

УДК 004.89:621.391.26

DOI: [10.26102/2310-6018/2025.48.1.002](https://doi.org/10.26102/2310-6018/2025.48.1.002)

## Биотехническая система персонализированной реабилитации пациентов с ограничением двигательных функций

С.А. Филист<sup>1</sup>, Е.В. Петрунина<sup>2</sup>, А.Е. Пшеничный<sup>1</sup>, Д.А. Ермаков<sup>1</sup>,  
Р.А. Крупчатников<sup>3</sup>, В.В. Серебровский<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Юго-Западный государственный университет, Курск, Российская Федерация

<sup>2</sup>Московский политехнический университет, Москва, Российская Федерация

<sup>3</sup>Курский государственный аграрный университет имени И.И. Иванова, Курск, Российская Федерация

**Резюме.** Рассмотрена реабилитационная биотехническая система с адаптируемой виртуальной реальностью, предназначенная для реабилитации пациентов с нарушением двигательных функций нижних конечностей в реабилитационных комплексах с комбинированными обратными связями. В биотехнической системе выделены функциональные модули: формирования управляемых воздействий на пациента, контроля управляемыми воздействиями, управления реабилитацией и информационной поддержки. В процессе реабилитации осуществляют контроль мышечной усталости пациента и ее динамики. Это позволило вносить коррекцию в программу блока реабилитации в процессе сеанса реабилитации и управлять процедурой адаптации виртуальной реальности к функциональному состоянию пациента, а также осуществлять математическое моделирование сценариев курса реабилитации. Предложена модель планирования курса реабилитации с использованием биологической обратной связи, предназначенная для биотехнической системы с виртуальной реальностью. Сформирована экспериментальная группа для оценки эффективности реабилитации постинсультных больных с паретичными нижними конечностями. Результаты реабилитации в этой группе показали, что выбор контента виртуальной реальности, адаптированной к пациенту, позволяет повысить эффективность реабилитации по шкале LEFS на 11 %. Проведены экспериментальные исследования эффективности контроля мышечной усталости в процессе реабилитации. Она подтверждается тестированием статолокомоторной сферы по шкале Тинетти, показатели которой, в среднем, на 10 % превысили показатели в группе сравнения. Включение в процесс реабилитации адаптивной виртуальной реальности и мониторинга мышечной усталости приводит к более ранним восстановлением нарушенной функции равновесия, двигательной активности и социальной реабилитации.

**Ключевые слова:** лица с ограничением двигательных функций, биотехническая система, нарушение двигательных функций, виртуальная реальность, биологическая обратная связь, мышечная усталость.

**Для цитирования:** Филист С.А., Петрунина Е.В., Пшеничный А.Е., Ермаков Д.А., Крупчатников Р.А., Серебровский В.В. Биотехническая система персонализированной реабилитации пациентов с ограничением двигательных функций. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2025;13(1). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1787> DOI: 10.26102/2310-6018/2025.48.1.002

## Biotechnical system of personalized rehabilitation of patients with limited motor functions

S.A. Filist<sup>1</sup>, E.V. Petrunina<sup>2</sup>, A.E. Pshenichny<sup>1</sup>, D.A. Ermakov<sup>1</sup>, R.A. Krupchatnikov<sup>3</sup>,  
V.V. Serebrovskiy<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Southwest State University, Kursk, the Russian Federation

<sup>2</sup>Moscow Polytechnic University, Moscow, the Russian Federation

<sup>3</sup>Kursk State Agrarian University named after I.I. Ivanov, Kursk, the Russian Federation

**Abstract.** The article considers a rehabilitation biotechnical system with an adaptable virtual reality intended for rehabilitation of patients with impaired motor functions of the lower limbs in rehabilitation complexes with combined feedback. The biotechnical system has the following functional modules: formation of controlled effects on the patient, control of controlled effects, rehabilitation management and information support. During rehabilitation, the patient's muscle fatigue and its dynamics are monitored. This made it possible to make adjustments to the rehabilitation block program during a rehabilitation session and manage the procedure for adapting virtual reality to the patient's functional state, as well as to carry out mathematical modeling of rehabilitation course scenarios. A model for planning a rehabilitation course using biofeedback intended for a biotechnical system with virtual reality is proposed. An experimental group was formed to assess the effectiveness of rehabilitation of post-stroke patients with paretic lower limbs. The rehabilitation results in this group showed that the choice of virtual reality content adapted to the patient allows increasing the effectiveness of rehabilitation according to the LEFS scale by 11%. Experimental studies of the effectiveness of muscle fatigue control during rehabilitation have been conducted. It is confirmed by testing the statolocomotor sphere according to the Tinetti scale, the indicators of which, on average, exceeded the indicators in the comparison group by 10%. Inclusion of adaptive virtual reality and muscle fatigue monitoring in the rehabilitation process leads to earlier restoration of impaired balance function, motor activity and social rehabilitation.

**Keywords:** persons with limited mobility, biotechnical system, impaired mobility, virtual reality, biofeedback, muscle fatigue.

**For citation:** Filist S.A., Petrunina E.V., Pshenichny A.E., Ermakov D.A., Krupchatnikov R.A., Serebrovskiy V.V. Biotechnical system of personalized rehabilitation of patients with limited motor functions. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2025;13(1). (In Russ). URL: <https://moitvivr.ru/ru/journal/pdf?id=1787> DOI: 10.26102/2310-6018/2025.48.1.002

## Введение

Современные технологии виртуальной реальности (VR) предлагают новые возможности для реабилитации людей с ограниченными возможностями здоровья (ЛОВЗ). Биотехнические системы (БТС) с VR предоставляют инновационные методы восстановления физических и когнитивных функций. В области использования VR в БТС реабилитационного типа выделяют следующие основные направления:

1. Физическая реабилитация. Включает восстановление двигательных функций (ДФ).

2. Когнитивная реабилитация. Направлена на восстановление когнитивных функций, таких как память, внимание и исполнительные функции. VR-системы могут симулировать различные сценарии, требующие когнитивной активности, что способствует их восстановлению.

3. Социальная реабилитация. Включает улучшение социальных навыков и адаптацию к общественной жизни [1].

Современные модели БТС с VR используются в основном в области физической реабилитации ЛОВЗ и предоставляют инновационные методы восстановления ДФ, улучшая качество жизни пациентов. Однако для широкого внедрения этих технологий необходимо преодолеть существующие технические и экономические барьеры. Дальнейшие исследования и разработки в этой области будут способствовать созданию более доступных и эффективных решений для реабилитации.

Технологии VR значительно улучшают эффективность реабилитационного процесса и способствуют индивидуализации процесса реабилитации. Упражнения с

помощью VR могут стимулировать формирование новых нейронных связей, что помогает восстанавливать функции поврежденной зоны головного мозга [2].

БТС с VR представляют собой интеграцию биомедицинских технологий с компьютерными системами, создающими интерактивные виртуальные среды. Эти системы включают в себя сенсоры, интерфейсы мозг-компьютер, программное обеспечение для моделирования и управления виртуальными средами, а также средства обратной связи. Основная цель таких систем – улучшение качества жизни ЛОВЗ путем создания адаптивных и персонализированных реабилитационных программ [3, 4].

Хотя эффективность включения VR в реабилитационный процесс по многим специфическим причинам не всегда удается показать средствами доказательной медицины, тем не менее, имеется множество публикаций, в которых показывается перспективность интеграции VR в программы курсов реабилитации ЛОВЗ с самыми различными заболеваниями. При этом значительное внимание уделяется игровым приложениям, которые моделируют на экране VR движения, синхронизированные с воображаемыми или реальными движениями пациента. При этом указывается, что результаты реабилитации значительно повышаются при наличии биотехнических обратных связей (БТОС) [3].

