

УДК 615.477:004.8

<http://doi.org/10.35854/1998-1627-2026-3-372-381>

## Бионические устройства и ИИ-технологии в нейрофизиологии движения человека: медицинские и социально-экономические эффекты

Мария Александровна Тимофеева<sup>1✉</sup>, Евгений Николаевич Никитин<sup>2</sup>,  
Александр Сергеевич Несутулов<sup>3</sup>

<sup>1, 2, 3</sup> *Институт проблем передачи информации имени А. А. Харкевича Российской академии наук, Москва, Россия*

<sup>1</sup> *timofeeva.ma@iitp.ru ✉, <https://orcid.org/0009-0006-0180-9356>*

<sup>2</sup> *nikitin-en@iitp.ru, <https://orcid.org/0009-0001-9264-1926>*

<sup>3</sup> *nesutulov-as@iitp.ru, <https://orcid.org/0009-0009-6676-3063>*

### Аннотация

**Цель.** Обобщить и аналитически оценить современное состояние бионических устройств и ИИ-технологий в нейрофизиологии движений человека, а также определить их медицинские, социальные и социально-экономические эффекты применительно к системе здравоохранения и реабилитации, с сопоставлением российской практики и международного опыта.

**Задачи.** Проанализировать основные направления применения бионических устройств и ИИ-технологий в нейрофизиологии движений человека с точки зрения механизмов моторного контроля и нейропластичности; оценить их клиническую эффективность и безопасность в медицинской реабилитации; рассмотреть социальные и социально-экономические эффекты внедрения, включая влияние на качество жизни пациентов, доступность технологий и нагрузку на систему здравоохранения в российском и международном контексте.

**Методология.** Выполнен обзорно-аналитический анализ публикаций и открытых данных 2015–2025 гг. из международных и российских источников (среди них — научные статьи, обзоры, клинические исследования, документы и отчеты). Материалы выбраны с учетом критериев релевантности нейрофизиологии движения, применимости к медицинской реабилитации и наличия измеримых клинических и/или социально-экономических последствий. Результаты сопоставлены по направлениям технологий и по уровню доказательности.

**Результаты.** Показано, что сочетание бионических устройств (протезов, экзоскелетов) с алгоритмами ИИ и нейроинтерфейсами повышает эффективность реабилитации за счет персонализированного управления, усиления сенсомоторной обратной связи и вовлечения механизмов нейропластичности, что находит отражение в улучшении функциональных исходов и росте самостоятельности пациентов. Установлено, что социальный эффект проявляется в повышении качества жизни и расширении возможностей социальной и трудовой интеграции. Социально-экономический эффект связан с потенциальным снижением долгосрочных затрат на уход и лечение осложнений, однако масштабирование ограничено высокой стоимостью технологий, региональной неравномерностью доступа и дефицитом специализированных кадров. Российский опыт характеризуется ростом отечественных разработок и постепенной институционализацией высокотехнологичной реабилитации при сохранении барьеров доступности.

**Выводы.** Бионические устройства и ИИ-технологии в нейрофизиологии движений формируют перспективное направление доказательной нейрореабилитации, способное обеспечивать одновременно медицинские и социально-экономические эффекты. Для устойчивого внедрения в здравоохранение необходимы развитие нормативной базы и стандартов, расширение клинических исследований, применение моделей оценки медицинской эффективности и экономической целесообразности, подготовка кадров и механизмы повышения доступности технологий для пациентов.

**Ключевые слова:** нейрофизиология движений, бионические протезы, экзоскелеты, интерфейс мозг — компьютер, нейрореабилитация, искусственный интеллект, социально-экономические эффекты

**Для цитирования:** Тимофеева М. А., Никитин Е. Н., Несутулов А. С. Бионические устройства и ИИ-технологии в нейрофизиологии движения человека: медицинские и социально-экономические эффекты // *Экономика и управление*. 2026. Т. 32. № 3. С. 372–381. <http://doi.org/10.35854/1998-1627-2026-3-372-381>

## Bionic devices and AI technologies in the neurophysiology of human movement: Medical and socioeconomic impact

Maria A. Timofeeva<sup>1✉</sup>, Yevgeniy N. Nikitin<sup>2</sup>, Alexander S. Nesutulov<sup>3</sup>

<sup>1, 2, 3</sup> Institute for Information Transmission Problems of the Russian Academy of Sciences (Kharkevich Institute), Moscow, Russia

<sup>1</sup> [timofeeva.ma@iitp.ru](mailto:timofeeva.ma@iitp.ru)✉, <https://orcid.org/0009-0006-0180-9356>

<sup>2</sup> [nikitin-en@iitp.ru](mailto:nikitin-en@iitp.ru), <https://orcid.org/0009-0001-9264-1926>

<sup>3</sup> [nesutulov-as@iitp.ru](mailto:nesutulov-as@iitp.ru), <https://orcid.org/0009-0009-6676-3063>

### Abstract

**Aim.** The work aimed to summarize and analytically evaluate the current state of bionic devices and AI technologies in the neurophysiology of human movement, as well as to determine their medical, social, and socioeconomic impacts in relation to healthcare and rehabilitation systems, comparing Russian practice with international experience.

