

## ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ ПОЛНОГО ЦИКЛА НЕЙРОРЕАБИЛИТАЦИИ НА ОСНОВЕ НЕЙРОИНТЕРФЕЙСА С БИОЛОГИЧЕСКИМИ ОБРАТНЫМИ СВЯЗЯМИ

DOI: 10.25881/18110193\_2026\_2\_68

**Аннотация.** Работа посвящена созданию программно-аппаратного комплекса нейрореабилитации на основе моторного воображения, реализующего полный цикл работы интерфейса мозг-компьютер — от регистрации и предобработки ЭЭГ до классификации, управления мультимодальной обратной связью и формирования клинически ориентированных отчётов.

**Материалы и методы:** Архитектура комплекса включает базы данных пациентов и сценариев, модуль синхронизации потоков данных, автоматическое удаление глазодвигательных артефактов методом независимых компонент (ICA), классификатор на основе римановой геометрии ковариационных матриц и механизм адаптивного согласования признаков для снижения межиндивидуальной вариабельности.

**Результаты:** Разработанный комплекс обеспечивает надёжную работу в реальном времени и формирует отчёты, включающие нейрофизиологические показатели (спектральные мощности в диапазонах дельта, тета, альфа и бета ритмов, ERD, индекс латерализации) и поведенческие характеристики (скорость формирования моторного образа, количество успешных воображений). Система обеспечивает объективный мониторинг состояния пациента и динамики восстановления, включая оценку изменений фоновой ритмической активности и функциональных ответов сенсомоторной коры.

**Выводы:** Разработанное решение сочетает современные алгоритмические методы и клиническую применимость, что делает его перспективным инструментом для нейрореабилитации и когнитивно-моторных тренировок.

**Ключевые слова:** нейроинтерфейс, интерфейс мозг-компьютер, реабилитация, моторные нарушения, когнитивные нарушения, биологическая обратная связь, воображаемые движения.

**Для цитирования:** Бадарин А.А., Антипов В.М., Смирнов Н.М., Драпкина О.М., Киселев А.Р., Храмов А.Е. Программно-аппаратный комплекс для реализации полного цикла нейрореабилитации на основе нейроинтерфейса с биологическими обратными связями. *Врач и информационные технологии.* 2026; 2: 68-79. DOI: 10.25881/18110193\_2026\_2\_68.

**BADARIN A.A.,**

PhD, Moscow, Russia, Plekhanov Russian University of Economics, Moscow, Russia;  
FSBI "NMIC TPM" of the Ministry of Health of Russia, Moscow, Russia,  
e-mail: Badarin.a.a@mail.ru, ORCID: 0000-0002-3212-5890

**ANTIPOV V.M.,**

Plekhanov Russian University of Economics. Moscow, Russia;  
FSBI "NMIC TPM" of the Ministry of Health of Russia, Moscow, Russia,  
e-mail: vantipovm@gmail.com, ORCID: 0009-0003-9612-0305

**SMIRNOV N.M.,**

Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, Russia,  
e-mail: nikita.smirnov.m@gmail.com, ORCID: 0009-0002-7593-4345

**DRAPKINA O.M.,**

DSc, Prof., Academician of the Russian Academy of Sciences,  
FSBI "NMIC TPM" of the Ministry of Health of Russia, Moscow, Russia,  
e-mail: drapkina@bk.ru, ORCID: 0000-0002-4453-8430

**KISELEV A.R.,**

DSc, FSBI "NMIC TPM" of the Ministry of Health of Russia, Moscow, Russia,  
e-mail: kiselev@gnicpm.ru, ORCID: 0000-0003-3967-3950

**HRAMOV A.E.,**

DSc, Prof., Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences,  
Plekhanov Russian University of Economics, Moscow, Russia;  
Pirogov National Medical and Surgical Center, Moscow, Russia,  
e-mail: hramovae@gmail.com, ORCID: 0000-0003-2787-2530

# A HARDWARE AND SOFTWARE SYSTEM FOR IMPLEMENTING A FULL CYCLE OF NEUROREHABILITATION BASED ON A NEUROINTERFACE WITH BIOFEEDBACK

DOI: 10.25881/18110193\_2026\_2\_68

**Abstract.** *The study presents the development of a hardware-software system for neurorehabilitation based on motor imagery, implementing the full cycle of brain-computer interface (BCI) operation — from EEG acquisition and preprocessing to classification, multimodal feedback control, and generation of clinically oriented reports.*

*Materials and Methods:* The system architecture includes patient and scenario databases, a data stream synchronization module, automatic removal of oculomotor artifacts using Independent Component Analysis (ICA), a classifier based on Riemannian geometry of covariance matrices, and an adaptive feature alignment mechanism to reduce inter-individual variability.