Широко используемые методы физиотерапии ЛОВЗ, например, массаж, лечебная гимнастика или тренировки в экзоскелете, не позволяют пациенту в случае тяжелых нарушений ДФ активно участвовать в реабилитационной процедуре. Используя известные подходы к методикам тренировок моторных функций с соответствующими БТОС, VR включает пациента в реабилитационный процесс, тем самым интенсифицирует процесс реабилитации. Кроме того, игровые приложения мотивируют пациента в приобретении двигательных навыков, а также устраняют монотонность процедур и эффект отрицательной адаптации (привыкания) [3].

Наиболее эффективным является совмещение визуальной и тактильной стимуляции. Например, в [5] показано, что езда на велосипеде является эффективным средством реабилитации нижних конечностей (НК). Однако во время тренировок на велотренажере здоровая конечность стремится компенсировать больную, что приводит к неоптимальной реабилитации. VR позволяет решить эту проблему посредством использования соответствующих датчиков в БТОС, которые измеряют силу и скорость вращения педалей. Путем анализа данных с датчиков БТОС компьютер формирует сигналы обратной связи для управления виртуальной средой, тем самым целенаправленно тренируя больную конечность.

Для доказательства эффективности включения VR в процесс реабилитации сравнивались индексы асимметрии (ARI) в экспериментальной и контрольной группах после тренировок с использованием двусторонней педали и силоизмерительной платформы для определения эффекта от тренировок. Результаты показали, что после тренировки в виртуальной среде в двустороннем режиме сила нажатия на педаль увеличилась на 0,22 ( $p = 0,046$ ), а в силовом режиме равновесие стоя также улучшилось на 0,29 ( $p = 0,031$ ). Таким образом, оба метода оценки эффективности VR продемонстрировали значительную разницу между показателями в экспериментальной и контрольной группах [5].

Однако ряд экспериментальных исследований по восстановлению ДФ, например, в таких БТС как Sixense или YouGrabber, не обнаружил значимых различий в экспериментальных (с использованием VR) и контрольных (традиционные методы реабилитации) группах [3]. Поэтому необходимы дальнейшие исследования в области совершенствования средств БТОС и БОС, а также в области систем искусственного интеллекта, осуществляющих подбор индивидуальных стимулов, позволяющие учитывать адаптационно-компенсаторные возможности конкретного организма.

## Методы

Включение в БТС реабилитационного типа адаптивной VR и классификация функционального состояния пациентов в процессе сеанса реабилитации позволяют целенаправленно формировать паттерны электроэнцефалограммы (ЭЭГ) и электромиограммы (ЭМГ), соответствующие двигательной активности реабилитируемых конечностей, а также дает возможность совместить диагностические и терапевтические процедуры для ЛОВЗ [6].

При исследовании моторных ответов у ЛОВЗ, лицу, принимающему решение (ЛПР), доступны только ряд электрофизиологических сигналов, которые являются индикаторами реакции организма пациента на экзогенные стимулы. Учитывая, что эти сигналы крайне слабы и достаточно зашумлены, то для их возбуждения посредством экзогенных воздействий через VR необходимо вызвать «резонансные явления» между возбуждающим фактором и приемной системой. Обычно это либо периферическая, либо центральная нервная системы. В качестве экзогенных воздействий для стимулирования потенциалов двигательных единиц (ДЕ) используются зрительные образы, хранящиеся в базе данных тестовых движений БТС в виде клипов, которые ориентированы на вид нарушений ДФ и не адаптируются к функциональным и/или конституционным особенностям пациента. Для адаптации клипов к пациенту необходим критерий, который может быть получен на основе регистрации и интеллектуальной обработки медико-биологических данных, таких как артериальное давление, частота пульса, электродермальный ответ, электрокардиограммы, ЭЭГ, ЭМГ, результатов тепловизорных исследований и результатов биоимпедансных исследований [6–10].

В процессе выполненного исследования создан прототип БТС со структурой, представленной на Рисунке 1. Структурная схема прототипа БТС включает БТОС и БОС. БОС замыкается через зрительный анализатор пациента, а БТОС через блок формирования VR, входы которой соединены с выходами дешифраторов сигналов двигательной активности. На Рисунке 1 VR реализована посредством трех блоков: блока формирования VR, терминального блока VR и тактильного блока поддержки (БТП) VR, условно представленного в виде рычага с реверсивной пружиной.

Дешифраторы ЭМГ и ЭЭГ, входящие в блок БТОС, позволяют блоку формирования VR создать для пациента «адекватную» картину мира в контексте выбранной программы реабилитации. Дешифраторы ЭЭГ и ЭМГ в прототипе БТС с VR построены на полносвязных нейронных сетях прямого распространения сигнала [11, 12]. Структура и архитектура прототипа БТС обеспечивает обучение классификаторов для дешифрации ЭМГ и ЭЭГ [11, 13, 14].

Блок формирования VR выдает на терминальное устройство в виде Цели планируемые показания прилагаемого усилия. Процесс адаптации VR к пациенту заключается в том, что VR через БТОС и БОС формирует целевые указания или виртуальные усилия, соответствующие моторной реакции пациента на предыдущую Цель. Пациент должен отслеживать эти показания посредством управления рычагом БТП VR. БОС осуществляется через тактильное взаимодействие рычага с рукой пациента. При этом само усилие не измеряется, а измеряется только реакция на него ЭЭГ и ЭМГ. Дешифраторы распознают эти сигналы и передают соответствующую информацию на блок управления VR, который, в зависимости от результатов дешифрации ЭЭГ и/или ЭМГ, управляет стрелкой указателя терминального устройства, в виде Цели, которую в очередной раз считывает пациент.

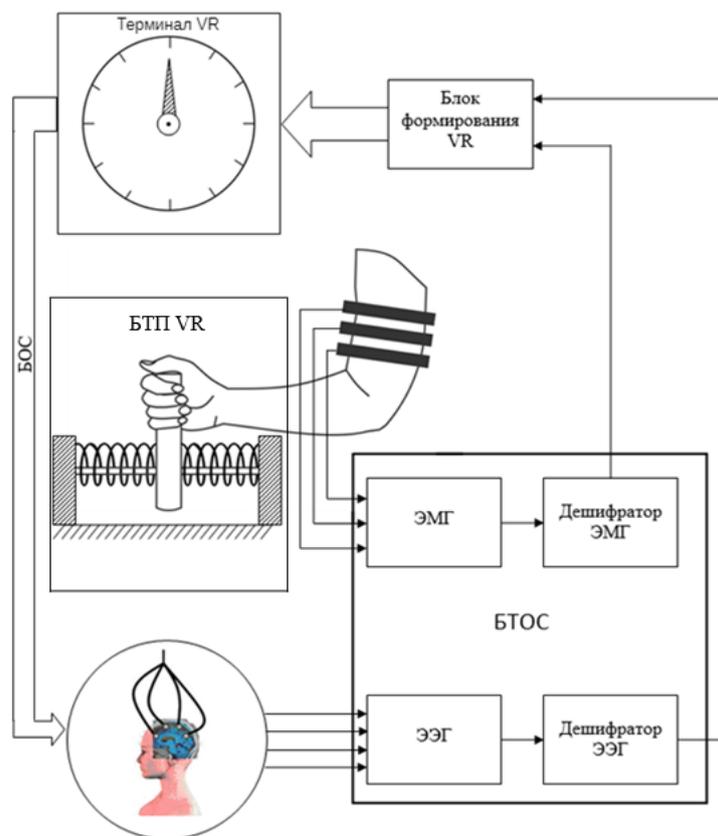


Рисунок 1 – Структурная схема прототипа биотехнической системы реабилитационного типа с адаптируемой виртуальной реальностью

Figure 1 – Structural diagram of a prototype biotechnical rehabilitation system with adaptable virtual reality

Дешифратор в блоке БТОС работает по принципу кодер-декодер. Это значит, что сначала из сырого сигнала выделяют информативные признаки, а затем эти информативные признаки поступают на обучаемый классификатор, который ставит им в соответствие (декодирует) определенное мышечное движение или потенциал ДЕ. В качестве кодера используются различные математические модели сигнала, основанные на методах спектрального анализа, вейвлет-анализа, регрессионного анализа [12, 13]. Учитывая, что время на дешифрирование ЭЭГ и ЭМГ ограничено, то предпочтение отдается кодированию сигналов во временной области [13, 14, 15].