**Objectives.** The work seeks to analyze the main applications of bionic devices and AI technologies in the neurophysiology of human movement from the perspective of motor control mechanisms and neuroplasticity; to evaluate their clinical efficacy and safety in medical rehabilitation; and to consider the social and socioeconomic impacts of their implementation, including the impact on patients' quality of life, technology availability, and the burden on the healthcare system in the Russian and international context.

**Methods.** A review and analytical analysis of publications and open data from international and Russian sources of 2015–2025 (including scientific articles, reviews, clinical trials, documents, and reports) was conducted. The materials were selected based on the criteria of relevance to movement neurophysiology, applicability to medical rehabilitation, and the presence of measurable clinical and/or socioeconomic impacts. Results were compared across technology areas and levels of evidence.

**Results.** It was demonstrated that the combination of bionic devices (prostheses, exoskeletons) with AI algorithms and neural interfaces improves rehabilitation effectiveness through personalized control, enhanced sensorimotor feedback, and the engagement of neuroplasticity mechanisms, resulting in improved functional outcomes and increased patient independence. The social impact was found to be enhanced quality of life and expanded opportunities for social and employment integration. The socioeconomic impact is associated with a potential reduction in long-term costs of care and treatment of complications; however, scalability is limited by the high cost of technologies, regional uneven accessibility, and a shortage of specialized personnel. The Russian experience is characterized by the growth of domestic developments and the gradual institutionalization of high-tech rehabilitation, with preservation of access obstacles.

**Conclusions.** Bionic devices and AI technologies in the neurophysiology of movement are forming a promising field of evidence-based neurorehabilitation, capable of providing both medical and socioeconomic benefits. Sustainable implementation in healthcare requires the development of a regulatory framework and standards, expanded clinical research, the application of models for assessing medical effectiveness and economic feasibility, personnel training, and mechanisms for increasing accessibility of technologies for patients.

**Keywords:** neurophysiology of movement, bionic prostheses, exoskeletons, brain-computer interfaces, neurorehabilitation, artificial intelligence, socioeconomic effects

**For citation:** Timofeeva M.A., Nikitin E.N., Nesutulov A.S. Bionic devices and AI technologies in the neurophysiology of human movement: Medical and socioeconomic impact. *Ekonomika i upravlenie = Economics and Management*. 2026;32(3):372-381. (In Russ.). <http://doi.org/10.35854/1998-1627-2026-3-372-381>

## Введение

Нарушения моторных функций вследствие повреждений нервной системы (инсультов, травм спинного мозга, ампутации конечностей и др.) являются на мировом уровне одной из ведущих причин инвалидности<sup>1</sup>. Ежегодно в мире регистрируют до 500 тысяч новых случаев травм спинного мозга, сотни тысяч ампутаций конечностей и иных тяжелых неврологических повреждений. В России также складывается острая ситуация: по оценкам, на каждый миллион жителей страны приходится около полутысячи операций по ампутации нижних конечностей в год, и суммарно до миллиона человек ежегодно нуждаются в протезировании рук или ног<sup>2</sup>. Традиционные методы реабилитации (медикаментозная терапия, лечебная физкультура и физиотерапия) часто оказываются недостаточно эффективными при таких тяжелых повреждениях и не приводят к полному восстановлению утраченных функций [1].

Нейрофизиология движений человека рассматривает движение как результат многоуровневой интеграции корковых, подкорковых и спинальных структур, а также периферических сенсорных и моторных контуров. Современные данные нейронаук показывают, что восстановление движений после поражений центральной нервной системы опирается не только на сохранность анатомических структур, но и на способность нервной системы к функциональной перестройке, то есть нейропластичности. Именно поэтому традиционные реабилитационные подходы, ориентированные преимущественно на пассивное повторение движений, демонстрируют ограниченную эффективность при тяжелых поражениях [2; 3; 4]. Этим обусловлена необходимость поиска и внедрения революционных подходов к медицинской реабилитации при нарушениях движений.

В последние годы в ответ на этот вызов активно развиваются бионические технологии (создание искусственных устройств, дополняющих или заменяющих утраченные органы и функции) и системы с использованием искусственного интеллекта (ИИ) для восстановления двигательной активности.

К числу таких технологий относятся высокотехнологичные бионические протезы конечностей (роботизированные руки и ноги с миоэлектрическим управлением и датчиками), наружные моторные устройства (экзоскелеты), поддерживающие ходьбу у пациентов с параличом, имплантируемые нейростимуляторы и интерфейсы «мозг — компьютер» (Brain Computer Interface, BCI), позволяющие напрямую передавать сигналы мозга к внешним устройствам, а также реабилитационные робототехнические комплексы с элементами машинного обучения, адаптирующиеся под пациента.

Вместе с тем современные биопротезы способны не только воспроизводить движения потерянной конечности, но и частично возвращать сенсорную обратную связь (осознание, ощущение силы и температуры) за счет внедрения датчиков и нейростимуляции. Благодаря достижениям нейрофизиологии и вычислительной техники, стало возможным считывать электрическую активность мозга и мышц, интерпретировать ее с помощью алгоритмы ИИ и использовать для управления внешними устройствами, например протезами, компьютерами, колясками. Тем самым закладываются основы для принципиально новых методов нейрореабилитации пациентов с тяжелыми двигательными нарушениями [5].