*Results:* The developed system ensures reliable real-time performance and generates reports including neurophysiological parameters (spectral power in delta, theta, alpha, and beta bands, ERD, lateralization index) and behavioral characteristics (motor imagery formation speed, number of successful imagery attempts). The system provides objective monitoring of patient's condition and recovery dynamics, including assessment of changes in background rhythmic activity and functional responses of the sensorimotor cortex.

*Conclusions:* The proposed solution combines state-of-the-art algorithmic methods with clinical applicability, making it a promising tool for neurorehabilitation and cognitive-motor training.

**Keywords:** *rehabilitation, motor disorders, cognitive disorders, biofeedback, motor imagery.*

**For citation:** Badarin A.A., Antipov V.M., Smirnov N.M., Drapkina O.M., Kiselev A.R., Hramov A.E. A hardware and software system for implementing a full cycle of neurorehabilitation based on a neurointerface with biofeedback. *Medical doctor and information technology.* 2026; 2: 68-79. DOI: 10.25881/18110193\_2026\_2\_68.

## ВВЕДЕНИЕ

Восстановление двигательных функций после инсульта и других неврологических заболеваний остаётся одной из центральных задач современной нейрореабилитации [1, 2]. Несмотря на успехи в фармакотерапии и традиционных физиотерапевтических методах, у значительной части пациентов сохраняются стойкие двигательные дефициты, существенно ограничивающие их повседневную активность и качество жизни [3]. В последние годы активно развиваются технологии нейроинтерфейсов, позволяющие задействовать пластичность головного мозга через использование механизмов нейронной активности, возникающей в процессе моторного воображения [4–9].

Интерфейсы мозг–компьютер (ИМК), основанные на анализе электроэнцефалографических (ЭЭГ) сигналов, рассматриваются как перспективный инструмент в нейрореабилитации, поскольку позволяют регистрировать активность мозга, связанную с планированием и контролем движений. При реальном выполнении и даже при воображении движения в сенсомоторных областях коры возникают характерные изменения электрической активности — десинхронизация ритмов  $\mu$ - и  $\beta$ -диапазонов (event-related desynchronization, ERD). Подобные характерные изменения в ЭЭГ могут быть объективно выделены и применены в качестве признаков при автоматическом различении покоя и моторного воображения. Такой подход открывает возможность формировать биологическую обратную связь, которая активизирует двигательные сети мозга даже в тех случаях, когда пациент не способен совершить реальное движение. Именно поэтому ИМК на основе моторного воображения рассматриваются как эффективное средство стимуляции нейропластичности и восстановления двигательных функций, в частности у пациентов с тяжёлыми нарушениями моторики [10, 11].

Несмотря на значительный прогресс в исследованиях, большинство разработок ИМК на основе моторного воображения остаются на уровне экспериментальных прототипов. Основное внимание в них сосредоточено на алгоритмах машинного обучения для обработки и классификации ЭЭГ, тогда как задачи создания полнофункциональных решений отодвигаются на второй

план. Недостаточная проработка интерфейса, интеграции с аппаратными модулями и обеспечения работы в реальном времени существенно ограничивает их практическое применение. В клинической же практике врачу необходима не только корректная работа алгоритмов, но и система, обеспечивающая сбор и хранение результатов, ведение истории пациента и объективный мониторинг хода реабилитации. Отсутствие таких возможностей в большинстве существующих решений снижает их клиническую значимость и затрудняет использование в длительных реабилитационных программах. Для внедрения в реальную практику требуются не только эффективные методы классификации, но и простые, надёжные и удобные в эксплуатации устройства и программное обеспечение, обеспечивающие врачу и пациенту предсказуемый и устойчивый результат.

Настоящая работа посвящена созданию и представлению программно-аппаратного комплекса для нейрореабилитации на основе моторного воображения. В отличие от большинства существующих решений, ограничивающихся демонстрацией алгоритмов в условиях лабораторного эксперимента, данный комплекс реализует полный цикл функционирования системы: от регистрации и предобработки ЭЭГ до онлайн-классификации и управления мультимодальными каналами биологической обратной связи. В структуру разработанного комплекса входят модули, обеспечивающие современный и интуитивно понятный интерфейс, автоматизированную предобработку регистрируемых ЭЭГ-сигналов, синхронное взаимодействие с аппаратными компонентами (системами регистрации ЭЭГ, вибротактильными и мультимедийными устройствами), а также средства формирования отчётов и ведения индивидуальной истории пациента с интеграцией с медицинской информационной системой (МИС). Такое построение системы направлено на повышение её клинической применимости и удобства эксплуатации. Комплекс опирается на алгоритмическую основу, разработанную в наших предыдущих исследованиях [12, 13], где были предложены и апробированы методы предобработки и классификации ЭЭГ, а также исследованы показатели согласованности работы классификатора и субъективных оценок

пациента. В данной работе эти результаты интегрированы в единое прикладное решение, ориентированное на реабилитационные задачи.

