

LG Electronics

Russia R&D Lab

Internal Report

Нейроинтерфейсы - обзор текущего состояния

Подготовил:

Mukhamadiev Artur, Research Engineer

Утвердил:

Dmitry Ketov, Part Leader

Отдел:

Russia R&D Lab, Web Team

Дата:

29 января 2026 г.

Версия:

1.0

Оглавление

Введение	3
1 Brain-machine Interface (BMI)	4
Brain-Machine Interface (BMI)	4
1.1 Основные области применения	4
1.1.1 Клиническая медицина и реабилитация	5
1.1.2 Управление внешними устройствами и робототехника	6
1.1.3 Аффективные и когнитивные вычисления	6
1.1.4 Развлечения, искусство и повседневное использование	6
1.1.5 Специализированные области	6
1.1.6 BCI программные платформы	7
1.2 Алгоритмы декодирования сигналов мозга	8
1.2.1 Глубокое обучение (Deep Learning)	8
1.2.2 Обучение с переносом знаний (Transfer Learning)	8
1.2.3 Классификация на основе многообразий (Manifold-Based Methods)	9
1.2.4 Адаптивное обучение (Adaptive Learning)	9
1.2.5 Анализ источников ЭЭГ (EEG Source Analysis)	10
1.3 Что останавливает перед массовым внедрением интерфейсов мозг-компьютер	10
1.3.1 Психофизиологические вызовы	10
1.3.2 Технологические и алгоритмические ограничения	10
1.3.3 Практические и клинические вызовы	11
1.3.4 Этические и правовые аспекты	11
1.4 Ситуация с Brain-Computer Interface в мире	11
1.4.1 Прорывные технологии из отчета за 2023-2024	13
1.5 Российские организации, которые занимаются ИМК	14
1.5.1 Компании и стартапы	14
1.5.2 НИИ	15
1.5.3 Университеты	16
2 Дополнительные материалы	17

Дополнительные материалы	17
2.1 Формулы	17

Введение

Глава 1

Brain-machine Interface (BMI)

Давайте начнем с определения и терминологии. Что такое Brain-Machine interface (далее BMI или ИМК (интерфейс машина-компьютер))?

BMI - технология, которая предоставляет **прямой интерфейс взаимодействия между мозгом и некоторым электронным устройством** (компьютером, протезом, экзоскелетом и далее). Интерфейс построен на считывании нейронной активности мозга, которую он пытается декодировать в некоторые команды, которые человек хочет послать устройству, минуя мышечную активность.

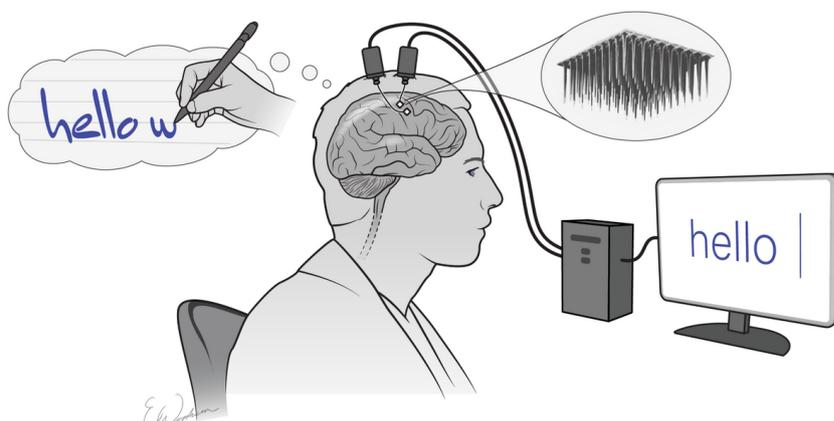


Рис. 1.1. Иллюстрация работы интерфейса мозг-машина

1.1. Основные области применения

Исторически сложилось, что BMI плотно связан с технологиями для улучшения или замены, существующих методов нейрореабилитации, либо как технология для

разработки вспомогательных устройств, которые могли бы контролироваться напрямую мозгом.

А началось все с Видеяля в 1973 году, когда он смог зафиксировать активность мозга при помощи электроэнцефалограммы. С этого времени было найдено огромное количество неинвазивных применений (рис. 1.2).

