

Активность мозга при совершении движений человеком: взгляд с позиций нелинейной динамики

Храмов Александр Евгеньевич

Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград



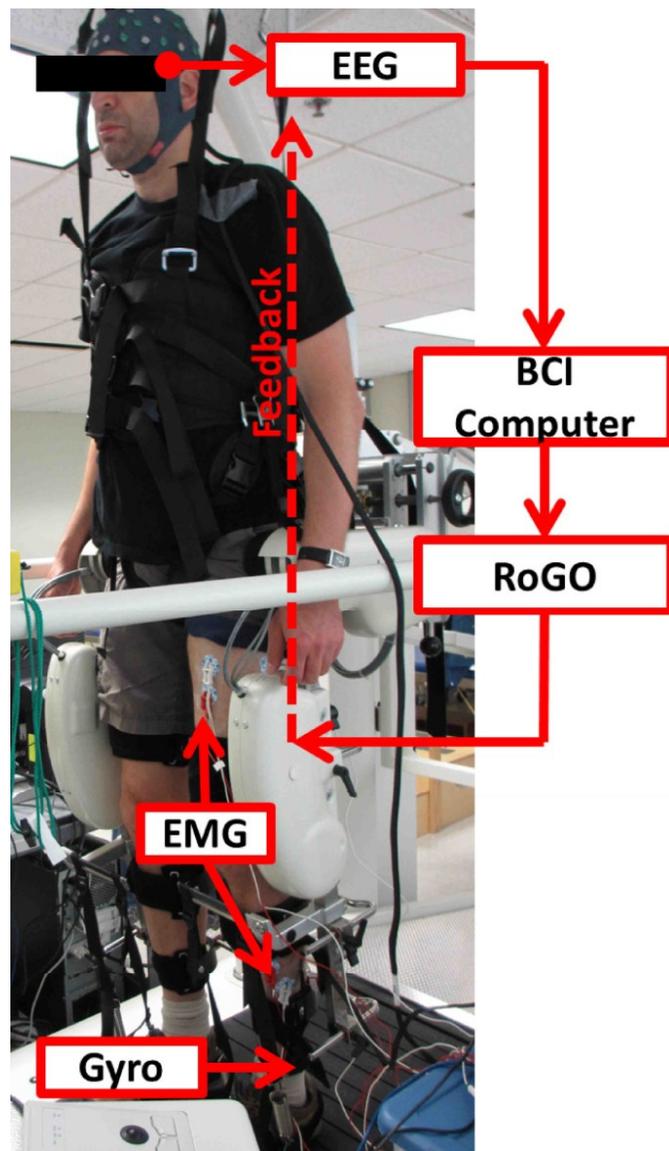
Почему это важно?

- Понимание фундаментальных механизмов управления двигательной активностью у млекопитающих и человека



Почему это важно?

- Нейрореабилитация и/или замещение двигательной активности внешними устройствами с использованием нейроинтерфейсов



История проблемы

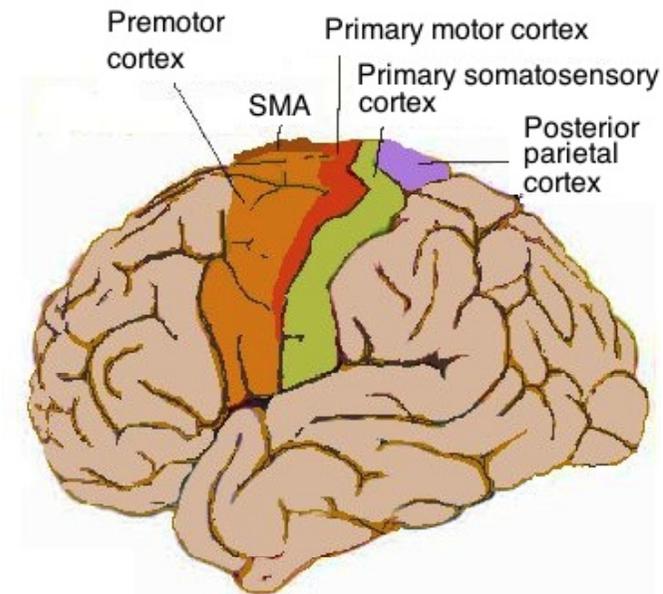
Середина 1950х – первые эксперименты с макаками-резус с вживленными многоэлектродными матрицами