Цель работы заключается в разработке программного обеспечения, реализующего полный цикл функционирования ИМК-ориентированной реабилитационной системы на основе моторного воображения, включая регистрацию и предобработку ЭЭГ-сигналов, их классификацию, управление мультимодальной обратной связью и формирование клинически ориентированных отчётов, что обеспечивает практическую готовность комплекса к применению в реабилитационных программах.

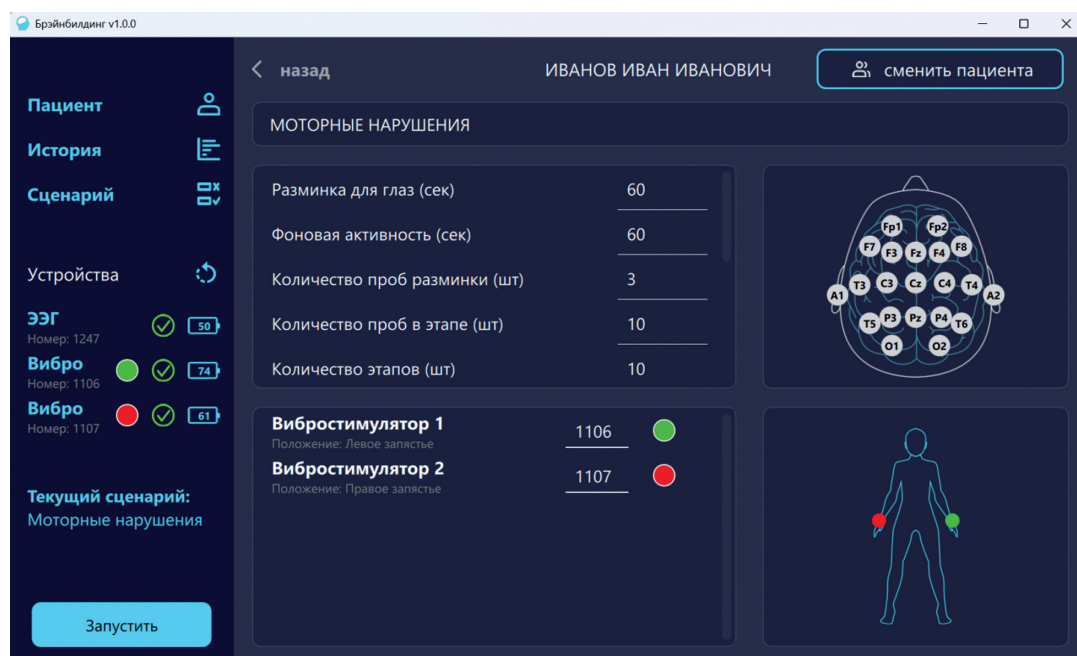
### АРХИТЕКТУРА И ПРОГРАММНО-АППАРАТНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ

Разработанный комплекс включает как аппаратные, так и программные компоненты, обеспечивающие проведение сеансов моторного воображения в реабилитационных условиях. Пример интерфейса показан на рисунке 1. В дополнение к этому, на рисунке 2 представлен

макетный образец устройства. Он включает беспроводные вибростимуляторы и систему регистрации ЭЭГ, которые совместно формируют основу её аппаратной части.

Архитектура программного обеспечения представлена на рисунке 3. Система построена модульно и обеспечивает полный цикл проведения реабилитационного сеанса — от выбора пациента, реабилитационного сценария и его проведения до записи результатов. В её состав входят следующие основные элементы: базы данных сценариев и пациентов, беспроводных устройств, реабилитационный сеанс, модуль синхронизации, классификатор, блок управления стимулами, модуль сохранения и монитор для вывода стимулов пациенту.

