., Sapozhnikov S.B. Gait Biomechanics in Normal Conditions and with a Lower-extremity Prosthesis Captured by the Xsens System. *Human. Sport. Medicine*, 2023, vol. 23 (4), pp. 145–154. (in Russ.) DOI 10.14529/hsm230418]
5. Alghwiri A.A., Whitney S.L. Chapter 18 – Balance and falls. In: Guccione A.A., Wong R.A., Avers D., ed. *Geriatric Physical Therapy (Third Edition)* Mosby; 2012.
6. Beyaert C., Grumillier C., Martinet N. et al. Compensatory Mechanism Involving the knee Joint of the Intact Limb During Gait in Unilateral Below-knee Amputees. *Gait and Posture*, 2008, vol. 28 (2), pp. 278–284. DOI: 10.1016/j.gaitpost.2007.12.073
7. Bussmann J.B., Grootsholten E.A., Stam H.J. Daily Physical Activity and Heart Rate Response in People with a Unilateral Transtibial Amputation for Vascular Disease. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 2004, vol. 85 (2), pp. 240–244. DOI: 10.1016/s0003-9993(03)00485-4
8. Chicos L.A., Rangaprakash D., Srinivasan S.S. et al. Resting State Neurophysiology of Agonist-antagonist Myoneural Interface in Persons with Transtibial Amputation. *Scientific Reports*, 2024, vol. 14 (1), art. 13456. DOI: 10.1038/s41598-024-63134-4
9. Claret C.R., Herget G.W., Kouba L. et al. Neuromuscular Adaptations and Sensorimotor Integration Following a Unilateral Transfemoral Amputation. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, 2019, vol. 16 (1), art. 115. DOI: 10.1186/s12984-019-0586-9
10. Duncan P.W., Weiner D.K., Chandler J., Studenski S. Functional Reach: a New Clinical Measure of Balance. *Journal of Gerontology*, 1990, vol. 45 (6), pp. 192–197. DOI: 10.1093/geronj/45.6.m192
11. Gailey R.S. Predictive Outcome Measures Versus Functional Outcome Measures in the Lower Limb Amputee. *Journal of Prosthetics and Orthotics*, 2006, vol. 18 (1S), pp. 51–60.
12. Gauthier-Gagnon C., Grise M. Prosthetic Profile of the Amputee: Handbook of Documents Developed within the Framework of a Prosthetic Follow-up Study. Montreal, Quebec, Canada: Ecole de Readaptation, Faculte de Medecine, Universite de Montreal, 1992.
13. Grumillier C., Martinet N., Paysant J. et al. Compensatory Mechanism Involving the Hip Joint of the Intact Limb During Gait in Unilateral Trans-tibial Amputees. *Journal of Biomechanics*, 2008, vol. 41 (14), pp. 2926–2931. DOI: 10.1016/j.jbiomech.2008.07.018
14. Han S.L., Cai M.L., Pan M.C. Inertial Measuring System to Evaluate Gait Parameters and Dynamic Alignments for Lower-Limb Amputation Subjects. *Sensors (Basel)*, 2024, vol. 24 (5), art. 1519. DOI: 10.3390/s24051519
15. Harandi V.J., Ackland D.C., Haddara R. et al. Gait Compensatory Mechanisms in Unilateral Transfemoral Amputees. *Medical Engineering and Physics*, 2020, vol. 77, pp. 95–106. DOI: 10.1016/j.medengphy.2019.11.006