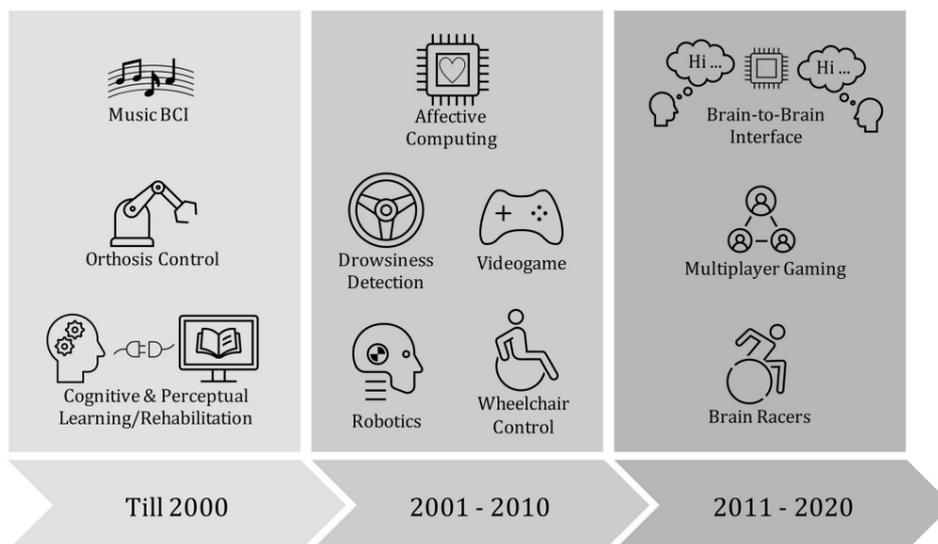


Рис. 1.2. Иллюстрация эволюции применения интерфейса мозг-компьютер

1.1.1. Клиническая медицина и реабилитация

Это наиболее значимая область, нацеленная на помощь людям с тяжелыми нейромышечными нарушениями, такими как боковой амиотрофический склероз (БАС), травмы спинного мозга и последствия инсульта.

- 1. Ассистивные технологии:** ИМК позволяют восстановить коммуникацию и управление для полностью парализованных пациентов («запертых») через системы печати (spellers) или декодирование рукописного ввода прямо из сигналов мозга. [1]
- 2. Восстановительная реабилитация:** Технология используется для стимуляции нейропластичности и восстановления двигательных функций конечностей после инсульта. [2]
- 3. Управление инвалидными колясками:** Разработаны системы для навигации в инвалидном кресле с использованием моторного воображения или зрительных вызванных потенциалов [1]

1.1.2. Управление внешними устройствами и робототехника

ВМІ позволяют преобразовывать намерения пользователя в команды для сложных механизмов.

1. **Роботизированные манипуляторы:** Одной из самых передовых областей является управление робо-руками для выполнения повседневных задач (дотянуться до объекта и схватить его).
2. **Беспилотные аппараты:** Продемонстрирована возможность управления квадрокоптерами в трехмерном пространстве. [2]
3. **Гуманоидные роботы:** ИМК применяются для дистанционного управления человекоподобными роботами, что может быть полезно в опасных средах.

1.1.3. Аффективные и когнитивные вычисления

Эта область сфокусирована на мониторинге психических состояний человека.

1. **Детекция сонливости и усталости:** Пассивные ИМК могут использоваться для предотвращения аварий, отслеживая состояние водителей или операторов.
2. **Эмоциональное регулирование:** Ведутся исследования по обнаружению аффективных состояний (депрессия, тревога) и обеспечению биологической обратной связи для их коррекции

1.1.4. Развлечения, искусство и повседневное использование

С появлением недорогих неинвазивных систем технология вышла за пределы лабораторий.

1. **Гейминг:** Создание «мозговых игр», где управление игровым процессом осуществляется силой мысли, что улучшает пользовательский опыт.
2. **Виртуальная и дополненная реальность (VR/AR):** ИМК обеспечивают эффект погружения и новые способы взаимодействия в виртуальных мирах.
3. **Искусство:** Существуют системы «рисования мозгом», позволяющие творчески самовыражаться людям с ограниченными физическими возможностями

1.1.5. Специализированные области

1. **Космические исследования:** Мониторинг работоспособности космонавтов и управление экзоскелетами в условиях отсутствия гравитации.