Синхронная работа электроэнцефалографа и электромиографа, предусмотренная в прототипе БТС, позволяет создать базу данных, предназначенную для обучения и тестирования классификаторов сигналов БТОС. Это также позволяет блоку формирования VR установить и локализовать нейрофизиологические нарушения, и таким образом сформировать персонализированную программу реабилитации. Сравнивая в блоке VR дешифрованные сигналы ЭЭГ и ЭМГ, блок формирования VR задает оптимальные значения силовой нагрузки на БОС, а учитывая, что пациент не видит перемещение рычага, то VR выдает на терминал фиктивные результаты работы мышц пациента, способствующие максимальной эффективности реабилитационной процедуры.

Прототип БТС позволил разрабатывать и апробировать новые методы реабилитации и управления функциональным состоянием пациента, в основу которых были положены метод оценки мышечной усталости (МУ) стимулируемых мышц, метод

адаптации клипов VR и математические модели планирования ремиссии и регресса в процессе реабилитации [16–18].

Структурная схема биотехнической системы, в которой реализованы все вышеупомянутые методы и соответствующая вышеописанному прототипу, представлена на Рисунке 2. Функционально в БТС можем выделить пациента, ЛПР, функциональные модули: формирования управляемых воздействий на пациента 1, контроля управляющими воздействиями 2, управления реабилитацией 3 и информационной поддержки 4.

В начале программы реабилитации ЛПР изучает анамнез пациента и подбирает из базы программ реабилитации соответствующую адекватную программу реабилитации. В соответствии с выбранной программой реабилитации ЛПР формирует структуру блока управления реабилитацией, включая пациента в необходимые биотехнические и биологические обратные связи (функциональный модуль 3).

ЛПР, при необходимости, в зависимости от анамнеза пациента и выбранной программы реабилитации, осуществляет корректировку блока определения текущего функционального состояния (ФС) пациента. В функциональном модуле 1 формируется программа реабилитации, которая осуществляется блоком реабилитации. Если выбранная программа реабилитации предполагает использование VR, то подключается блок VR, который может комплектоваться, если это предусмотрено, блоком адаптации VR и блоком физической поддержки VR [16].

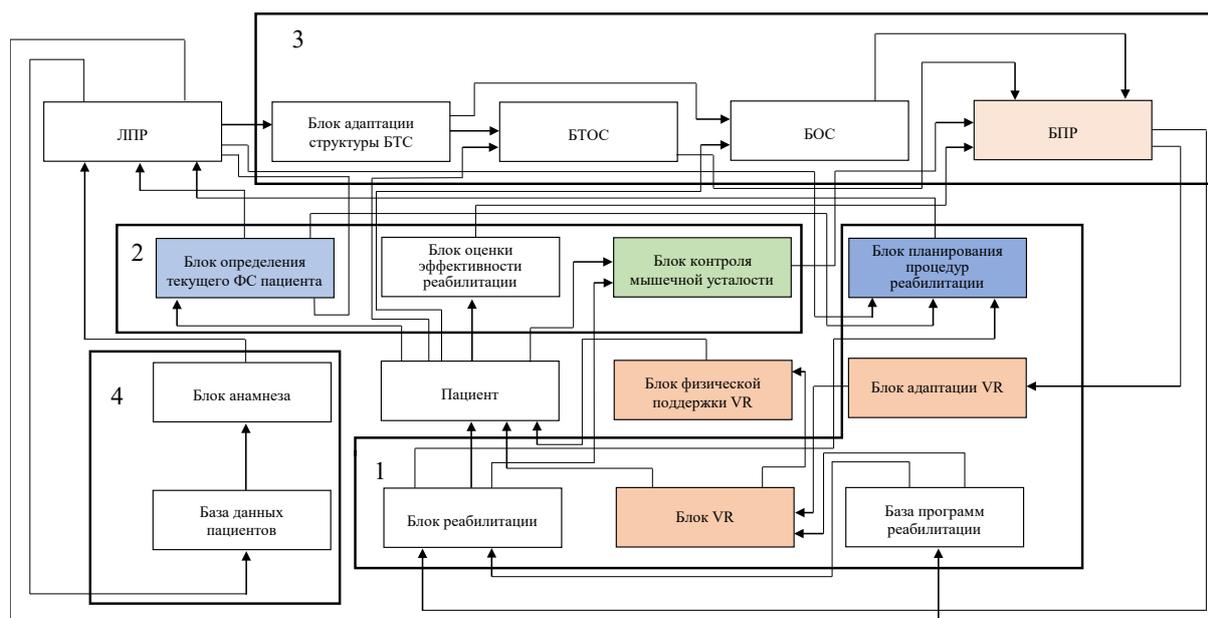


Рисунок 2 – Структурная схема биотехнической системы для персонализированной реабилитации пациентов с нарушением двигательных функций

Figure 2 – Structural diagram of a biotechnical system for personalized rehabilitation of patients with impaired motor functions

В процессе предъявления пациенту контента клипов VR, стимулирующих воображение движения паретичной конечностью, осуществляется контроль воображения движения пациентом. Контроль ведется путем анализа паттернов электрофизиологических сигналов, связанных с двигательной активностью паретичной конечности. Контент клипов VR адаптируют к конкретному пациенту путем оценки введенного критерия – рейтинга клипа. Анализ рейтинга клипов позволяет сформировать контент VR, адаптированный к пациенту [16]. Блок физической поддержки VR

предусматривает дополнительные физические воздействия на пациента, поддерживающие реальность VR на тактильном и вербальном уровнях.

Функциональный модуль 2 обеспечивает соответствующей информацией блок адаптации VR и, при необходимости, вносит корректировки в программу реабилитации в блоке реабилитации. Если программа реабилитации предусматривает контроль МУ, то есть в процессе реабилитации пациент выполняет физические нагрузки или имеет место функциональная электростимуляция (ФЭС), то блок реабилитации подключает к пациенту блок контроля МУ [17].

Функциональный модуль 3 обеспечивает формирование управляющих команд, предназначенных для управления процессом реабилитации, и взаимодействует на командном уровне с блоком реабилитации и блоком адаптации VR [6, 12, 18]. Пример структуры этого блока представлен на Рисунке 3.