Медицинское значение этих технологий трудно переоценить. Они нацелены на восстановление утраченной двигательной функции, сокращение сроков реабилитации и уровня инвалидизации. Социальные эффекты заключаются в повышении самостоятельности пациентов в повседневной жизни, улучшении их качества жизни и интеграции в общество, преодолении изоляции, связанной с двигательными ограничениями. Например, человек с бионическим протезом руки вновь получает возможность выполнять бытовые действия (готовить пищу, одеваться, работать за компьютером), и это существенно способствует его возвращению к обычной социальной активности. Социально-экономическое влияние выражено в снижении расходов системы здравоохранения и семьи на уход, реабилитацию и пособия по инвалидности в долгосрочной перспективе, поскольку высокотехнологичные средства

<sup>1</sup> Global report on assistive technology // UNICEF. 2022. URL: <https://www.unicef.org/media/120836/file> (дата обращения: 21.12.2025).

<sup>2</sup> Рудич К. Илья Чех, «Моторика» — о протезах, людях-киборгах и проблемах инвалидов // Хайтек. 2020. 25 августа. URL: <https://hightech.fm/2020/08/25/chekh-motorica> (дата обращения: 28.11.2025).

реабилитации ускоряют восстановление и повышают шансы возвращения человека к трудовой деятельности. Кроме того, развивается новый сегмент экономики, в частности индустрия нейротехнологий и бионики, генерирующая рабочие места в высокотехнологичном секторе и стимулирующая научно-исследовательскую деятельность. Так, мировой рынок бионики, включая протезы конечностей, органы чувств и др., в 2023 г. оценен приблизительно в 6,1 млрд долл., прогнозируют его рост ~9,6 % в год, что отражает высокий спрос и инвестиционную привлекательность этой области.

В нашей стране развитию нейротехнологий уделяют особое внимание на государственном уровне. Примерами служат Национальная технологическая инициатива Neuronet и программы Российского научного фонда, в рамках которых поддерживают исследования по созданию нейроинтерфейсов, экзоскелетов и систем нейромодуляции для реабилитации. В частности, в 2021 г. отечественные производители достигли существенного прогресса: появились собственные модели бионических рук (продукт компаний «Моторика» и «Техбионик»), экзоскелеты для восстановления ходьбы («ЭкзоАтлет»), нейрокомпьютерные интерфейсы для реабилитации после инсульта (разработки Национальный медицинский исследовательский центр нейрохирургии имени академика Н. Н. Бурденко, Научного центра неврологии и др.). Доля отечественной продукции на внутреннем рынке технических средств реабилитации (ТСР) возросла с 17 % в 2020 г. до 50 % в 2022 г., что свидетельствует об импортозамещении и наращивании собственного технологического потенциала. Вместе с тем лишь около 10 % российских пациентов, нуждающихся в высокофункциональных протезах, обеспечены ими. Главными препятствиями остаются высокая стоимость устройств и ограниченная информированность о новых возможностях [1; 2; 6; 7].

Таким образом, целью настоящего исследования — обобщение актуальных данных о применении бионических устройств и ИИ-технологий в нейрофизиологии движений человека, с фокусом на их медицинские результаты, социальное значение и экономические аспекты внедрения. Проанализированы примеры, существующие в мировой практике, и российские достижения для того, чтобы выявить общие тенден-

ции, перспективы и узкие места, требующие внимания научного сообщества и системы здравоохранения.

## Материалы и методы

В работе выполнен аналитический обзор научных публикаций и отчетных материалов за 2015–2025 гг., отражающий этап активного развития бионических и интеллектуальных технологий в нейрофизиологии движений. Исследование проведено в формате narrative review с тематическим структурированием материалов по ключевым направлениям, включая бионические протезы и экзоскелеты, нейроинтерфейсы, интеллектуальные системы реабилитации, а также медицинские, социальные и экономические эффекты их внедрения.

Анализ литературы осуществлен на основе публикаций, индексируемых в международных наукометрических базах данных (PubMed, Scopus, Web of Science), а также в российских электронных научных библиотеках. В фокусе внимания — рецензируемые научные статьи, обзоры и результаты клинических исследований, а также аналитические отчеты международных организаций и материалы, отражающие практические примеры внедрения технологий. Приоритет отдан публикациям последних лет и источникам из открытого доступа, учтены значимые классические работы для контекстуального анализа.

В обзор включены исследования, содержащие данные о клинической эффективности бионических и нейроинтерфейсных технологий, их влиянии на функциональное восстановление и качество жизни пациентов, а также сведения о социальных и экономических эффектах применения. Исключены работы, ограниченные инженерными или экспериментальными аспектами без оценки клинических и социальных результатов, а также ряд описательных наблюдений, не позволяющих делать обобщающие выводы.