2. **Интерфейсы «мозг-мозг»:** Эксперименты по прямой передаче когнитивной информации от одного человека к другому.

В будущем интеграция ИМК с методами нейромодуляции (например, ультразвуковой или электрической стимуляцией) может расширить эти области, позволяя не только считывать намерения, но и корректировать работу мозга в реальном времени

1.1.6. **BCI программные платформы**

1. **OpenViBE**[3]: Программная платформа OpenViBE разрабатывается с 2007 года. OpenViBE реализована на языке C++ и может быть скомпилирована в операционных системах Windows и Linux; для Windows предоставляются готовые исполняемые файлы. OpenViBE основана на архитектуре, которая упрощает интеграцию, расширение и настройку модульной функциональности, а графический интерфейс делает OpenViBE удобной в использовании для широкого круга исследователей, включая инженеров, ученых и врачей. Эти два фактора делают OpenViBE хорошо подходящей для поддержки реализации различных подходов к интерфейсам мозг-компьютер.

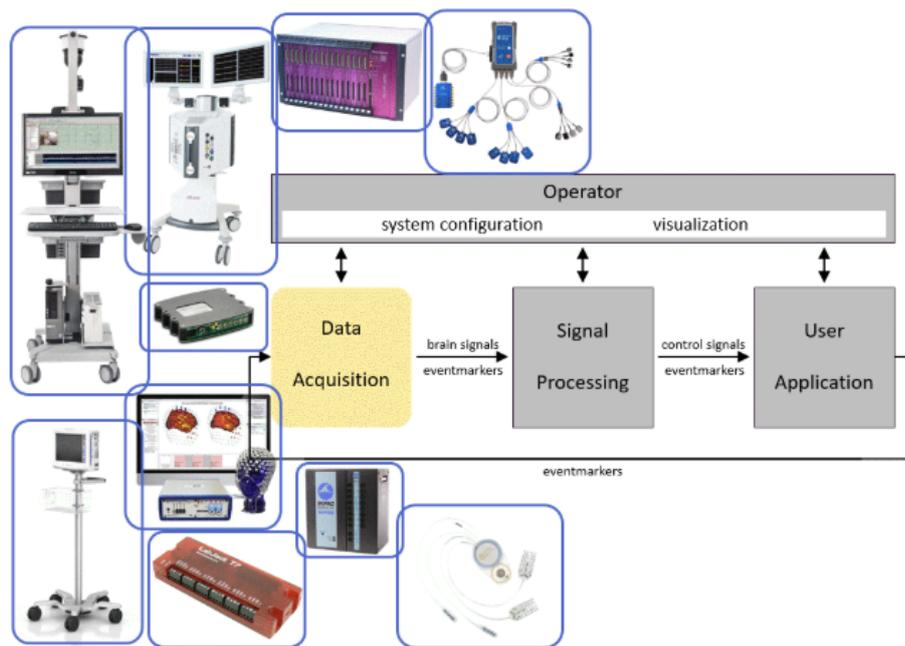


Рис. 1.3. Скриншот гифки с сайта BCI2000 с возможными источниками входных данных

2. **BCI2000** [4]: Программная платформа BCI2000 разрабатывается с 1998 года. BCI2000 реализована на C++ и может быть скомпилирована под Windows и Linux; для Windows предоставляются готовые исполняемые файлы. Ее реализация основана на модели, которая может описывать любую систему интерфейса

мозг-компьютер (BCI). (рис 1.3) В соответствии с этой моделью BCI2000 имеет четыре модуля, которые взаимодействуют друг с другом: Источник (сбор и хранение данных); Обработка сигналов; Пользовательское приложение; и Операторский интерфейс. Модули взаимодействуют посредством документированного сетевого протокола на основе TCP/IP. Реализация BCI2000 высоко оптимизирована, что позволяет поддерживать даже очень требовательные конфигурации BCI с хорошими временными характеристиками.

1.2. Алгоритмы декодирования сигналов мозга

Взято из "Non-Invasive Brain-Computer Interfaces: State of the Art and Trends"[1]

1.2.1. Глубокое обучение (Deep Learning)

Глубокое обучение позволяет автоматически извлекать признаки из «сырых» данных ЭЭГ, минимизируя необходимость в ручном проектировании признаков.