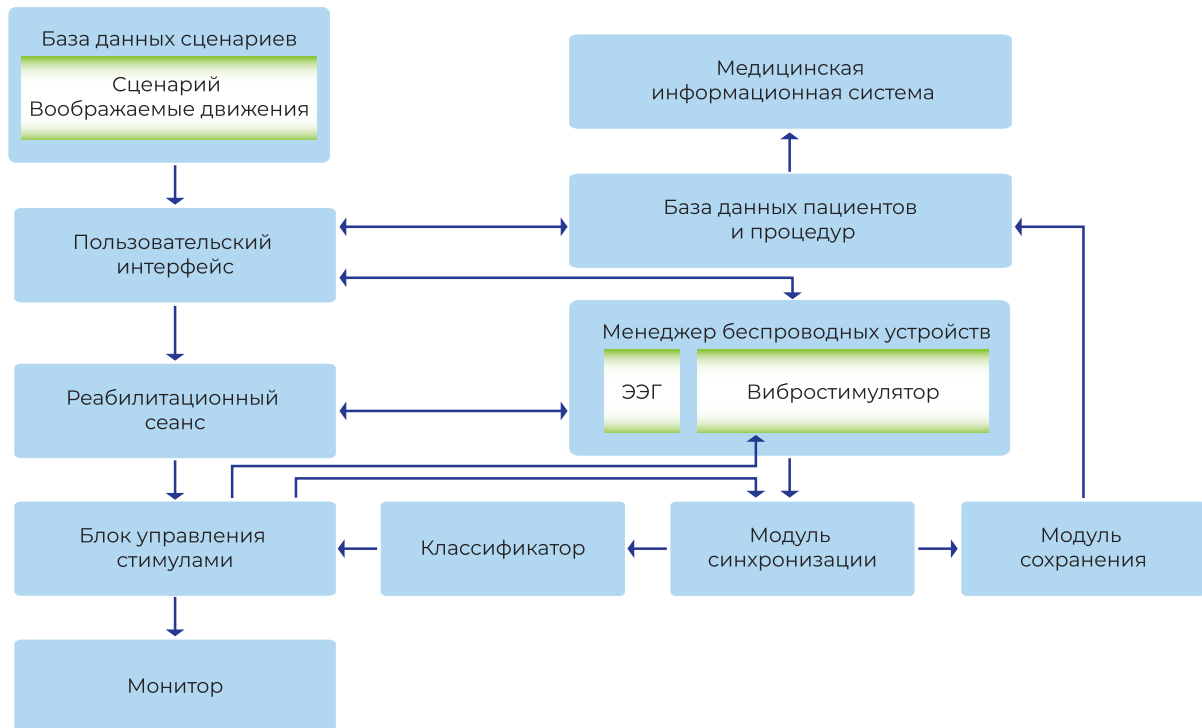
Работа системы начинается с выбора пациента и загрузки соответствующего сценария. База данных сценариев содержит набор типовых процедур моторного воображения с возможностью настройки параметров — типа обратной связи (визуальной, вибротактильной или комбинированной), числа предъявлений, длительности стимулов и пауз между ними. В сценарий



**Рисунок 1 — Пользовательский интерфейс программного обеспечения: выбор пациента и сценария, настройка параметров реабилитационного сеанса, отображение схемы ЭЭГ-отведений, контроль состояния и расположения вибростимуляторов.**



**Рисунок 2 — Макетный образец устройства, включающий беспроводной усилитель ЭЭГ и четыре вибростимулятора.**



**Рисунок 3 — Архитектура программного обеспечения: взаимосвязи между базами данных сценариев и пациентов, пользовательским интерфейсом, менеджером устройств, реабилитационным сеансом, модулями синхронизации и сохранения, классификатором и блоком управления стимулами.**



может быть включён вывод промежуточных результатов пациенту, что делает процедуру более наглядной и поддерживает мотивацию пациента. База данных пациентов и процедур хранит медицинские сведения, историю реабилитации и показатели выполнения заданий, обеспечивая накопление информации для анализа и корректировки терапии.

Доступ к этим функциям реализуется через пользовательский интерфейс, который служит основным инструментом врача. Он позволяет выбрать пациента и сценарий, настроить параметры сеанса, а также контролировать подключённые устройства. Кроме того, для настройки вибростимуляторов предусмотрено интерактивное задание их расположения на теле пациента и активация световой индикации, что облегчает правильное подключение. Пример интерфейса представлен на рисунке 1.

Подготовка оборудования и регистрация сигналов выполняются через менеджер беспроводных устройств, который управляет инициализацией электроэнцефалографа и вибростимуляторов и запускает регистрацию ЭЭГ. После проверки готовности системы, врач может запустить реабилитационный сеанс, координирующий последовательность всех этапов сценария реабилитации. Для временной согласованности данных используется модуль синхронизации, реализованный на основе протокола Lab Streaming Layer (LSL) [14]. Его основная задача заключается в том, чтобы связывать во времени регистрацию сигналов ЭЭГ, работу вибростимуляторов и предъявление стимулов в рамках выбранного сценария. Использование LSL позволяет точно маркировать события и сохранять их с единой временной привязкой, что особенно важно для последующего анализа данных. К преимуществам такого подхода относится поддержка многопоточной записи данных из различных источников, удобная интеграция с другими программными средствами анализа и возможность масштабирования системы без изменения её базовой архитектуры. Благодаря модулю синхронизации обеспечивается надёжная и воспроизводимая работа комплекса в условиях реального времени.

Поступающие ЭЭГ-сигналы предварительно проходят этап фильтрации в диапазоне 1–40 Гц и удаления глазодвигательных артефактов на основе разложения ЭЭГ-сигналов на независимые

компоненты (Independent Component Analysis, ICA) и автоматическим выбором и удалением глазодвигательных артефактов, после чего очищенные данные поступают в классификатор перекрывающимися окнами в 1 с. каждые 0,25 с. Классификатор является ключевым элементом системы и позволяет детектировать акт моторного воображения. Его работа основана на использовании расширенных ковариационных матриц, что, как показали ранее проведённые исследования, обеспечивает высокую точность распознавания [12, 13].