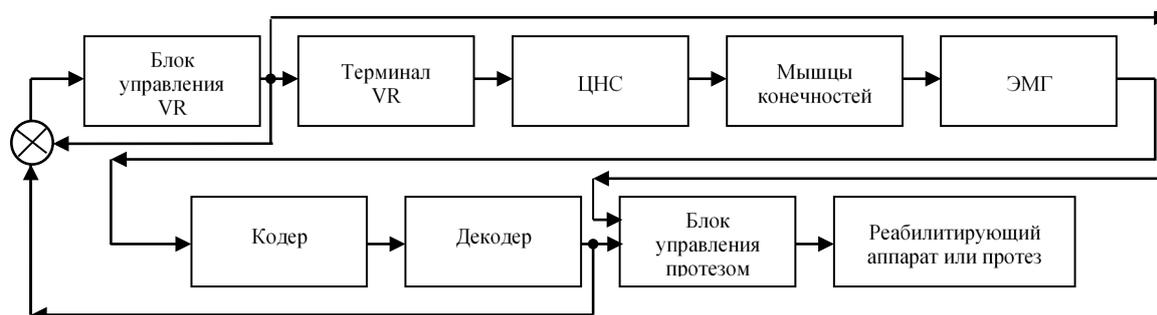


Рисунок 3 – Структурная схема блока управления процессом реабилитации в биотехнической системе с виртуальной реальностью

Figure 3 – Structural diagram of the control unit for the rehabilitation process in a biotechnical system with virtual reality

Блок управления процессом реабилитации (Рисунок 3) работает следующим образом. При взаимодействии пациента с терминалом VR происходит возбуждение моторного ответа в центральной нервной системе (ЦНС). При этом генерируется потенциал ДЕ той или иной величины (или совсем не генерируется). Сигнал ДЕ фиксируется устройством считывания ЭМГ, декодируется в блоках кодер-декодер и сравнивается с заданным в блоке управления VR. В зависимости от результатов этого сравнения осуществляется коррекция контента VR (выхода блока управления VR), поступающего на терминальные устройства пациента (терминал VR), выход которого соответствует следующему воображаемому движению [6, 11, 14, 16]. Кроме того, если потенциалы ДЕ управляют устройством реабилитации или протезом, то в блоке управления протезом осуществляется сравнение сигналов блока управления VR и декодера, по результатам которого формируются управляющие сигналы на реабилитирующий аппарат или протез [18].

В функциональном модуле 4 БТС (Рисунок 2) осуществляется информационная поддержка программы реабилитации. Он помогает ЛПР подобрать адекватную программу реабилитации для конкретного пациента, исходя из его анамнеза и построенной модели прогноза эффективности реабилитации [18]. В его состав входят база данных пациентов, блок анамнеза, который является, по существу, буфером между ЛПР и базой данных пациентов, и блок планирования процедуры реабилитации, который позволяет ЛПР адаптировать процедуру реабилитации к показателям анамнеза пациента, а также построить математическую модель курса реабилитации, которая позволяет ЛПР прогнозировать эффективность процесса реабилитации и выбрать оптимальные

настраиваемые параметры экзогенных воздействий на пациента, которые обеспечивали бы максимальную эффективность процедуры реабилитации [11, 18].

Блок планирования процедур реабилитации с использованием адаптируемой VR входит в БТС, структура которой представлена на Рисунке 2. В основу планирования и управления реабилитационными процедурами положен контроль регулируемого физиологического параметра (РФП), измеряемая величина которого позволяет оценить текущее функциональное состояние (ФС) реабилитируемого органа. Для измерения РФП используются различные аппаратные средства и специальное программное обеспечение. Посредством БОС осуществляется синхронизация динамики РФП и стимулов, воздействующих на сенсоры пациента. Надежный контроль динамики РФП позволяет построить математическую модель, определяющую зависимость изменения РФП от параметров программы реабилитации (величины нагрузки или времени экспозиции). В качестве РФП используем показатель среднеквадратического значения RMS (root mean square) в ЭМГ.

Курс реабилитации состоит из  $N$  сеансов длительностью  $S$  от 10 до 30 минут, частотой – 1...3 раза в неделю. Перед началом каждого сеанса реабилитации регистрируется «нулевой уровень» РФП ( $BL = X_0$ ), по окончании – посттренинговый  $PL$  (Рисунок 4). В процессе курса реабилитации ДФ восстанавливаются и после достаточного большого количества сеансов реабилитации они приближаются к пределу насыщения (максимально возможному показателю РФП)  $X^*$ . Но в перерывах между сеансами  $P$  имеет место регресс ДФ, описываемый функцией регресса  $F$ , возрастающей по экспоненциальному закону от нуля до единицы [11, 18].

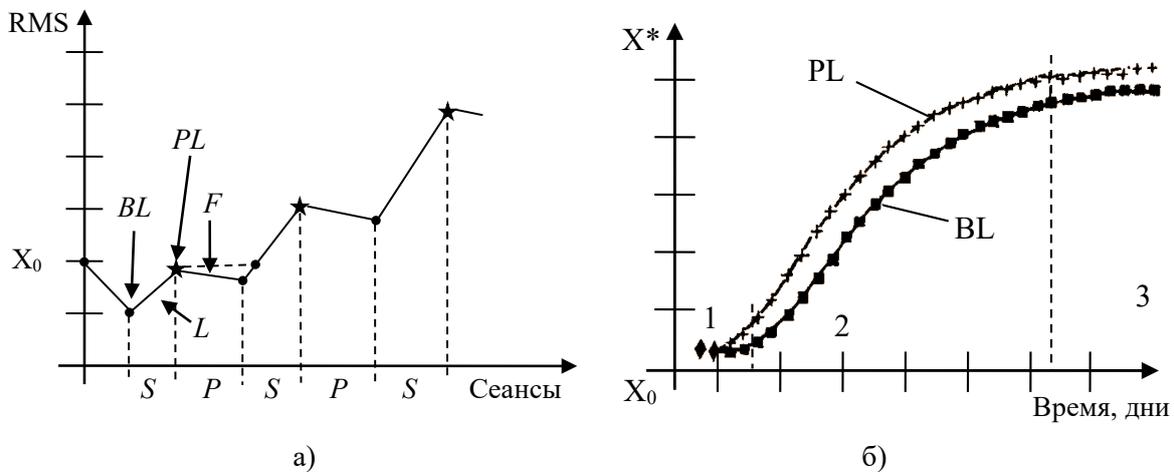


Рисунок 4 – Динамика регулируемого физиологического показателя в процессе сеансов реабилитации: в процессе сеанса реабилитации (а), в процессе курса реабилитации (б)

Figure 4 – Dynamics of regulated physiological parameter during rehabilitation sessions: during rehabilitation session (a), during rehabilitation course (b)

Математическая модель реабилитации на  $k$ -м сеансе  $X_k \rightarrow Y_k$  описывается с помощью «функции ремиссии»  $L$  и «функции регресса»  $F$  и может быть представлена уравнениями

$$Y_k = X_k + L(k, T_k, T_{k+1}), \quad (1)$$

$$X_{k+1} = Y_k \cdot F(k, T_k, T_{k+1}), \quad (2)$$

$$F(k, T_k, T_{k+1}) = 1 - \exp(-a(T_{k+1} - T_k)/k), \quad (3)$$

$$Y_k = \min(M, X_k + L(k)), \quad (4)$$

где  $k$  – номер сеанса ( $k = 1, \dots, N$ );  $T_k$  – момент начала  $k$ -го сеанса;  $X_k$  – дискретный отсчет уровня РФП  $X(t)$  в произвольный момент времени  $t$  перед  $k$ -м сеансом;  $Y_k$  – посттренинговый уровень РФП;  $M$  – параметр, определяющий предельные возможности реабилитации пациента за один сеанс [7, 14].

Уравнения (1)–(4) составляют основу математической модели динамики РФП в курсе реабилитации. Из уравнений (1)–(4) и свойств функций  $F$  и  $L$  следует, что значения РФП перед сеансом реабилитации  $X_k$  и после сеанса реабилитации  $Y_k$  ограничены и снизу, и сверху, как это представлено на Рисунке 4б графиками  $PL(t)$  и  $BL(t)$ , которые представляют математическую модель реабилитации. Динамика РФП в курсе реабилитации описывается S-образной кривой (Рисунок 4б), на которой выделены три фазы реабилитации: 1 – начальное плато (характеризует инерционность процесса реабилитации), 2 – этап эффективной реабилитации, 3 – этап неэффективной реабилитации [11, 18].