1. **Сверточные нейронные сети (CNN):** Самый популярный метод, эффективно извлекающий спектральные и пространственные признаки. Ключевыми архитектурами являются EEGNet (универсальная и компактная сеть), Shallow ConvNets и Deep ConvNets.
2. **Графовые сверточные сети (GCN):** Рассматривают электроды как узлы графа, что позволяет учитывать физическое распределение датчиков на скальпе и внутренние связи между каналами.
3. **Рекуррентные сети (RNN/LSTM):** Фокусируются на временных зависимостях в последовательных сигналах ЭЭГ. Например, архитектуры на базе LSTM успешно используются для декодирования паттернов походки.
4. **Механизмы внимания и трансформеры:** Позволяют модели динамически выделять наиболее важные части ЭЭГ-испытания, что улучшает точность распознавания моторных образов и вызванных потенциалов.
5. **Гибридные модели:** Комбинируют различные архитектуры (например, CNN-LSTM) для одновременного анализа пространственных, спектральных и временных характеристик.

1.2.2. Обучение с переносом знаний (Transfer Learning)

Этот подход решает проблему высокой вариативности сигналов между разными людьми и сессиями.

1. **Тонкая настройка (Fine-tuning)**: Модель предварительно обучается на данных большой группы людей, а затем адаптируется под конкретного пользователя.
2. **Доменная адаптация (Domain Adaptation)**: Нацелена на выравнивание распределений признаков разных доменов (например, разных испытуемых), чтобы сделать модель инвариантной к индивидуальным особенностям.
3. **Малоприметное обучение (Few-shot learning)**: Позволяет создавать бескалибровочные ИМК, способные работать с минимальным количеством размеченных данных от нового пользователя.

1.2.3. Классификация на основе многообразий (Manifold-Based Methods)

В отличие от методов в евклидовом пространстве, эти алгоритмы работают с геометрической структурой данных.

1. **Римановы многообразия**: Используют ковариационные матрицы (2.1) сигналов ЭЭГ, которые являются симметричными положительно определенными (SPD) матрицами.
2. **RMDM (Riemannian Minimum Distance to Means)**: Классифицирует сигнал на основе риманова расстояния до средних геометрических значений классов. Эти методы устойчивы к шуму и обладают хорошей обобщающей способностью. (формулы 2.3 и 2.2)

Формулы, если вам вдруг интересно, можно посмотреть в дополнительных материалах.

1.2.4. Адаптивное обучение (Adaptive Learning)

Адаптивные классификаторы способны подстраивать свои параметры в процессе работы, реагируя на изменение ментального состояния пользователя или нестационарность ЭЭГ.

1. **Контролируемая и неконтролируемая адаптация**: Включает методы переобучения на новых данных сессии.
2. **Полуконтролируемое обучение**: Использует такие стратегии, как псевдо-разметка (pseudo-labeling) и самообучение, где модель сама размечает входящие данные для уточнения своих параметров.

1.2.5. Анализ источников ЭЭГ (EEG Source Analysis)

Этот метод отходит от анализа сигналов непосредственно на скальпе и переходит к оценке активности нейронных источников в коре головного мозга.

1. **Обратная задача ЭЭГ:** С помощью математических преобразований (например, LORETA или MNE) сигналы со скальпа преобразуются в оценки активности коры.
2. **Преимущества:** Подход обеспечивает более детальную пространственную информацию, что критически важно для декодирования сложных движений конечностей и управления робототехникой в реальном времени.

Основными целями развития этих алгоритмов авторы называют повышение точности классификации, создание систем, не требующих длительной калибровки, и обеспечение надежности ИМК при долговременном использовании.

1.3. Что останавливает перед массовым внедрением интерфейсов мозг-компьютер

1.3.1. Психофизиологические вызовы

1. **Высокая вариативность сигналов:** Мозговая динамика крайне нелинейна и изменчива как у одного и того же человека в разное время (интраиндивидуальная), так и между разными людьми (интериндивидуальная). На сигналы влияют возраст, пол, уровень внимания, усталость и даже эмоциональное состояние пользователя.
2. **Проблема «ИМК-неграмотности» (BCI illiteracy):** Около 15–30% людей не способны генерировать достаточно стабильные и сильные сигналы мозга для управления системой. Несмотря на новые подходы в декодировании, эта проблема остается нерешенной для значительной части потенциальных пользователей.