Для снижения межиндивидуальной вариативности в модуле классификатор дополнительно реализован метод приведения ковариационных матриц различных пациентов к общему пространству представления [15]. Этот подход основан на римановой геометрии ковариационных матриц: матрицы нового испытуемого, вычисленные для анализируемого временного окна, подвергаются параллельному переносу от усреднённой ковариационной матрицы данного испытуемого (полученной на этапе адаптации) к усреднённой ковариационной матрице, рассчитанной по всей обучающей группе. Такой перенос согласует представления между индивидуальным и групповым пространством признаков, что позволяет уменьшить межиндивидуальную вариативность за счёт устранения различий в базовой статистике сигналов. Расчёт выполняется в реальном времени с обновлением средней матрицы, что позволяет адаптировать работу классификатора к индивидуальным особенностям пациента.

Для реализации этого механизма в реабилитационный сценарий включена стадия адаптации. В её рамках пациент наблюдает движение виртуальной руки и одновременно воображает соответствующий двигательный акт. Эта процедура с одной стороны помогает пациенту адаптироваться к предстоящему заданию, а с другой привести данные к единому пространству представлений и повысить надёжность последующей классификации.

Результаты классификации поступают в блок управления стимулами, который реализует обратную связь. В системе предусмотрены два канала обратной связи: визуальный (движение виртуальной руки на экране) и вибротактильный (активация беспроводных стимуляторов). Каналы могут использоваться отдельно или совместно в зависимости от сценария.

Все данные о процедуре сохраняются в модуле сохранения, включая параметры сценария, зарегистрированные сигналы, временные метки стимулов и результаты классификации. На их основе формируются отчёты и обновляется база данных пациентов, что обеспечивает объективный мониторинг динамики восстановления.

Взаимодействие перечисленных компонентов образует замкнутый цикл функционирования системы: от подготовки и настройки процедуры до её проведения и сохранения результатов. Такая архитектура делает комплекс целостным и готовым к применению в реабилитационных программах.

### ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ

Разработанное ПО ориентировано на проведение реабилитационных процедур и одновременно обеспечивает объективный контроль их эффективности. Для этого оно автоматически рассчитывает набор нейрофизиологических и поведенческих показателей, которые интегрируются в единый отчёт в формате PDF и сохраняются в базе данных пациента. Это позволяет отслеживать динамику изменений как в пределах одного реабилитационной процедуры, так и в динамике.

Ключевыми нейрофизиологическими маркерами являются спектральные характеристики ЭЭГ. В частности, оценивается спектральные мощности в основных диапазонах ( $\delta$ : 1–4 Гц,  $\theta$ : 4–8 Гц,  $\alpha$ : 8–13 Гц,  $\beta$ : 13–30 Гц) в состоянии покоя до начала процедуры и сразу после её завершения.

Сравнение спектральных характеристик электрической активности головного мозга в состоянии покоя до начала процедуры и сразу после позволяет выявлять изменения базовой ритмической активности мозга, возникающие под влиянием реабилитационной процедуры. Эти изменения могут отражать не только восстановительные процессы, но и такие факторы, как утомляемость или психоэмоциональное напряжение [16, 17]. Для повышения информативности данные агрегируются по функционально значимым областям: Лобная (Fp1, Fp2, F7, Fz, F8), центральная левая (T3, C3, P3, F3), центральная правая (T4, C4, P4, F4) и затылочная (O1, O2, Pz, T6, T5).

Кроме того, во время выполнения заданий на моторное воображение ПО позволяет детектировать изменения активности сенсомоторных ритмов. Для этого вычисляется показатель десинхронизации (event-related desynchronization, ERD [13]), отражающий относительное снижение мощности в  $\mu$ - и  $\beta$ -диапазонах по сравнению с состоянием покоя:

$$ERD = \frac{P_{rest} - P_{imag}}{P_{rest}}$$

где:  $P_{rest}$  — средняя мощность сигнала в состоянии покоя (до стимула),  $P_{imag}$  — мощность во время фазы моторного воображения. Более высокие значения ERD указывают на большую активацию сенсомоторной коры в ответ на воображаемое движение.

В формирующемся отчете по результатам проведенной процедуры значения ERD рассчитываются для каналов, расположенных над моторной корой (C3, C4, Cz), как отдельно для каждого диапазона  $\mu$  и  $\beta$ , так и усредняются для получения интегрального показателя:

$$\overline{ERD} = \frac{ERD_{\mu} + ERD_{\beta}}{2}$$

где:  $ERD_{\mu}$  и  $ERD_{\beta}$  — значения десинхронизации в  $\mu$ - и  $\beta$ -диапазонах соответственно.