## Результаты

### *Бионические технологии в восстановлении двигательных функций*

Анализ публикаций 2015–2025 гг. показывает, что бионические протезы и роботизированные средства реабилитации формируют качественно новый класс вмешательств,

## Классификация бионических устройств и ИИ-технологий в нейрофизиологии движения человека

Table 1. Classification of bionic devices and AI technologies in the neurophysiology of human movement

| Группа технологий           | Нейрофизиологическая основа                                         | Примеры технологий                                                   | Клиническое назначение                                             |
|-----------------------------|---------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|
| Бионические протезы         | ЭМГ-сигналы, остаточная моторика, сенсомоторная интеграция          | Миоэлектрические протезы кисти, протезы с тактильной обратной связью | Компенсация утраченных движений, восстановление бытовой активности |
| Экзоскелеты                 | Центральные генераторы шагательных движений, афферентная стимуляция | ExoAtlet II, HAL, ReWalk                                             | Восстановление ходьбы, вертикализация, профилактика осложнений     |
| Нейроинтерфейсы (BCI)       | Корковая активность (ЭЭГ, импланты), моторное воображение           | BCI-экзоскелеты, BCI-тренажеры                                       | Реабилитация после инсульта, травм спинного мозга                  |
| ИИ-реабилитационные системы | Машинное обучение, адаптивное управление                            | Роботизированные тренажеры с ИИ, VR-реабилитация                     | Персонализация терапии, ускорение восстановления                   |

Источник: составлено авторами.

при котором механическая поддержка движений сочетается с нейрофизиологическими механизмами обучения и нейропластичности. Современные миоэлектрические протезы верхних конечностей регистрируют активность остаточных мышц культи и преобразуют ее в движения исполнительных механизмов. Дополнение алгоритмов машинного обучения улучшает распознавание намерений пользователя и повышает «интуитивность» управления (включая стабильность и точность хвата), что приближает протезирование к функциональной компенсации утраты руки в бытовых и трудовых задачах [8]. По данным обзоров, ключевое клиническое преимущество таких решений связано не только с расширением набора доступных движений, но и с ростом частоты использования протеза пациентами в повседневной жизни при условии правильного подбора и обучения [8].

Экзоскелеты и роботизированные тренажеры для ходьбы в реабилитации пациентов после инсульта и травм спинного мозга обеспечивают повторяемую дозированную нагрузку, вертикализацию и тренировку циклов ходьбы. Эти воздействия физиологически значимы: они активируют сенсомоторную афферентацию, вовлекают центральные генераторы двигательных паттернов и создают условия для пластической перестройки нейронных сетей [1]. Клиническая практика и данные обзоров подтверждают улучшение показателей ходьбы, равновесия и функциональной независимости при корректном отборе пациентов и соблюдении протоколов

безопасности [1]. Для российской практики важным результатом служит институционализация: отдельные модели экзоскелетов прошли процедуру медицинской сертификации, а экзоскелеты включены в перечни оборудования для залов медицинской реабилитации, что создает предпосылки для масштабирования технологии в системе здравоохранения<sup>1</sup>. В целом на современном этапе можно выделить четыре группы бионических устройств и ИИ-технологий в нейрофизиологии движения человека, представленные в таблице 1.

Важная тенденция последних лет — сближение протезирования и реабилитации: бионические устройства рассматривают не только в качестве «замены утраченной функции», но и как средство восстановления за счет тренировочного эффекта и повышения участия пациента в терапии. Это особенно прослеживается в комплексах с биологической обратной связью, при которой пациент получает немедленное подкрепление правильного двигательного паттерна и быстрее формирует устойчивые навыки [1; 6].

#### Нейроинтерфейсы и ИИ-технологии в реабилитационных системах

Нейроинтерфейсы «мозг — компьютер» (BCI) развиваются как ключевой инструмент, соединяющий волевое намерение движения и исполнительное устройство (ортез, экзоскелет, курсор, протез). Наиболее значимые данные получены в постинсультной реабилитации верхней конечности: многоцентро-

<sup>1</sup> Экзоскелет ExoAtlet II прошел медицинскую сертификацию в России // Медвестник. 2021. 25 февраля. URL: <https://medvestnik.ru/content/news/Ekzoskelet-ExoAtlet-II-proshel-medicinskuyu-sertifikatsiyu-v-Rossii.html> (дата обращения: 21.12.2025).

вые клинические исследования показывают, что тренинг с моторным воображением и BCI-управляемым экзоскелетом кисти / ортезом способен улучшать моторные показатели по стандартизированным шкалам по сравнению с одной традиционной терапией у части пациентов [6]. Российские работы подтверждают клиническую реализуемость подхода и его перспективность для практики, включая влияние на моторные функции и связанные нейropsychологические показатели при адекватной методической постановке и обучении пациентов [2; 4].

ИИ-компоненты, в том числе методы машинного обучения, повышают эффективность нейрореабилитационных систем по двум направлениям. Во-первых, улучшает распознавание сигналов (ЭЭГ/ЭМГ), что повышает точность команд управления и снижает «когнитивную цену» для пациента. Во-вторых, реализуется персонализация реабилитации: система адаптирует сложность упражнений, длительность и параметры обратной связи под динамику пациента, повышая интенсивность терапии без потери безопасности [8]. В обзорах речь идет о том, что потенциал ИИ особенно значим в условиях дефицита кадров и необходимости тиражирования качественных реабилитационных практик, однако требуется стандартизация протоколов и накопление доказательной базы для разных нозологий [8].