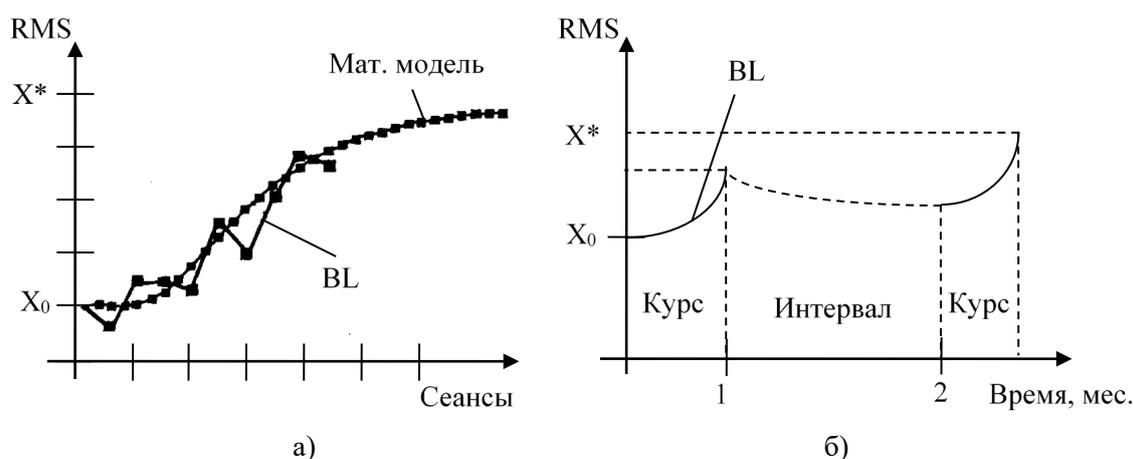


Рисунок 5 – Прогноз текущего курса реабилитации (а) и прогноз следующего курса реабилитации (б)

Figure 5 – Forecast of the current rehabilitation course (a) and forecast of the next rehabilitation course (b)

Математическая модель, представленная уравнениями (1)–(4), позволяет делать прогноз текущего курса реабилитации (Рисунок 5а), планировать количество и длительность сеансов в курсе, и интенсивность нагрузок в сеансах (Рисунок 5б). Параметры модели оцениваются по методу наименьших квадратов, вычислительная процедура организована по методу Марквардта [11, 18].

## Результаты

Для оценки клинической эффективности реабилитации больных с парезом НК посредством предложенной БТС, включающей блок VR с формированием персонализированного контента VR, были проведены экспериментальные исследования. Исследование удовлетворяли требованиям Международного стандарта качества научных исследований (Good Clinical Practice). Для проведения эксперимента были сформированы экспериментальная группа и контрольная группа сравнения, в которые вошли по двадцать пациентов. Критериями включения пациента в исследование являлись: возраст от 30 до 65 лет, первичный инсульт головного мозга (ГМ) по ишемическому типу, временной интервал не ранее 3 месяцев и не позднее 4 месяцев с момента возникновения ишемического инсульта (ИИ). Нарушения ДФ оценивались по шкале оценки мышечной силы Британского совета медицинских исследований (это

пятибалльная шкала, в которой оценка ноль соответствует полному отсутствию движения конечности, а оценка «пять» – способности поднимать конечность против небольшого сопротивления) [1]. Мышечная сила по этой шкале у пациентов, с нарушением ДФ в НК в виде центрального пареза, включенных в экспериментальную группу, не превышала трех баллов по этой шкале. Очаг ИИ подтверждался по данным компьютерной томографии ГМ.

Все пациенты, включенные в исследование, получали медикаментозное лечение согласно стандарту оказания специализированной помощи при ИИ. Дополнительно к стандартному лечению пациенты обеих групп проходили реабилитационные процедуры на беговой дорожке в условиях VR. Реабилитация с использованием VR проводилась в условиях кабинета реабилитации. Пациенты контрольной группы получали только стандартный пул клипов VR. У пациентов экспериментальной группы клипы адаптировались под конкретного пациента, проходящего реабилитацию, согласно методу, изложенному в [16]. Фотография прохождения сеанса реабилитации в БТС с VR пациентом с нарушением ДФ НК представлена на Рисунке 6.

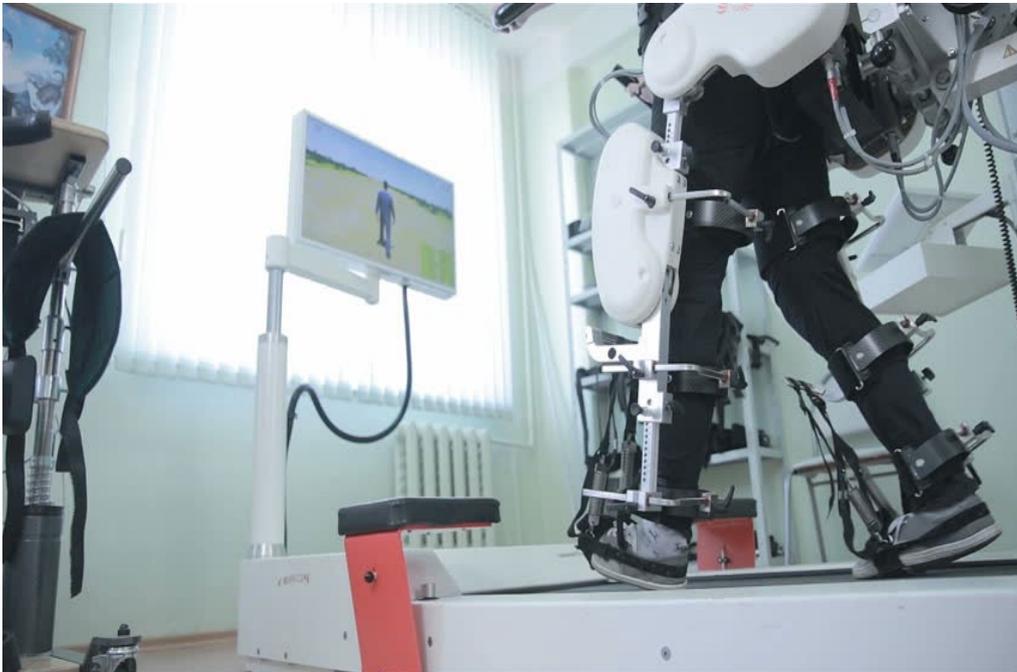


Рисунок 6 – Пример прохождения сеанса реабилитации в биотехнической системе с виртуальной реальностью с блоком тактильной поддержки пациентом с нарушением двигательных функций нижних конечностей

Figure 6 – An example of a rehabilitation session in a biotechnical system with virtual reality and a tactile support unit by a patient with impaired motor functions of the lower extremities

Продолжительность курса в обеих группах составляла 12 сеансов по 15 минут. При сеансе реабилитации в обеих группах использовалось сенсорное взаимодействие с VR, а также посредством блока тактильной поддержки VR осуществлялось подтверждение совершаемого шага посредством воздействия на подошвенную поверхность стоп с помощью надуваемых компрессоров многокамерных манжет (Рисунок 6).