1.3.2. Технологические и алгоритмические ограничения

1. **Низкое соотношение сигнал/шум (SNR):** В неинвазивных системах (особенно ЭЭГ) электрические потенциалы сильно ослабляются и искажаются при прохождении через ткани мозга и череп. Это приводит к низкой скорости передачи информации (ITR).

2. **Трудоемкая калибровка:** Большинство систем требуют длительных и утомительных сессий обучения для каждого нового пользователя, чтобы настроить алгоритмы под его индивидуальные особенности. Одной из главных целей исследователей сейчас является создание систем, работающих «из коробки» (calibration-free).
3. **Артефакты:** Сигналы ИМК легко загрязняются биологическими помехами, такими как моргание глаз или движения мышц, а также внешними электрическими шумами, что затрудняет их точную интерпретацию в реальном времени.

1.3.3. Практические и клинические вызовы

1. **Переход из лаборатории в реальную жизнь:** Большинство достижений ИМК продемонстрированы в строго контролируемых лабораторных условиях. Создание надежного беспроводного оборудования для использования в естественной среде остается сложной задачей.
2. **Удобство датчиков:** Существующие высокоточные электроды часто требуют использования токопроводящего геля, что неудобно для повседневного ношения. Разработка «сухих» датчиков, которые обеспечивали бы лабораторное качество сигнала без дискомфорта, — одно из приоритетных направлений.
3. **Гетерогенность пациентов:** В медицине клиническая эффективность ИМК сильно варьируется из-за различий в характере травм или особенностях протекания болезней (например, после инсульта), что затрудняет создание универсальных реабилитационных решений.

1.3.4. Этические и правовые аспекты

1. **Приватность и безопасность данных:** Существует риск несанкционированного доступа к нейронным данным, которые могут содержать конфиденциальную информацию о психическом состоянии или даже намерениях человека.
2. **Влияние на личность и психику:** Использование ИМК и систем нейромодуляции поднимает вопросы об изменении самоидентификации пользователя, его эмоциональной стабильности и возможных долгосрочных последствиях для здоровья

1.4. Ситуация с Brain-Computer Interface в мире

Здесь все уже стандартно для 2025 года. Лидер - Китай по количеству публикаций и патентов. Северная Америка в топе по количеству стартапов (более 87).

Попросил нейронку нагенерировать инфографику, чтобы стильно модно молодежно было результат смотрите сами (рис 1.4)



Рис. 1.4. Сгенерировано нейронной сетью (NotebookLM)

Сейчас основной фокус идет в направлении инвазивных технологий для медицины.

1. Neuralink

К июню 2025 года пять пациентов с тяжелым параличом уже использовали имплантат «Telepathy» для управления цифровыми устройствами силой мысли. [5]

2. Synchron - разработала систему Stentrode, которая вводится через кровеносные сосуды (без трепанации черепа), позволяет парализованным людям управлять устройствами. [6]

В 2025 году компания начала интеграцию своих решений в экосистемы Apple и NVIDIA, подтвердив безопасность устройства в ходе 12-месячных испытаний

3. **Blackrock Neurotech**[7] - лидер по количеству установленных имплантатов (более 30 пациентов)

Их технологии позволяют парализованным людям печатать со скоростью 90 символов в минуту и управлять роботизированными манипуляторами для повседневных задач (прием пищи, отправка email)



Рис. 1.5. Пример устройства blackrock

Если говорить о неинвазивных методах, то здесь все крутится вокруг портативных ЭЭГ устройств. Это уже больше потребительский сектор, можно измерять свой уровень стресса, возраст мозга, мониторить концентрацию и психическое здоровье.

Выделить стоит троих:

1. **Emotiv** - лидер по производству портативных ЭЭГ устройств [8]
2. **Neurable**[9] - интегрирует ИМК в повседневные наушники для мониторинга концентрации
3. **Kernel**[10] - использует оптическую технологию (fNIRS) для оценки психического здоровья и когнитивных функций.

1.4.1. Прорывные технологии из отчета за 2023-2024

Информация на основе отчета [11].