В мировой практике важным маркером зрелости направления служат переходы от экспериментальных демонстраций к клиническим испытаниям нейроимплантов. Сообщается о случаях восстановления произвольных элементов ходьбы / управления движением у пациентов с тяжелыми поражениями, при сочетании нейроинтерфейса и нейростимуляции, что концептуально подтверждает возможность «обхода» поврежденных путей и запуска нейропластических

процессов<sup>1</sup>. Параллельно регуляторные решения (например, разрешения на клинические исследования имплантируемых интерфейсов) отражают рост практического интереса и необходимость этико-правового сопровождения [9].

*Примеры внедрения: мировой опыт и российская практика*

Мировой опыт показывает устойчивый переход от единичных инженерных решений к экосистемам нейрореабилитации. В частности, клиники внедряют экзоскелеты и роботизированные комплексы, формируются протоколы отбора пациентов, накапливаются данные о безопасности и эффективности при разных диагнозах [1]. Одновременно растет значение ассистивных технологий в здравоохранении как инструмента достижения функциональной независимости, что отражено в документах международных организаций и оценках общественной отдачи инвестиций в такие технологии<sup>2</sup>.

Российская практика характеризуется сочетанием научных разработок, промышленного сектора и механизмов государственного регулирования. Наблюдаются рост отечественного сегмента ТСП и внимание к импортозамещению в области высокотехнологичных изделий<sup>3</sup>. В реабилитационной инфраструктуре появляются сертифицированные экзоскелеты и специализированные программы, что поддерживает перенос технологий из пилотных проектов в клиническую рутину<sup>4</sup>. Значимым направлением является создание протезов с сенсорной обратной связью и развитие пользовательской адаптации, что повышает практическую ценность устройств и их социальную результативность<sup>5</sup>.

Одновременно выявлены барьеры масштабирования: высокая стоимость высокофункциональных устройств и неравномерная

<sup>1</sup> Lewis D. Brain — spine interface allows paralysed man to walk using his thoughts // Scientific American. May 25. 2023. URL: <https://www.scientificamerican.com/article/brain-spine-interface-allows-paralysed-man-to-walk-using-his-thoughts/> (date of access: 06.01.2026).

<sup>2</sup> Global report on assistive technology // UNICEF. 2022. URL: <https://www.unicef.org/media/120836/file> (дата обращения: 21.12.2025).

<sup>3</sup> Пирогова Е. Как обстоят дела на рынке протезирования и какие инновации нужны отрасли // РБК. 2024. 5 апреля. URL: <https://trends.rbc.ru/trends/industry/660ef9569a7947a72761db51> (дата обращения: 30.12.2025).

<sup>4</sup> Экзоскелет ExoAtlet II прошел медицинскую сертификацию в России // Медвестник. 2021. 25 февраля. URL: <https://medvestnik.ru/content/news/Ekzoskelet-ExoAtlet-II-proshel-medicinskuyu-sertifikaciyu-v-Rossii.html> (дата обращения: 21.12.2025).

<sup>5</sup> Хужина Я. Время киборгов: в технопарке «Сколково» разрабатывают протезы, передающие тактильные ощущения // Научная Россия. 2023. 7 июля. URL: <https://scientificrussia.ru/articles/vrema-kiborgov-v-tehnoparke-skolkovo-razrabatyvaut-protezy-peredausie-taktilnye-osusenia> (дата обращения: 16.11.2025).

## Социальные и социально-экономические эффекты внедрения бионических устройств и ИИ-технологий

Table 2. Social and socioeconomic impacts of the implementation of bionic devices and AI technologies

| Уровень                   | Эффект                   | Описание                                           |
|---------------------------|--------------------------|----------------------------------------------------|
| Индивидуальный            | Повышение качества жизни | Самостоятельность, мобильность, снижение депрессии |
| Социальный                | Инклюзия                 | Возвращение к образованию и труду                  |
| Экономика здравоохранения | Снижение затрат          | Меньше осложнений и длительного ухода              |
| Экономика знаний          | Развитие отрасли         | Рост рынка протезирования и нейротехнологий        |

Источник: составлено авторами.

доступность по регионам, а также ограниченный охват нуждающихся современными протезами в сравнении с общим объемом потребности<sup>1</sup>. Это усиливает значимость мер по стандартизации, подготовке кадров и развитию финансирования ассистивных технологий в системе ОМС / социального обеспечения.

### Обсуждение

Полученные результаты подтверждают, что бионические устройства и ИИ-технологии в нейрофизиологии движений обладают выраженным междисциплинарным эффектом: клинические улучшения сопряжены с социальными и экономическими последствиями. С медицинских позиций ключевой вклад технологий связан с 1) повышением интенсивности и повторяемости реабилитационной нагрузки; 2) усилением вовлечения пациента через обратную связь и волевой контроль (особенно в ВСИ-подходах); 3) индивидуализацией терапии на основе данных пациента и адаптивных алгоритмов [1; 6; 8]. Наиболее убедительные доказательства накапливаются в реабилитации после инсульта (верхняя конечность) и роботизированной тренировке ходьбы при поражениях спинного мозга, если сформированы понятные клинические метрики результата [1; 6].