Для сравнительной оценки эффективности реабилитации в экспериментальной и контрольной группах использовалась методика LEFS, которая представляет собой анкету, содержащую 20 вопросов о способности человека выполнять повседневные задачи. LEFS используется клиницистами в качестве меры исходного состояния

пациентов, текущего прогресса и исхода, а также для постановки функциональных целей. LEFS можно использовать для оценки функционального нарушения у пациента с поражением одной или обеих НК. Его используют для наблюдения за пациентом с течением времени и для оценки эффективности реабилитационной процедуры [19]. Минимальное обнаруживаемое изменение (MDC) составило 9 пунктов шкалы. Минимальная клинически значимая разница (MCID) составляет 9 баллов по шкале. Процент максимальной функции определялся как:

$$\% \text{ максимальной функции} = (\text{оценка LEFS}) / 80 \times 100. \quad (5)$$

Исследование показало, что различие в улучшении ДФ НК между экспериментальной и контрольной группами статистически значимо ( $p=0,02$ ). Результаты оценки динамики ДФ НК в процессе реабилитации у пациентов экспериментальной группы и группы сравнения представлены в Таблице 1.

Таблица 1 – Результаты оценки двигательной функции нижних конечностей по шкале LEFS до и после реабилитации

Table 1 – Results of the assessment of the motor function of the lower extremities according to the LEFS scale before and after rehabilitation

	До	После	P
Экспериментальная группа	40 [10;55]	50 [20;60]	0,01
Контрольная группа	35 [10;45]	40 [10;50]	0,05

Полученные данные позволяют сделать вывод, что выбор контента VR, адаптированный к пациенту, позволяет повысить эффективность реабилитации по шкале LEFS на 11 %. Таким образом, для обоснованного выбора методов лечения и эффективных технологий реабилитации целесообразно персонализированный подбор контента VR.

Для экспериментального исследования эффективности метода адаптивной реабилитации с контролем МУ была создана экспериментальная группа из 70 пациентов (30 женщины и 40 мужчин) в позднем восстановительном периоде ИИ, в возрасте от 43 года до 70 лет (средний возраст  $58,4 \pm 6,4$  года) способных самостоятельно (без опоры) сохранять равновесие при стоянии не менее 2 мин, а также отсутствие других показателей здоровья, препятствующих проведению исследования [20, 21]. Все пациенты, участвующие в эксперименте, подписали информированное согласие, а также были проверены сертифицированным физиотерапевтом на соответствие критериям, позволяющим включить их в эксперимент. Экспериментальные исследования проводились в отделении медицинской реабилитации клинического научно-медицинского центра «Авиценна» г. Курск с декабря 2022 года по декабрь 2023 года.

К основным методам реабилитации при нарушении ДФ относятся дозированная физическая нагрузка и ФЭС [21]. В целях закрепления функциональных связей и формирование необходимых двигательных навыков эти методы использовались совместно с VR [21]. Как тот, так и другой метод нуждаются в мониторинге ФС пациента в процессе проведения реабилитационной процедуры, который позволяет ЛПР внести коррективы в программу реабилитации. Одним из методов управления программой реабилитации является контроль МУ мышц, которые в процессе сеанса реабилитации подвержены тестовой нагрузке или ФЭС.

Пациентов, участвующих в эксперименте, разделили на основную группу и контрольную группу. В основную группу включили 46 пациентов с ИИ, которым в стандартную схему реабилитации был включен контроль МУ. В группу сравнения вошли 24 пациента с ИИ, план реабилитации которых не предусматривал контроля МУ

и коррекции программы реабилитации и/или ФЭС. Основная группа и группа сравнения были сопоставимы по возрастному-половому составу и клиническим проявлениям.

Для реабилитации постинсультных больных использовался интеллектуальный комплекс Траст-М. На фотографии (Рисунок 7) представлен процесс реабилитации посредством этого комплекса пациента с нарушениями ДФ НК [20].



Рисунок 7 – Фотография процесса реабилитации нижних конечностей на комплексе Траст-М  
Figure 7 – Photograph of the process of rehabilitation of the lower limbs on the Trust-M complex

Комплекс позволяет выполнять ФЭС мышц непосредственно во время ходьбы (НК и туловище). Для улучшения мотивации больного при выполнении реабилитационных процедур комплекс оснащен VR с БТОС и БОС. Датчики ЭМГ устанавливались на НК пациента согласно примеру, представленному на Рисунке 7. В процессе движения пациента по беговой дорожке анализируется информация с датчиков ЭМГ посредством имеющихся в программном пакете средств и по результатам этого анализа корректировались скорость передвижения пациента по беговой дорожке и выбор мышц для стимуляции и программа стимуляции. Длительность тренировки составляла 20-30 мин, продолжительность курса – 15 занятий (три раза в неделю, пять недель) [20].

До начала курса реабилитации пациенты в экспериментальной и контрольной группах были обследованы по стандартным методикам. Аналогичные обследования проводились в течение курса реабилитации. Физикальные исследования проводились перед каждым сеансом реабилитации [20, 21]. Достоверность различий в результатах реабилитации определяли с помощью t-теста Стьюдента и методов непараметрической статистики (критерий  $\chi^2$ ). Различия считали статистически значимыми при  $p < 0,05$ .

При повторном осмотре у пациентов обеих групп наблюдали положительную динамику. В качестве примера в Таблице 2 приведены показатели скорости ходьбы (в секундах) в контрольных точках при проведении теста на прохождение 10 м у пациентов основной группы и группы сравнения.

Таблица 2 – Время (в секундах) выполнения теста прохождения 10 м ( $M \pm m$ ) у пациентов экспериментальной группы в контрольных точках курса реабилитации  
Table 2 – Time (in seconds) for completing the 10 m walk test ( $M \pm m$ ) in patients of the experimental group at the control points of the rehabilitation program

Срок наблюдения	Основная группа (n = 46)		Группа сравнения (n = 24)	
	В обычном темпе	В максимально возможном темпе	В обычном темпе	В максимально возможном темпе
До курса реабилитации	74,6±6,8	68,5±4,9	71,75±8,6	66,4±5,5
Через три недели	70,8±5,9	62,4±5,8	66,50±7,2	62,5±8,3
Через пять недель	55,8±6,1*	52,7±5,6	60,45±8,4	56,8±5,8

\* – отличия по сравнению с исходным уровнем статистически значимы ( $p < 0,05$ ).

По окончании курса реабилитации все пациенты были протестированы по Шкале оценки двигательной активности Тинетти, которая позволяет стратифицировать пациентов на четырехдиапазонной 24-балльной шкале. При степени двигательных нарушений в диапазоне от 0 до 10 определялись значительно выраженные нарушения устойчивости, от 11 до 21 – определялась умеренная выраженность двигательных нарушений, 21–22 баллов – легкая степень нарушений и от 23 до 24 – норма. Тестирование показало, что у пациентов основной группы легкие и умеренные статолокомоторные нарушения выявлены в 49,3 и 10,1 % случаев, соответственно. У 30 % пациентов основной группы не зарегистрировано нарушений ДФ НК. В группе сравнения эти показатели составили 57, 13 и 20 %, соответственно. Таким образом, эффективность контроля МУ в БТС реабилитационного типа подтверждается тестированием статолокомоторной сферы по шкале Тинетти, показатели которой в основной группе, в среднем, на 10 превышают аналогичные показатели в группе сравнения.

### Заключение

1. Разработана биотехническая система, предназначенная для реабилитации пациентов с нарушением двигательных функций нижних конечностей в реабилитационных комплексах с комбинированными обратными связями и позволяющая в процессе реабилитации осуществлять контроль мышечной усталости пациента и его динамику, вносить коррекцию в блок реабилитации и управлять процедурой адаптации виртуальной реальности к функциональному состоянию пациента, а также осуществлять математическое моделирование сценариев курса реабилитации.

2. Разработана структурная схема блока управления процедурой реабилитации, позволяющая вносить коррекцию в блок реабилитации и управлять процедурой адаптации виртуальной реальности к функциональному состоянию пациента.