Для количественной оценки межполушарных различий при воображении движений левой и правой рукой отдельно рассчитывается индекс латерализации (LI) на основе показателя десинхронизации (ERD) для каждого канала:

$$LI = \frac{ERD(C3) - ERD(C4)}{ERD(C3) + ERD(C4)}$$

Положительные значения LI отражают преобладание активации в левом полушарии, отрицательные — в правом. Этот показатель используется для оценки баланса активации сенсомоторных областей и отслеживания восстановления межполушарной асимметрии [18].

Таким образом, ПО предоставляет комплексную оценку состояния пациента. Анализ фоновой активности позволяет детектировать изменения общей ритмической организации мозга в состоянии покоя, в том числе проявления утомления



или напряжения, тогда как расчёт ERD и LI характеризует функциональный ответ сенсомоторной коры на задание моторного воображения. Совместное использование этих показателей даёт врачу целостное представление о текущем состоянии пациента и динамике его восстановления.

Наряду с нейрофизиологическими маркерами ПО регистрирует поведенческий показатель, такие как скорость воображения (время, которое требуется пациенту для успешного формирования образа движения после предъявления стимула) и количество успешных воображений. Эти параметры отражают степень вовлеченности пациента в задание и дополняют объективные характеристики ЭЭГ.

Все вычисленные показатели автоматически интегрируются в единый отчёт в формате PDF. Отчёты сохраняются в базе данных пациента, что обеспечивает удобное ведение истории, объективный контроль прогресса и возможность своевременной корректировки программы терапии.

## ОБСУЖДЕНИЕ

Использованная в работе парадигма моторного воображения имеет убедительное клиническое обоснование. Рандомизированные контролируемые исследования показали, что интерфейсы мозг–компьютер на основе анализа сенсомоторных ритмов способствуют восстановлению двигательных функций у пациентов [2, 4, 7, 19]. Систематические обзоры и мета-анализы подтверждают эффективность данного подхода и подчёркивают его значимость в составе комплексных реабилитационных программ [20, 21]. Это свидетельствует о том, что выбранная парадигма обладает доказанной клинической ценностью и может служить основой для разработки прикладных решений, ориентированных на практическое применение.

Разработанный комплекс отличается от большинства существующих прототипов тем, что обеспечивает полный цикл функционирования: от регистрации сигналов ЭЭГ, их очистки и классификации в режиме реального времени до управления внешними устройствами для организации мультимодальной обратной связи, а также формирования отчетов о проведенных процедурах и ведения истории их выполнения. Такая организация делает систему более приближенной к клинической практике, где врачу

необходим не отдельный алгоритм, а надёжный инструмент, обеспечивающий стабильную работу и удобное документирование результатов.

Для классификации сигналов применяются современные методы анализа временных сигналов, основанные на римановой геометрии ковариационных матриц, позволяющие учитывать их структуру и использовать геометрически корректные меры расстояния. Кроме того, дополнительно реализованы механизмы выравнивания признаков по геодезическим траекториям, что соответствует современным подходам трансферного обучения. Такой подход снижает межиндивидуальную и межсессионную вариабельность и обеспечивает более высокую устойчивость и воспроизводимость работы классификатора [12, 13, 15].

Важным компонентом комплекса является автоматическое формирование отчётности, обеспечивающее интеграцию нейрофизиологических и поведенческих показателей в единый документ. Сравнение спектральных характеристик ЭЭГ в состоянии покоя до и после сеанса позволяет выявлять изменения общей ритмической активности, которые могут отражать как восстановительные процессы, так и признаки утомления или психоэмоционального напряжения [16, 17]. При выполнении заданий моторного воображения рассчитывается десинхронизация  $\mu$ - и  $\beta$ -ритмов (ERD), являющаяся валидным маркером активации сенсомоторной коры [13]. Для оценки межполушарных различий применяется LI, позволяющий количественно описывать баланс активации между С3 и С4, что особенно важно для мониторинга восстановления сенсомоторной асимметрии [18]. Дополнительно система фиксирует поведенческий показатель — скорость воображения, то есть время, необходимое пациенту для формирования образа движения, который отражает уровень вовлечённости в задание и может служить дополнительным индикатором эффективности терапии. Все полученные данные автоматически сохраняются в базе и представлены в отчёте в формате PDF, включающем численные значения и графические иллюстрации динамики показателей. Это обеспечивает объективный контроль прогресса, удобство ведения истории и возможность корректировки программы терапии на основе стандартизированных данных.

Стоит отметить, что перспективы применения разработанного комплекса не ограничиваются задачами восстановления двигательных функций. Современные исследования показывают, что практика моторного воображения оказывает влияние не только на сенсомоторные, но и на когнитивные процессы. Систематический обзор и анализ опубликованных работ показали, что более чем в половине исследований наблюдались значимые улучшения когнитивных функций (память, внимание, исполнительный контроль) при использовании моторного воображения в реабилитационных протоколах [22, 23].