Социальный эффект следует рассматривать как прямое продолжение клинического, то есть восстановление или компенсация движений повышают функциональную независимость, расширяют доступность труда, образования и коммуникации, снижают

вторичную социальную изоляцию<sup>2</sup>. В российских условиях значим также эффект психологической адаптации и формирования «позитивного технологического образа» реабилитации, особенно в протезировании, при котором пользовательский опыт и обучение определяют реальную полезность устройства<sup>3</sup>.

Социально-экономический эффект проявляется на нескольких уровнях. На уровне системы здравоохранения и социальной поддержки ожидаемо снижается долгосрочная стоимость последствий тяжелой инвалидности за счет уменьшения потребности в постоянном уходе, профилактики осложнений и повышения самостоятельности пациента<sup>4</sup>. На уровне экономики формируется отрасль высокотехнологичных изделий и услуг (разработки, производство, клиническая интеграция, сервис и обучение специалистов). Для России дополнительные эффекты связаны с ростом доли отечественных решений на рынке ТСП и развитием нормативного поля, позволяющего учреждениям реабилитации закупать и применять экзоскелеты и другие роботизированные средства<sup>5</sup>. В виде системы социальные и социально-экономические эффекты внедрения бионических устройств и ИИ-технологий представлены в таблице 2.

Вместе с тем сохраняются ограничения, критичные для «вестниковского» анализа. Во-первых, высокая стоимость высокофункциональных решений и неравномерность доступности приводят к тому, что технологический прогресс не автоматически трансформируется в массовое улучшение здоровья: охват нуждающихся остается ограниченным<sup>6</sup>.

<sup>1</sup> Рудич К. Указ. соч.

<sup>2</sup> Хужина Я. Указ. соч.

<sup>3</sup> Рудич К. Указ. соч.; Хужина Я. Указ. соч.

<sup>4</sup> Global report on assistive technology // UNICEF. 2022. URL: <https://www.unicef.org/media/120836/file> (дата обращения: 21.12.2025).

<sup>5</sup> Пирогова Е. Указ. соч.

<sup>6</sup> Рудич К. Указ. соч.

Во-вторых, требуется дальнейшая стандартизация клинических протоколов и согласование методик оценки эффективности, особенно для систем с ИИ (в данном случае важны воспроизводимость результатов, безопасность и прозрачность алгоритмов) [8]. В-третьих, инвазивные нейроинтерфейсы требуют отдельного этического-правового контура: баланс риска вмешательства и ожидаемой пользы, защита нейроданных, ответственность при сбоях, что становится актуальным по мере расширения клинических исследований<sup>1</sup>.

## Выводы

Бионические устройства и ИИ-технологии в нейрофизиологии движений человека формируют одно из наиболее перспективных направлений современной реабилитационной медицины. Данные последних лет подтверждают клиническую результативность роботизированных средств реабилитации и ВСИ-подходов, прежде всего в постинсультном восстановлении и тренинге ходьбы при поражениях спинного мозга [1; 6], а также потенциал ИИ для повышения точности управления устройствами и персонализации терапии<sup>2</sup>.

Социальные эффекты проявляются в росте самостоятельности пациентов и расширении возможностей социальной и трудовой интеграции, что согласуется с международными оценками значимости ассистивных технологий для общественного благополучия<sup>3</sup>. Российская практика показывает наличие тех-

нологической базы и регуляторных шагов для внедрения (сертификация и включение отдельных устройств в реабилитационную инфраструктуру), а также тенденцию к развитию отечественного сегмента рынка ТСР<sup>4</sup>. Это особенно важно в контексте того, что за последние два десятилетия значительно возросло и применение технологий на основе ИИ в управленческих процессах [9; 10; 11; 12], в том числе в сфере здравоохранения.

Для реализации полного медицинского и социально-экономического потенциала бионических устройств и ИИ-технологий в Российской Федерации требуется системное развитие клинической и организационной базы их применения. Ключевым условием служит накопление воспроизводимой доказательной базы за счет расширения клинических исследований и унификации критериев оценки эффективности, что особенно важно для технологий, основанных на ИИ и нейроинтерфейсах. Не менее значимым фактором остается доступность высокотехнологичных решений для пациентов, которая определена механизмами финансирования, логистикой поставок и наличием сервисной инфраструктуры. Существенная роль отведена вопросам подготовки междисциплинарных кадров, способных работать на стыке нейрофизиологии, медицины, инженерии и анализа данных; развития этического-правового регулирования, обеспечивающего безопасность, ответственность и общественное доверие при использовании имплантируемых нейроинтерфейсов и ИИ-алгоритмов в клинической практике.