3. Предложен блок планирования процедур реабилитации, позволяющий осуществлять математическое моделирование сценариев курса реабилитации, основанное на понятии функций «ремиссия» и «регресс».

4. На примере БТС-тренинга постинсультных больных с паретичными нижними конечностями сделан вывод, что выбор контента виртуальной реальности, адаптированной к конкретному пациенту в экспериментальной группе, позволяет повысить эффективность реабилитации по шкале LEFS на 11 % по сравнению с контрольной группой. Таким образом, показано, что для обоснованного выбора эффективных технологий реабилитации целесообразно персонифицированный подбор контента виртуальной реальности.

5. Проведены сравнительные стабилметрические исследования биотехнической системы с виртуальной реальностью с включенным и выключенным блоком контроля мышечной усталости. Экспериментальные исследования продемонстрировали эффективность включения в процесс реабилитации мониторинга мышечной усталости, что подтверждено тестированием статолокомоторной сферы по шкале Тинетти, показатели которой в основной группе, в среднем, на 10 % превысили показатели в контрольной группе.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

1. Повереннова И.Е., Захаров А.В., Хивинцева Е.В., Пятин В.Ф., Колсанов А.В., Чаплыгин С.С., Осминина Е.А., Лахов А.С. Предварительные результаты исследования эффективности использования методики виртуальной реальности для восстановления двигательной функции нижних конечностей у пациентов в остром периоде инсульта. *Саратовский научно-медицинский журнал*. 2019;15(1):172–176.  
Poverennova I.E., Zakharov A.V., Khivintseva E.V., Pyatin V.F., Kolsanov A.V., Chaplygin S.S., Osminina E.A., Lahov A.S. Preliminary results of study on efficacy of a virtual reality technique for restoration of lower extremity motor function in patients in acute stage of stroke. *Saratov Journal of Medical Scientific Research*. 2019;15(1):172–176. (In Russ.).
2. Кунельская Н.Л., Иванова Г.Е., Байбакова Е.В., Гусева А.Л., Парфенов В.А., Замерград М.В., Зайцева О.В., Мельников О.А., Шмонин А.А., Мальцева М.Н. Вестибулярная реабилитация при периферической вестибулярной гиподисфункции: междисциплинарный консенсус. *Вестник оториноларингологии*. 2024;89(1):52–63.  
Kunelskaya N.L., Ivanova G.E., Baybakova E.V., Guseva A.L., Parfenov V.A., Zamergrad M.V., Zaitseva O.V., Melnikov O.A., Shmonin A.A., Maltseva M.N. Vestibular rehabilitation for peripheral vestibular hypofunction: an interdisciplinary consensus. *Russian Bulletin of Otorhinolaryngology*. 2024;89(1):52–63. (In Russ.).
3. Воловик М.Г., Борзиков В.В., Кузнецов А.Н., Базаров Д.И., Полякова А.Г. Технологии виртуальной реальности в комплексной медицинской реабилитации пациентов с ограниченными возможностями (обзор). *Современные технологии в медицине*. 2018;10(4):173–182. <https://doi.org/10.17691/stm2018.10.4.21>  
Volovik M.G., Borzikov V.V., Kuznetsov A.N., Bazarov D.I., Polyakova A.G. Virtual Reality Technology in Complex Medical Rehabilitation of Patients with Disabilities (Review). *Modern Technologies in Medicine*. 2018;10(4):173–182. (In Russ.). <https://doi.org/10.17691/stm2018.10.4.21>
4. Запесоцкая И.В., Николаенко Р.В., Чуйкова Ж.В. Современные технологии и перспективы использования виртуальной реальности для реабилитации двигательных нарушений. *Коллекция гуманитарных исследований*. 2020;(1):31–35. [https://doi.org/10.21626/j-chr/2020-1\(22\)/4](https://doi.org/10.21626/j-chr/2020-1(22)/4)  
Zapesotskaya I.V., Nikolayenko R.V., Chuikova Zh.V. Modern technologies and development using virtual reality for the rehabilitation of motor disorders. *The Collection of Humanitarian Studies*. 2020;(1):31–35. (In Russ.). [https://doi.org/10.21626/j-chr/2020-1\(22\)/4](https://doi.org/10.21626/j-chr/2020-1(22)/4)
5. Yin C., Hsueh Y.-H., Yeh C.-Y., Lo H.-C., Lan Y.-T. A Virtual Reality-Cycling Training System for Lower Limb Balance Improvement. *BioMed Research International*. 2016;2016. <https://doi.org/10.1155/2016/9276508>
6. Трифонов А.А., Петрунина Е.В., Филист С.А., Кузьмин А.А., Жилин В.В. Биотехническая система с виртуальной реальностью в реабилитационных комплексах с искусственными обратными связями. *Известия Юго-Западного*

- государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2019;9(4):49–66.
- Trifonov A.A., Petrunina E.V., Filist S.A., Kuzmin A.A., Zhilin V.V. Biotechnical System with Virtual Reality in Rehabilitation Complexes with Artificial Feedback. *Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*. 2019;9(4):49–66. (In Russ.).
7. Мирошников А.В., Шаталова О.В., Стадниченко Н.С., Шульга Л.В. Классификации биологических объектов на основе многомерного биоимпедансного анализа. *Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение*. 2020;10(3/4):29–49.
- Miroshnikov A.V., Shatalova O.V., Stadnichenko N.S., Shulga L.V. Classifications of Biological Objects Based on Multi-Dimensional Bioimpedance Analysis. *Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*. 2020;10(3/4):29–49. (In Russ.).
8. Шаталова О.В. Итерационная многопараметрическая модель биоимпеданса в экспериментах in vivo. *Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение*. 2019;9(1):26–38.
- Shatalova O.V. Iteration multiparameter model of bioimpedance in vivo experiments. *Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*. 2019;9(1):26–38. (In Russ.).
9. Мирошников А.В., Шаталова О.В., Ефремов М.А., Стадниченко Н.С., Новоселов А.Ю., Павленко А.В. Алгоритм оптимизации модели Войта в классификаторах функционального состояния живых систем. *Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение*. 2022;12(2):59–75.
- Miroshnikov A.V., Shatalova O.V., Efremov M.A., Stadnichenko N.S., Novoselov A.Yu., Pavlenko A.V. Method for Classification of the Functional State of Living Systems Based on Recurrent Voigt Models. *Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*. 2022;12(2):59–75. (In Russ.).
10. Комлев И.А., Шаталова О.В., Дегтярев С.В., Серебровский А.В. Прогнозирование и оценка степени тяжести ишемии сердца на основе гибридных нечётких моделей. *Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение*. 2019;9(1):133–145.
- Komlev I.A., Shatalova O.V., Degtyaryov S.V., Serebrovskiy A.V. Prediction and assessment of severity of cardiac ischemia, based on hybrid fuzzy models. *Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*. 2019;9(1):133–145. (In Russ.).
11. Петрунина Е.В., Томакова Р.А., Филист С.А. Гибридные методы и модели для биотехнических систем с адаптивным управлением диагностическими и реабилитационными процессами. Курск: Юго-Западный государственный университет; 2022. 249 с.
12. Филист С.А., Трифонов А.А., Кузьмин А.А., Петрунина Е.В., Шехине М.Т. Адаптивная биотехническая система с роботизированным устройством для восстановления двигательных функций нижних конечностей постинсультных больных. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2021;9(3). <https://doi.org/10.26102/2310-6018/2021.34.3.022>