Таким образом, благодаря модульной архитектуре и встроенной системе документирования разработанный комплекс может быть гибко включён в программы длительного мониторинга и профилактики, дополняя традиционные формы реабилитации и когнитивной тренировки. Такое расширение области применения подчёркивает универсальность подхода и его потенциал для использования в междисциплинарных клинических и исследовательских задачах.

## ВЫВОДЫ

Разработанный программно-аппаратный комплекс нейрореабилитации на основе моторного воображения реализует полный цикл работы интерфейса мозг-компьютер: от регистрации и предобработки ЭЭГ до классификации, управления мультимодальной обратной связью и формирования клинически ориентированных

отчётов. Архитектура комплекса обеспечивает интеграцию всех ключевых компонентов — от работы с базами данных и управления устройствами до анализа сигналов и сохранения результатов, что позволяет использовать систему в клинических условиях. Применение методов римановой геометрии и адаптивного приведения признаков к общему пространству снижает межиндивидуальную вариабельность и повышает надёжность классификации. Автоматическое включение нейрофизиологических и поведенческих показателей в отчёт обеспечивает объективный мониторинг динамики восстановления и даёт врачу инструмент для гибкой коррекции программы терапии. Таким образом, комплекс сочетает современные алгоритмические решения и удобные средства документирования, что делает его перспективным инструментом как для клинической реабилитации, так и для профилактических когнитивно-моторных тренировок.

**Конфликт интересов.** Конфликт интересов отсутствует.

**Источники финансирования.** Работа выполнена при поддержке Минздрава России в рамках научного проекта «Разработка программно-аппаратного комплекса для реабилитации пациентов с когнитивными и моторными нарушениями различной природы на основе мультимодальной биологической обратной связи» № 123020600127-4 (2023–2025 гг.).

## ЛИТЕРАТУРА/REFERENCES

1. Feigin VL, et al. World Stroke Organization: Global Stroke Fact Sheet 2025. *International Journal of Stroke*. 2025; 20(2): 132-144. doi: 10.1177/17474930241308142.
2. Мокиенко О.А., Супонева Н.А., Азиатская Г.А. Инсульт у взрослых: центральный парез верхней конечности. Клинические рекомендации / Под ред. О.А. Мокиенко, Н.А. Супоновой. — М.: МЕДпресс-Информ, 2018. — 222 с. [Mokienko OA, Suponeva GA, Aziatskaya GA. Insul't u vzroslykh: central'nyj parez verhnej konechnosti. Klinicheskie rekomendacii. O.A. Mokienko, N.A. Suponeva, ed. M.: MEDpress-Inform. 2018. 222. (In Russ.)]
3. Joundi RA, et al. Magnitude and time-course of dementia risk in stroke survivors: a population-wide matched cohort study. *Neurology*. 2025; 104(1): e210131. doi: 10.1212/WNL.0000000000210131.
4. Пирадов М.А., Черникова А.С., Супонева Н.А. и др. Перспективы развития роботизированных устройств для восстановления движений руки // Роботические технологии в медицине. — 2016. — С.122-130. [Piradov MA, Chernikova NA, Suponeva AS, et. al. Perspektivy razvitiya robotizirovannyh ustrojstv dlya vosstanovleniya dvizhenij ruki. Roboticheskie tekhnologii v medicine. 2016: 122-130. (In Russ.)]
5. Khorev V, Kurkin S, Badarin A, et al. Review on the use of brain computer interface rehabilitation methods for treating mental and neurological conditions. *Journal of Integrative Neuroscience*. 2024; 23(7): 125. doi: 10.31083/j.jin2307125.
6. Hramov AE, Maksimenko VA, Pisarchik AN. Physical principles of brain-computer interfaces and their applications for rehabilitation, robotics and control of human brain states. *Physics Reports*. 2021; 918: 1-133. doi: 10.1016/j.physrep.2021.03.002.