16. Heinemann A.W., Bode R.K., O'Reilly C. Development and Measurement Properties of the Orthotics and Prosthetics Users' Survey (OPUS): a Comprehensive Set of Clinical Outcome Measures. *Prosthetics and Orthotics International*, 2003, vol. 27, pp. 191–206.
17. Kamali M., Karimi M.T., Eshraghi A., Omar H. Influential Factors in Stability of Lower-limb Amputees. *American Journal of Physical Medicine and Rehabilitation*, 2013, vol. 92 (12), pp. 1110–1118. DOI: 10.1097/PHM.0b013e31829b4b7a
18. Makin T.R., Bensmaia S.J. Stability of Sensory Topographies in Adult Cortex. *Trends in Cognitive Sciences*, 2017, vol. 21 (3), pp. 195–204. DOI: 10.1016/j.tics.2017.01.002
19. Makin T.R., Krakauer J.W. Against Cortical Reorganisation. *Elife*, 2023, vol. 12, art. e84716. DOI: 10.7554/eLife.84716
20. Miller R.H., Bell E.M., Russell Esposito E. Transfemoral Limb Loss Modestly Increases the Metabolic Cost of Optimal Control Simulations of Walking. *PeerJ*, 2024, vol. 12, art. e16756. DOI: 10.7717/peerj.16756
21. Morgenroth D.C., Roland M., Pruziner A.L., Czerniecki J.M. Transfemoral Amputee Intact Limb Loading and Compensatory Gait Mechanics During Down Slope Ambulation and the Effect of Prosthetic knee Mechanisms. *Clinical Biomechanics (Bristol, Avon)*, 2018, vol. 55, pp. 65–72. DOI: 10.1016/j.clinbiomech.2018.04.007
22. Nishioka Y., Hoekstra S., Sawada K. et al. Blood Pressure Regulation in Persons with a Transfemoral Amputation: Effects of Wearing a Prosthesis. *Journal of Prosthetics and Orthotics*, 2024, vol. 36 (1), pp. 49–53. DOI: 10.1097/JPO.0000000000000493
23. Rubin N., Hinson R., Saul K. et al. Modified Motor Unit Properties in Residual Muscle Following Transtibial Amputation. *Journal of Neural Engineering*, 2024, vol. 21 (1), art. 10.1088/1741-2552/ad1ac2. DOI: 10.1088/1741-2552/ad1ac2
24. Silverman A.K., Fey N.P., Portillo A. et al. Compensatory Mechanisms in Below-knee Amputee Gait in Response to Increasing Steady-state Walking Speeds. *Gait and Posture*. 2008, vol. 28 (4), pp. 602–609. DOI: 10.1016/j.gaitpost.2008.04.005
25. Smith J.D., Guerra G. Quantifying Step Count and Oxygen Consumption with Portable Technology During the 2-min Walk Test in People with Lower Limb Amputation. *Sensors (Basel)*, 2021, vol. 21 (6), art. 2080. DOI: 10.3390/s21062080
26. Storey K.K., Geschwindt A., Astorino T.A. Hemodynamic and Metabolic Responses to Moderate and Vigorous Cycle Ergometry in Men Who Have Had Transtibial Amputation. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2024, vol. 21 (4), art. 450. DOI: 10.3390/ijerph21040450
27. Tinetti M.E. Performance-oriented Assessment of Mobility Problems in Elderly Patients. *Journal of the American Geriatrics Society*, 1986, vol. 34 (2), pp. 119–126. DOI: 10.1111/j.1532-5415.1986.tb05480.x
28. Ventura J.D., Segal A.D., Klute G.K., Neptune R.R. Compensatory Mechanisms of Transtibial Amputees During Circular Turning. *Gait and Posture*, 2011, vol. 34 (3), pp. 307–312. DOI: 10.1016/j.gaitpost.2011.05.014
29. Wong C.K., Rissland M.S., Madagan D.M., Jones K.N. A Scoping Review of Physical Activity in People with Lower-limb Loss: 10,000 Steps Per Day? *Physical Therapy*, 2021, vol. 101 (8), art. pzab115. DOI: 10.1093/ptj/pzab115
30. Younesian H., Ouellet R., Legrand T., Turcot K. Six-minute Walk Test in Individuals with Unilateral Lower Limb Amputations. *Foot and Ankle Orthopaedics*, 2021, vol. 6 (4), art. 24730114211050366. DOI: 10.1177/24730114211050366
31. Zhang X., Liu Z., Qiu G. Measuring Balance Abilities of Transtibial Amputees Using Multiattribute Utility Theory. *BioMed Research International*, 2021, vol. 2021, art. 8340367. DOI: 10.1155/2021/8340367

Информация об авторах

Байгужин Павел Азифович, доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник научно-исследовательского центра спортивной науки, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия.

Эрлих Вадим Викторович, доктор биологических наук, доцент, профессор кафедры теории и методики физической культуры и спорта, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия.

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

Information about the authors

Pavel A. Baiguzhin, Doctor of Biological Sciences, Leading Researcher, Research Center for Sports Science, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia.

Vadim V. Erlich, Doctor of Biological Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Theory and Methods of Physical Education and Sport, 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.

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 conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 12.06.2024

The article was submitted 12.06.2024