- Filist S.A., Trifonov A.A., Kuzmin A.A., Petrunina E.V., Shekhine M.T. Adaptive biotechnical system with a robotic device for the restoration of motor functions of the lower extremities in post-stroke patients. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2021;9(3). (In Russ.). <https://doi.org/10.26102/2310-6018/2021.34.3.022>
13. Филист С.А., Петрунина Е.В., Трифонов А.А., Серебровский А.В. Кодовые образы сигналов электроэнцефалограммы для управления робототехническими устройствами посредством интерфейса мозг-компьютер. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2019;7(1). <https://doi.org/10.26102/2310-6018/2019.24.1.025>  
Philist S.A., Petrunina E.V., Trifonov A.A., Serebrovsky A.V. Code images of electric cell information signal signals for controlling robot-technical devices by means of brain-computer interface. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2019;7(1). (In Russ.). <https://doi.org/10.26102/2310-6018/2019.24.1.025>
14. Трифонов А.А., Филист С.А., Кузьмин А.А., Жилин В.В., Петрунина Е.В. Двухуровневая нейросетевая модель дешифратора электромиосигнала в системе управления вертикализацией экзоскелета. *Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии*. 2020;(4):99–111.  
Trifonov A.A., Filist S.A., Kuzmin A.A., Zhilin V.V., Petrunina E.V. Two-level neural network model of electromiosignal decoder in exoscelete verticalization control system. *Prikaspiiskii zhurnal: upravlenie i vysokie tekhnologii*. 2020;(4):99–111. (In Russ.).
15. Трифонов А.А., Филист С.А., Петрунина Е.В., Кузьмин А.А., Сафронов Р.И., Крикунова Е.В. Метод и алгоритмы декодирования электрофизиологических сигналов в биотехнических системах реабилитационного типа. *Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение*. 2021;11(3):48–77.  
Trifonov A.A., Philist S.A., Petrunina E.V., Kuzmin A.A., Safronov R.I., Krikunova E.V. Method and Algorithms for Decoding Electrophysiological Signals in Biotechnical Systems of Rehabilitation Type. *Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*. 2021;11(3):48–77. (In Russ.).
16. Филист С.А., Пшеничный А.Е., Шаталова О.В., Сафронов Р.И., Петрунина Е.В., Ермаков Д.А. Способ реабилитации пациентов с нарушением двигательной активности с использованием персонифицированного контента клипов виртуальной реальности. Патент Российская Федерация, № 2830938. 2024.
17. Herrera V.A.S., Romero J.F.A., Moreno M.A. Algorithm of detection and alert of muscle fatigue in paraplegic patients, by Digital Signal Processing of Surface Electromyogram. In: *IWSSIP 2010 – 17th International Conference on Systems, Signals and Image Processing, 17–19 June 2010, Rio de Janeiro, Brazil*. Rio de Janeiro: Fluminense Federal University; 2010. pp. 530–533.
18. Трифонов А.А., Петрунина Е.В., Кузьмин А.А., Протасова З.У., Лазурина Л.П. Методы и средства обеспечения реабилитационных процедур посредством биотехнической системы с биологической обратной связью и модулем нечеткого управления. *Системный анализ и управление в биомедицинских системах*. 2021;20(3):71–83. <https://doi.org/10.36622/VSTU.2021.20.3.010>  
Trifonov A.A., Petrunina E.V., Kuzmin A.A., Protasova Z.U., Lazurina L.P. Methods and means of providing rehabilitation procedures through a biotechnical system with biological feedback and a fuzzy control module. *Sistemnyi analiz i upravlenie v biomeditsinskikh sistemakh*. 2021;20(3):71–83. (In Russ.). <https://doi.org/10.36622/VSTU.2021.20.3.010>

19. Binkley J.M., Stratford P.W., Lott S.A., Riddle D.L. The Lower Extremity Functional Scale (LEFS): scale development, measurement properties, and clinical application. North American Orthopaedic Rehabilitation Research Network. *Physical Therapy*. 1999;79(4):371–383.
20. Костенко Е.В., Петрова Л.В., Рыльский А.В., Энеева М.А. Эффективность коррекции постинсультных двигательных нарушений с применением методов функциональной электростимуляции и БОС-стабилометрического постурального контроля. *Журнал неврологии и психиатрии*. 2019;119(1):23–30. <https://doi.org/10.17116/jnevro201911901123>  
Kostenko E.V., Petrova L.V., Rylsky A.V., Eneeva M.A. Effectiveness of correction of post-stroke motor disorders using the methods of functional electrostimulation and BFB-stabilometric postural control. *Journal of Neurology and Psychiatry*. 2019;119(1):23–30. (In Russ.). <https://doi.org/10.17116/jnevro201911901123>
21. Евсеев С.П., Курдыбайло С.Ф., Малышев А.И., Герасимова Г.В., Потапчук А.А., Поляков Д.С. *Физическая реабилитация инвалидов с поражением опорно-двигательной системы*. Москва: Советский спорт; 2010. 488 с.

### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Филист Сергей Алексеевич**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры биомедицинской инженерии, Юго-Западный государственный университет, Курск, Российская Федерация.  
*e-mail*: [SFilist@gmail.com](mailto:SFilist@gmail.com)  
ORCID: [0000-0003-1358-671X](https://orcid.org/0000-0003-1358-671X)

**Sergey A. Filist**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of The Department of Biomedical Engineering, Southwest State University, Kursk, the Russian Federation.

**Петрунина Елена Валерьевна**, кандидат технических наук, доцент, Московский политехнический университет, Москва, Российская Федерация.  
*e-mail*: [petrunina@mggeu.ru](mailto:petrunina@mggeu.ru)  
ORCID: [0000-0003-3661-0778](https://orcid.org/0000-0003-3661-0778)

**Elena V. Petrunina**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Moscow Polytechnic University, Moscow, the Russian Federation.

**Пшеничный Александр Евгеньевич**, аспирант кафедры биомедицинской инженерии, Юго-Западный государственный университет, Курск, Российская Федерация.  
*e-mail*: [pshenichniy.ae1976@gmail.com](mailto:pshenichniy.ae1976@gmail.com)  
ORCID: [0009-0007-0861-1016](https://orcid.org/0009-0007-0861-1016)

**Alexander E. Pshenichny**, Postgraduate Student, the Department of Biomedical Engineering, Southwest State University, Kursk, the Russian Federation.

**Ермаков Дмитрий Андреевич**, аспирант кафедры биомедицинской инженерии, Юго-Западный государственный университет, Курск, Российская Федерация.  
*e-mail*: [dmitriyermakov98@yandex.ru](mailto:dmitriyermakov98@yandex.ru)  
ORCID: [0009-0003-9426-7741](https://orcid.org/0009-0003-9426-7741)

**Dmitrii A. Ermakov**, graduate student of the Department of Biomedical Engineering, Southwest State University, Kursk, the Russian Federation.

**Крупчатников Роман Анатольевич**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры стандартизации и оборудования перерабатывающих производств, Курский государственный аграрный университет

**Roman A. Krupchatnikov**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Standardization and Equipment for Processing Industries, Kursk

имени И.И. Иванова, Курск, Российская Федерация. State Agrarian University named after I.I. Ivanov, Kursk, the Russian Federation.

*e-mail:* [roman0406@yandex.ru](mailto:roman0406@yandex.ru)

ORCID: [0000-0000-0002-4951-8607](https://orcid.org/0000-0000-0002-4951-8607)

**Серебровский Вадим Владимирович, Vadim V. Serebrovskiy**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Southwest State University, Kursk, the Russian Federation.

*e-mail:* [SV1111@mail.ru](mailto:SV1111@mail.ru)

ORCID: [0000-0002-1923-3862](https://orcid.org/0000-0002-1923-3862)

*Статья поступила в редакцию 21.12.2024; одобрена после рецензирования 14.01.2025; принята к публикации 16.01.2025.*

*The article was submitted 21.12.2024; approved after reviewing 14.01.2025; accepted for publication 16.01.2025.*