Начало 1980х – новый интерес к подобным экспериментам:

запись сигналов отдельных нейронов

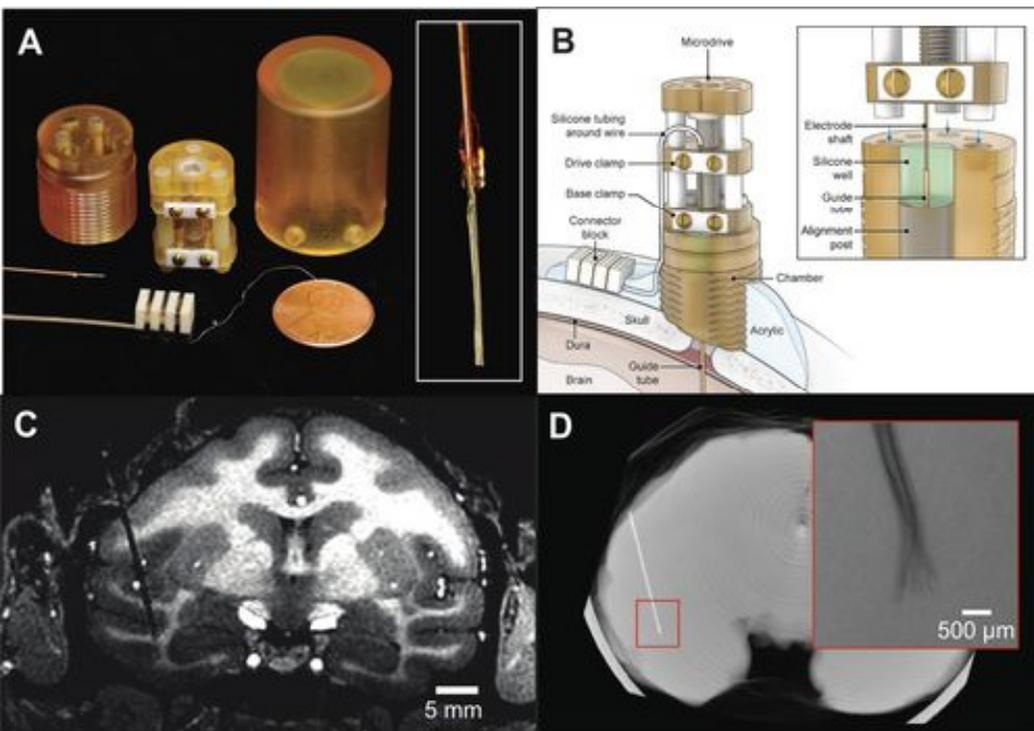
Конец 1990х – начало 2000х годов – смена парадигмы
информацию кодируют не отдельные нейроны, а
распределенные ансамбли

Распределенные ансамбли нейронов представляют собой истинные физиологические «единицы» мозга млекопитающих