## Список источников

1. Lee S. H., Ko M. J., Lee Y. S. et al. State-of-the-art in robotic rehabilitation for spinal cord injury patients: A literature review // *Korean Journal of Neurotrauma*. 2025. Vol. 21. No. 4. P. 278–292. <https://doi.org/10.13004/kjnt.2025.21.e34>
2. Мокиенко О. А., Люкманов Р. Х., Бобров П. Д., Супонева Н. А., Пирадов М. А. Интерфейсы мозг – компьютер для восстановления движений руки после инсульта: текущий статус и перспективы разработок (обзор) // *Современные технологии в медицине*. 2023. Т. 15. № 6. С. 63–74. <http://doi.org/10.17691/stm2023.15.6.07>
3. Воробьев А. А., Глухова М. В., Безбородов С. А., Кетов Д. Ю., Авдеюк Д. Н. Экзоскелет кисти в современной абилитации и реабилитации (аналитический обзор) // *Оперативная хирургия и клиническая анатомия*. 2025. Т. 9. № 3. С. 53–61. <http://doi.org/10.17116/operhirurg2025903153>

<sup>1</sup> Levy R., Taylor M., Sharma A. Elon Musk's Neuralink wins FDA approval for human study of brain implants // *Reuters News*. May 27. 2023. URL: <https://www.reuters.com/science/elon-musks-neuralink-gets-us-fda-approval-human-clinical-study-brain-implants-2023-05-25/> (дата обращения: 30.12.2025); Lewis D. Op. cit.

<sup>2</sup> Дикун В. И. Бионический протез руки с ИИ позволил восстановить интуитивный захват // *Центр Дикуня*. 2025. 16 декабря. URL: <https://www.dikul.net/interest/3/846.html> (дата обращения: 20.01.2026).

<sup>3</sup> Global report on assistive technology // UNICEF. 2022. URL: <https://www.unicef.org/media/120836/> (дата обращения: 21.12.2025).

<sup>4</sup> Пирогова Е. Указ. соч.

4. Люкманов Р. Х., Азиатская Г. А., Мокиенко О. А. и др. Интерфейс мозг-компьютер в постинсультной реабилитации: клинико-нейропсихологическое исследование // Журнал неврологии и психиатрии имени С. С. Корсакова. 2018. Т. 118. № 8. С. 43–51. <http://doi.org/10.17116/jnevro201811808143>
5. Аляев Д. Ю., Кокарева А. А., Травина Д. Н. Применение передовых технологий в лечебной физической культуре: перспективы и достижения // Биология и интегративная медицина: электрон. науч. журнал. 2024. № 6. С. 269–288. <http://doi.org/10.24412/cl-34438-2024-671-269-288>
6. Frolov A. A., Mokienko O., Lyukmanov R. et al. Post-stroke rehabilitation training with a motor-imagery-based brain-computer interface (BCI)-controlled hand exoskeleton: A randomized controlled multicenter trial // *Frontiers in Neuroscience*. 2017. Vol. 11. Article 400. <http://doi.org/10.3389/fnins.2017.00400>
7. Young M. J., Lin D. J., Hochberg L. R. Brain-computer interfaces in neurorecovery and neurorehabilitation // *Seminars in Neurology*. 2021. Vol. 41. No. 2. P. 206–216. <http://doi.org/10.1055/s-0041-1725137>
8. Abbas G., Speksnijder C., Ramnarain D. et al. AI-driven rehabilitation robotics: Advancements in and impacts on patient recovery // *Cureus*. 2025. Vol. 17. No. 10. Article e94273. <http://doi.org/10.7759/cureus.94273>
9. Репин Д. А., Игнатъев С. А. «Внедрять нельзя отказаться»: влияние этики на применение технологий искусственного интеллекта в управлении социально-экономическими процессами // Экономика и управление. 2024. Т. 30. № 12. С. 1503–1509. <https://doi.org/10.35854/1998-1627-2024-12-1503-1509>
10. Игнатъев С. А., Клевцова О. Ю., Плотников В. А. Совершенствование государственного управления на основе использования технологии интеллектуального анализа данных // Известия Санкт-Петербургского государственного экономического университета. 2025. № 2. С. 50–58.
11. Лебедев М. А., Репин Д. А., Тимофеева М. А. Перспективы применения нейроинтерфейсов и технологий расширенной реальности в государственном управлении // Экономика и управление. 2025. Т. 31. № 4. С. 467–474. <https://doi.org/10.35854/1998-1627-2025-4-467-474>
12. Бедрик О. И., Несутулов А. С., Никитин Е. Н. Технологии искусственного интеллекта как фактор развития цифровой экономики: оценка социально-экономических эффектов // Экономика и управление. 2025. Т. 31. № 5. С. 593–601. <http://doi.org/10.35854/1998-1627-2025-5-593-601>