1. **Восстановление речи:** Достигнута **скорость декодирования речи в 62–78 слов в минуту**, что приближается к темпу естественного разговора
2. **Моторная реабилитация:** Создан «цифровой мост» между мозгом и спинным мозгом, позволивший пациенту с параличом нижних конечностей ходить самостоятельно
3. **Зрение:** Начались работы над проектами Blindsight (Neuralink) и ICVP (Иллинойский технологический институт) для возвращения зрения через прямую стимуляцию зрительной коры

Насчет Blindsight - по состоянию на 2026 год, судя по всему, получил одобрение как прорывная разработка от управления по санитарному надзору за качеством пищевых продуктов и медикаментов США (по данным РИА новости [12]).

1.5. Российские организации, которые занимаются ИМК

Крутится вокруг программы Нейронет 2035[13] - как говорится на сайте, это рынок коммуникаций, основанных на передовых разработках в нейротехнологиях и повышающих продуктивность человеко-машинных систем. В рамках этой национальной технологической инициативы есть много различных компаний, из репорта, который переслали по почте, выделил следующие.

1.5.1. Компании и стартапы

1. **ГК "Нейроботикс"** - компания является одним из ведущих поставщиков нейрофизиологического оборудования и неинвазивных решений в России.

Ключевые продукты: Беспроводные ЭЭГ-системы на сухих электродах серии NeuroPlay (6-канальные гарнитуры и 8-канальные шлемы), программная среда "Когниграф" для создания нейроинтерфейсов и комплекс "Шелтер" для оценки когнитивных функций

2. **Компания "Моторика"** - лидер в области киберпротезирования [14]

Сенсорная обратная связь: Совместно со Сколтехом и ДВФУ компания успешно испытала систему «ощущения» протезов, позволяющую пациентам чувствовать текстуру и силу сжатия, а также избавляться от фантомных болей.

Инновации: В 2024 году было объявлено о создании Центра кибернетической медицины и нейропротезирования для масштабирования этих технологий

3. **Исследовательский центр Neurotrend (Нейротренд)** - крупнейшая российская нейромаркетинговая компания [15]

Использование собственных алгоритмов обработки данных для оценки когнитивной нагрузки и вовлеченности аудитории

4. Проект «Нейрочат» [16]

Позволяет пациентам с тяжелыми нарушениями речи и моторики (после инсультов, травм) набирать текст на экране силой мысли

5. Neiry

занимаются разработкой потребительских устройств для мониторинга ЭЭГ, нейроотклика и когнитивных способностей - для обучения и wellness применения.

6. BrainBit

носимые ЭЭГ устройства

7. NeuroAssist Tech

Нейро-реабилитационные системы на основе нейронных сетей и экзоскелеты.

8. NTINeuroNet Consortsium

объединение университетов, НИИ, стартапов и медицинских центров для разработки нейроинтерфейсов, нейропротезирования и когнитивных ИИ систем.

1.5.2. НИИ

1. Институт Курчатова

Участвует в исследованиях в области декодирования сигналов мозга и нейро-модуляции, а также гибридных систем, совмещающих ЭЭГ и fNIRS.

2. Институт высшей неврологической активности и нейрофизиологии.

Фокусируется на фундаментальной науке и моделях коммуникации мозг-компьютер.

3. Российский Квантовый Центр

Исследует применение квантовых технологий в области обработки нейронных сигналов

4. Skolkovo Foundation NeuroTech Cluster

Центр нейробиологии и нейрореабилитации им. В. Зельмана выступает научным координатором проектов по созданию двунаправленных нейропротезов. Также Сколково в целом поддерживает стартапы в этом направлении

1.5.3. Университеты

1. **ДФУ (Дальневосточный федеральный университет)**

Единственное место в России, где проводятся уникальные операции по вживлению электродов в периферические нервы и спинной мозг для «очувствления» конечностей [14]

2. **МФТИ** - активно занимаются машинным обучением в ВСИ и обработке нейронных сигналов

3. **ИТМО** - есть некоторые программы, посвященные НМИ(human-machine interaction) и нейроинформатике.

4. **МИФИ** - занимаются разработками систем мониторинга ЭЭГ и приложениями в области нейро-безопасности.

5. **МГУ** - также есть некоторое количество программ в области нейрофизиологии и когнитивной нейронауки.