7. Фролов А.А., Мокиенко О.А., Люкманов Р.Х. и др. Предварительные результаты контролируемого исследования эффективности технологии ИМК-экзоскелет при постинсультном парезе руки // Вестник Российского государственного медицинского университета. — 2016. — №2. — С.17-2 [Frolov AA, Mokienko OA, Lyukmanov RH, et al. Predvaritel'nye rezul'taty kontroliruемого issledovaniya effektivnosti tekhnologii IMK-ekzoskelet pri postinsul'tnom pareze ruki. Vestnik Rossijskogo gosudarstvennogo medicinskogo universiteta. 2016; 2: 17-2. (In Russ.)]
8. Фролов А.А., Черникова Л.А., Люкманов Р.Х. и др. Использование медицинской технологии «Неинвазивный интерфейс мозг — компьютер — экзоскелет кисти». Методические рекомендации. 2016. [Frolov AA, Chernikova LA, Lyukmanov RH, et. al. Ispol'zovanie medicinskoj tekhnologii «Neinvazivnyj interfejs mozg — komp'yuter — ekzoskelet kisti». Metodicheskie rekomendacii. 2016. (In Russ.)]
9. Фролов А.А., Азиатская Г.А., Бобров П.Д. и др. Электрофизиологическая активность мозга при управлении интерфейсом мозг-компьютер, основанным на воображении движения // Физиология человека. — 2017. — №43(5). — С.17-25. [Frolov AA, Aziatskaya GA, Bobrov PD, et al. Elektrofiziol'gicheskaya aktivnost' mozga pri upravlenii interfejsom mozg-komp'yuter, osnovannym na voobrazhenii dvizheniya. Fiziologiya cheloveka. 2017; 43(5): 17-25. (In Russ.)]
10. Alonso-Valerdi LM, Salido-Ruiz RA, Ramirez-Mendoza RA. Motor imagery based brain-computer interfaces: an emerging technology to rehabilitate motor deficits. *Neuropsychologia*. 2015; 79: 354-363. doi: 10.1016/j.neuropsychologia.2015.09.012.
11. Almufareh MF, Alsumayt A, Alageely AS, et al. Leveraging motor imagery rehabilitation for individuals with disabilities: a review. *Healthcare*. 2023; 11(19): 2681. doi: 10.3390/healthcare11192653.
12. Антипов В.М., Бадарин А.А., Куркин С.А. и др. Программно-аппаратный комплекс для реабилитации пациентов с когнитивными и моторными нарушениями // Врач и информационные технологии. — 2024. — №4. — С.38-47. [Antipov VM, Badarin AA, Kurkin SA, et al. Program-apparatus complex for rehabilitation of patients with cognitive and motor disorders. *Vrach i informatsionnye tekhnologii*. 2024; 4: 38-47. (In Russ.)] doi: 10.25881/18110193\_2024\_4\_38.
13. Антипов В.М., Смирнов Н.М., Бадарин А.А. и др. Использование интерфейсов мозг-компьютер для персонализированной нейрореабилитации: роль субъективного восприятия и нейрофизиологических показателей // Врач и информационные технологии. — 2025. — №2. — С.84-97. [Antipov VM, Smirnov NM, Badarin AA, et al. Using brain-computer interfaces for personalized neurorehabilitation: the role of subjective perception and neurophysiological indicators. *Vrach i informatsionnye tekhnologii*. 2025; 2: 84-97. doi: 10.25881/18110193\_2025\_2\_84. (In Russ.)]
14. Kothe C, Shirazi SY, Stenner T, et al. The lab streaming layer for synchronized multimodal recording. *Imaging Neuroscience*. 2025; 3: IMAG-a. doi: 10.1162/IMAG.a.136.
15. Yger F, Berar M, Lotte F. Riemannian approaches in brain-computer interfaces: a review. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*. 2016; 25(10): 1753-1762. doi: 10.1109/TNSRE.2016.2627016.
16. Brokaw K, Tishler W, Manceor S, et al. Resting state EEG correlates of memory consolidation. *Neurobiology of Learning and Memory*. 2016; 130: 17-25. doi: 10.1016/j.nlm.2016.01.008.
17. Wan W, Gao Z, Zhang Q, et al. Resting state EEG complexity as a predictor of cognitive performance // *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. 2023; 624: 128952. doi: 10.1016/j.physa.2023.128952.
18. Nam CS, Jeon Y, Kim YJ, Lee., Park K. Movement imagery-related lateralization of event-related (de) synchronization (ERD/ERS): motor-imagery duration effects. *Clinical Neurophysiology*. 2011; 122(3): 567-577. doi: 10.1016/j.clinph.2010.08.002.
19. Ramos-Murguialday A, Broetz D, Rea M, et al. Brain-machine interface in chronic stroke rehabilitation: a controlled study. *Annals of Neurology*. 2013; 74(1): 100-108. doi: 10.1002/ana.23879.
20. Cervera MA, Soekadar SR, Ushiba J, et al. Brain-computer interfaces for post-stroke motor rehabilitation: a meta-analysis. *Annals of Clinical and Translational Neurology*. 2018; 5(5): 651-663. doi: 10.1002/acn3.544.
21. Yang W, Zhang X, Li Z, et al. The effect of brain-computer interface training on rehabilitation of upper limb dysfunction after stroke: a meta-analysis of randomized controlled trials. *Frontiers in Neuroscience*. 2022; 15: 766879. doi: 10.3389/fnins.2021.766879.
22. Hu Y, Li Y, Leung AY, et al. A scoping review on motor imagery-based rehabilitation: Potential working mechanisms and clinical application for cognitive function and depression. *Clinical Rehabilitation*. 2025; 39(4): 504-523. doi: 10.1177/02692155241303259.
23. Gu J, Wang X, Liu C, et al. Cognitive and neural mechanisms of mental imagery supporting creative cognition. *Communications Biology*. 2025; 8: 1386. doi: 10.1038/s42003-025-08513-x.