## References

1. Lee S.H., Ko M.J., Lee Y.S., et al. State-of-the-art in robotic rehabilitation for spinal cord injury patients: A literature review. *Korean Journal of Neurotrauma*. 2025;21(4):278-292. <https://doi.org/10.13004/kjnt.2025.21.e34>
2. Mokienko O.A., Lyukmanov R.KH., Bobrov P.D., Suponeva N.A., Piradov M.A. Brain-computer interfaces for upper limb motor recovery after stroke: Current status and development prospects (review). *Sovremennye tekhnologii v meditsine = Modern Technologies in Medicine*. 2023;15(6):63-74. (In Russ.). <http://doi.org/10.17691/stm2023.15.6.07>
3. Vorobyov A.A., Glukhova M.V., Bezborodov S.A., Ketov D.Yu., Avdeyuk D.N. The exoskeleton of the hand in modern habilitation and rehabilitation (analytical review). *Operativnaya khirurgiya i klinicheskaya anatomiya = Russian Journal of Operative Surgery and Clinical Anatomy*. 2025;9(3):53-61. (In Russ.). <http://doi.org/10.17116/operhirurg2025903153>
4. Lyukmanov R.Kh., Aziatskaya G.A., Mokienko O.A., et al. Post-stroke rehabilitation training with a brain-computer interface: A clinical and neuropsychological study. *Zhurnal neurologii i psikiatrii im. S.S. Korsakova = S.S. Korsakov Journal of Neurology and Psychiatry*. 2018;118(8):43-51. (In Russ.). <http://doi.org/10.17116/jnevro201811808143>
5. Alyaev D.Yu., Kokareva A.A., Travina D.N. The use of advanced technologies in physical therapy: Prospects and achievements. *Biologiya i integrativnaya meditsina = Biology and Integrative Medicine*. 2024;(6):269-288. (In Russ.). <http://doi.org/10.24412/cl-34438-2024-671-269-288>
6. Frolov A.A., Mokienko O., Lyukmanov R., et al. Post-stroke rehabilitation training with a motor-imagery-based brain-computer interface (BCI)-controlled hand exoskeleton: A randomized controlled multicenter trial. *Frontiers in Neuroscience*. 2017;11:400. <http://doi.org/10.3389/fnins.2017.00400>
7. Young M.J., Lin D.J., Hochberg L.R. Brain-computer interfaces in neurorecovery and neurorehabilitation. *Seminars in Neurology*. 2021;41(2):206-216. <http://doi.org/10.1055/s-0041-1725137>
8. Abbas G., Speksnijder C., Ramnarain D., et al. AI-driven rehabilitation robotics: Advancements in and impacts on patient recovery. *Cureus*. 2025;17(10):e94273. <http://doi.org/10.7759/cureus.94273>

9. Repin D.A., Ignatyev S.A. "Implementation impossible to refuse": The influence of ethics on using artificial intelligence in socio-economic management. *Ekonomika i upravlenie = Economics and Management*. 2024;30(12):1503-1509. (In Russ.). <https://doi.org/10.35854/1998-1627-2024-12-1503-1509>
10. Ignatev S.A., Klevtsova O.YU., Plotnikov V.A. Improving public administration based on data mining technologies. *Izvestiya Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo ekonomicheskogo universiteta*. 2025;(2):50-58. (In Russ.).
11. Lebedev M.A., Repin D.A., Timofeeva M.A. Prospects for the application of neurointerfaces and augmented reality technologies in public administration. *Ekonomika i upravlenie = Economics and Management*. 2025;31(4):467-474. (In Russ.). <https://doi.org/10.35854/1998-1627-2025-4-467-474>
12. Bedrik O.I., Nesutulov A.S., Nikitin E.N. Artificial intelligence technologies as a factor in the digital economy development: Assessment of socio-economic effects. *Ekonomika i upravlenie = Economics and Management*. 2025;31(5):593-601. (In Russ.). <http://doi.org/10.35854/1998-1627-2025-5-593-601>

## Информация об авторах

### Мария Александровна Тимофеева

научный сотрудник Лаборатории обработки и передачи информации в когнитивных системах  
Институт проблем передачи информации имени А. А. Харкевича Российской академии наук  
127051, Москва, Большой Каретный пер., д. 19, стр. 1

### Евгений Николаевич Никитин

научный сотрудник Лаборатории обработки и передачи информации в когнитивных системах  
Институт проблем передачи информации имени А. А. Харкевича Российской академии наук  
127051, Москва, Большой Каретный пер., д. 19, стр. 1

### Александр Сергеевич Несутулов

научный сотрудник Лаборатории обработки и передачи информации в когнитивных системах  
Институт проблем передачи информации имени А. А. Харкевича Российской академии наук  
127051, Москва, Большой Каретный пер., д. 19, стр. 1

Поступила в редакцию 22.01.2026  
Прошла рецензирование 17.02.2026  
Подписана в печать 31.03.2026

## Information about the authors

### Maria A. Timofeeva

researcher of the Laboratory for Information Processing and Transmission in Cognitive Systems  
Institute for Information Transmission Problems of the Russian Academy of Sciences (Kharkevich Institute)  
19 Bolshoy Karetnyy ln., bldg. 1, Moscow 127051, Russia

### Yevgeniy N. Nikitin

researcher of the Laboratory for Information Processing and Transmission in Cognitive Systems  
Institute for Information Transmission Problems of the Russian Academy of Sciences (Kharkevich Institute)  
19 Bolshoy Karetnyy ln., bldg. 1, Moscow 127051, Russia

### Alexander S. Nesutulov

researcher of the Laboratory for Information Processing and Transmission in Cognitive Systems  
Institute for Information Transmission Problems of the Russian Academy of Sciences (Kharkevich Institute)  
19 Bolshoy Karetnyy ln., bldg. 1, Moscow 127051, Russia

Received 22.01.2026  
Revised 17.02.2026  
Accepted 31.03.2026

**Конфликт интересов:** авторы декларируют отсутствие конфликта интересов, связанных с публикацией данной статьи.

**Conflict of interest:** the authors declare no conflict of interest related to the publication of this article.