Глава 2

Дополнительные материалы

2.1. Формулы

Ковариационная матрица (Covariance Matrix)

$$C = \frac{1}{N-1} X X^T \in \mathbb{R}^{N \times N} \quad (2.1)$$

Риманово расстояние (Riemannian Distance)

$$\delta_R(C_1, C_2) = \left\| \log \left(C_1^{-1/2} C_2 C_1^{-1/2} \right) \right\|_F = \left[\sum_{i=1}^N \log^2 \lambda_i \right]^{1/2} \quad (2.2)$$

здесь λ_i — это вещественные собственные значения матрицы $(C_1^{-1/2} C_2 C_1^{-1/2})$, а $\| \cdot \|_F$ обозначает норму Фробениуса

Риманово геометрическое среднее (Riemannian Geometric Mean)

$$G(C_1, \dots, C_I) = \operatorname{argmin}_{C \in \mathcal{C}(n)} \sum_{i=1}^I \delta_R^2(C, C_i) \quad (2.3)$$

где $\mathcal{C}(n)$ — пространство SPD-матриц. Этот метод (RMDM) устойчив к шуму и хорошо обобщает данные.

Регрессия для оценки взгляда (Gaze Estimation) В подразделе о контроле взгляда (который также является частью интерфейсов в статье) используется квадратичная полиномиальная модель:

$$g = f(e) = v c \quad (2.4)$$

где $g = (g_x, g_y)$ — координаты взгляда, c — коэффициенты модели, а вектор v включает члены до второго порядка:

$$v = (1, x, y, xy, x^2, y^2, m, n) \quad (2.5)$$

здесь (x, y) — координаты зрачка, а (m, n) — координаты угла глаза. Для решения этой задачи используется метод наименьших квадратов

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Non-Invasive Brain-Computer Interfaces: State of the Art and Trends / B. J. Edelman [и др.] // IEEE Reviews in Biomedical Engineering. — 2025. — Т. 18. — С. 26—49. — ISSN 19411189. — DOI: [10.1109/RBME.2024.3449790](https://doi.org/10.1109/RBME.2024.3449790).
2. Progress in Brain Computer Interface: Challenges and Opportunities / S. Saha [и др.]. — 02.2021. — DOI: [10.3389/fnsys.2021.578875](https://doi.org/10.3389/fnsys.2021.578875).
3. OpenVibe - Wikipedia — en.wikipedia.org. — <https://en.wikipedia.org/wiki/OpenVibe>.
4. bci2000.org. — <https://www.bci2000.org/>.
5. Top 10 Brain-Computer Interface Companies in 2025. — URL: <https://www.sphericalinsights.com/blogs/top-10-companies-leading-the-brain-computer-interface-market-in-2025-key-players-statistics-future-trends-2024-2035>.
6. The Technology | Synchron. — URL: <https://synchron.com/technology>.
7. Blackrock Neurotech | Empowered by Thought. — URL: <https://blackrockneurotech.com/>.
8. Brain Data Measurement & Wireless EEG Solutions | Emotiv. — URL: <https://www.emotiv.com>.
9. Neurable | The Mind. Unlocked. | Work Smarter, Not Longer. — URL: <https://www.neurable.com/>.
10. Kernel. — URL: <https://www.kernel.com/>.
11. Brain-computer interfaces in 2023–2024 / S. Chen [и др.] // Brain-X. — 2025. — Март. — Т. 3. — DOI: [10.1002/brx2.70024](https://doi.org/10.1002/brx2.70024).
12. *Новости Р.* Neuralink впервые вживит человеку зрительный имплант, заявил Маск - РИА Новости, 31.03.2025. — URL: <https://ria.ru/20250331/neuralink-2008320527.html> ; [Online; accessed 2026-01-29].
13. Нейронет — nti2035.ru. — <https://nti2035.ru/markets/mneuronet>.

14. Кибер-протез с новой системой очувствления испытали в России | Новости науки. — <https://xn--80aa3ak5a.xn--p1ai/news/zavershilsya-4-y-etap-issledovaniy-po-ochuvstvleniyu-protezo- i - kupirovaniyu-fantomnykh-boley/>.
15. Крупнейшая российская нейромаркетинговая компания - Нейротренд. — URL: <https://neurotrend.ru/>.
16. Коммуникационная система НейроЧат - официальный сайт. — URL: <https://neurochat.pro/>.