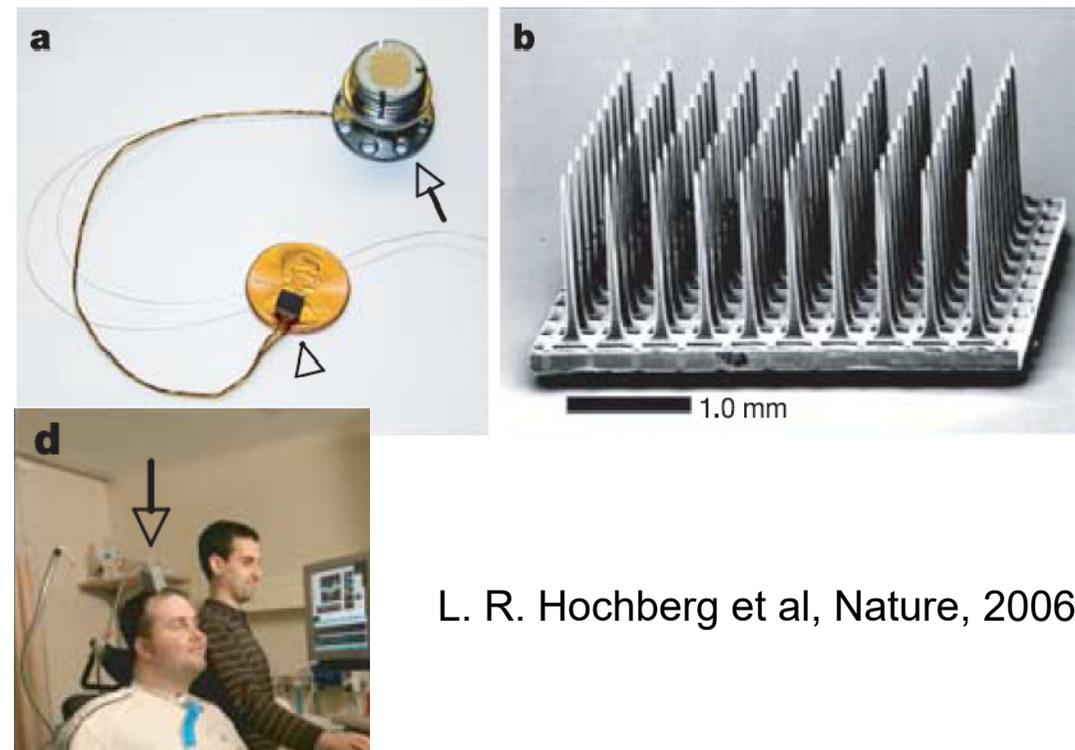


Supplementary motor area
labelled SMA

Имплантируемые системы

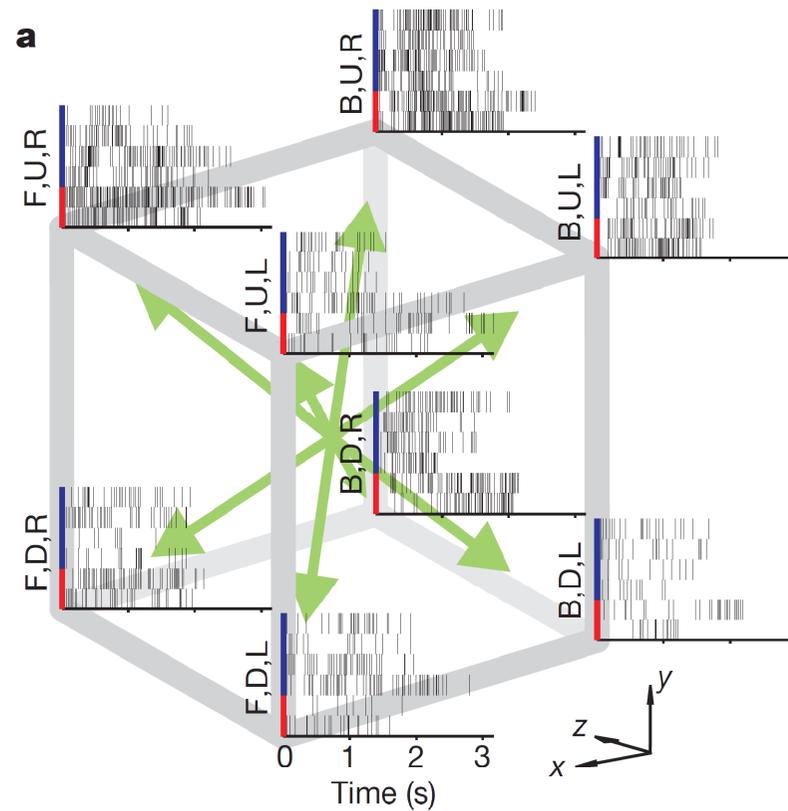
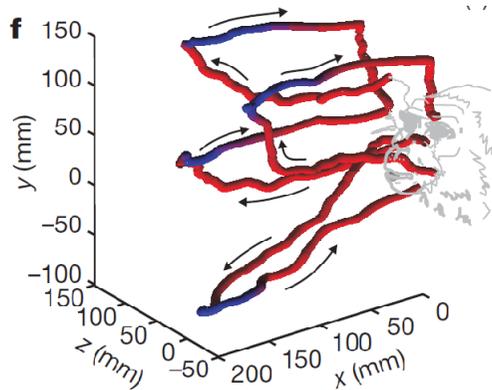
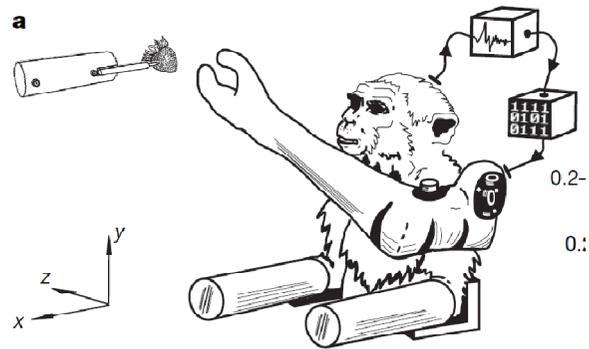


D. B. T. McMahon et al, JNP, 2014



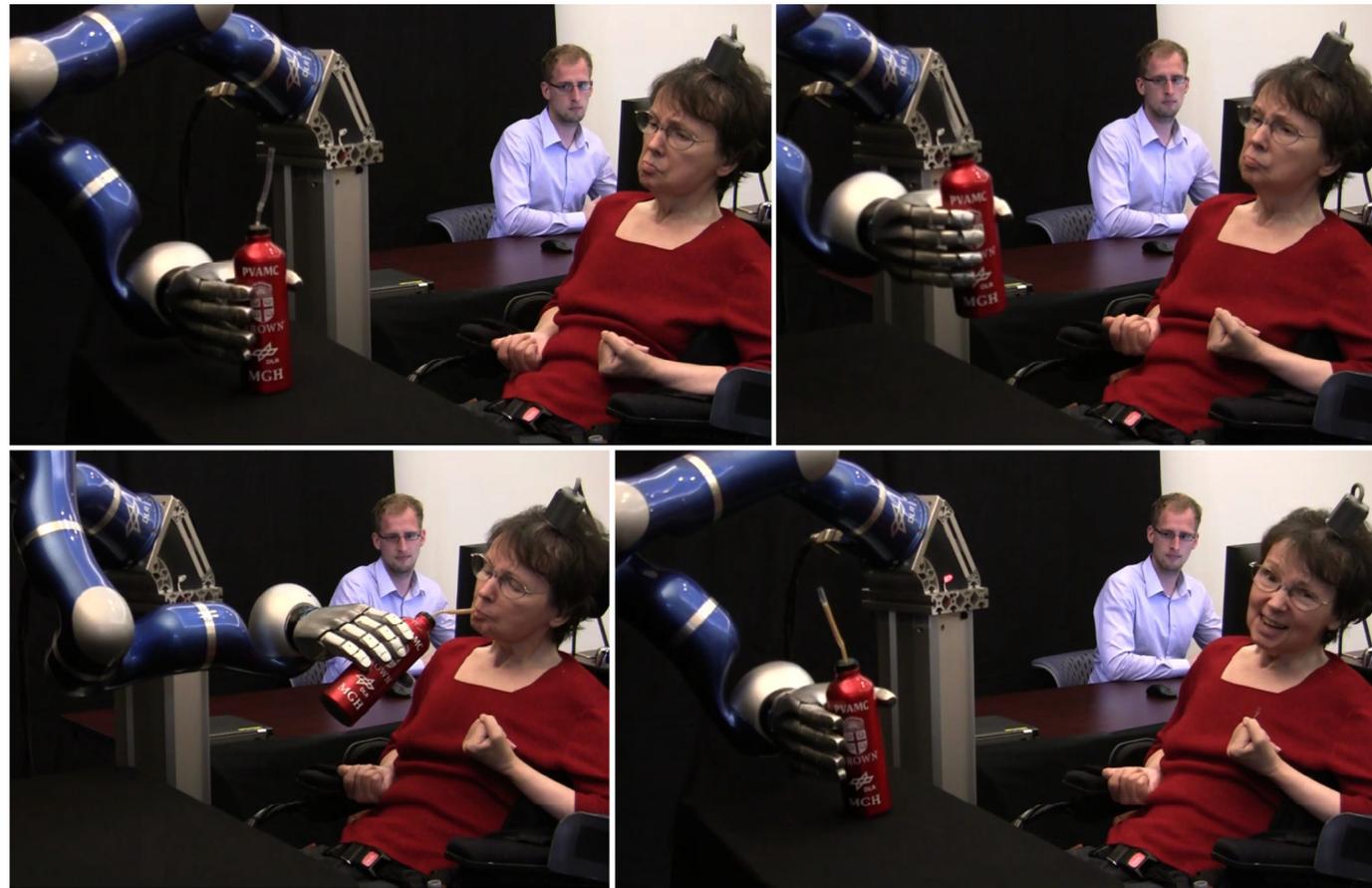
L. R. Hochberg et al, Nature, 2006

Мысленное управление манипулятором



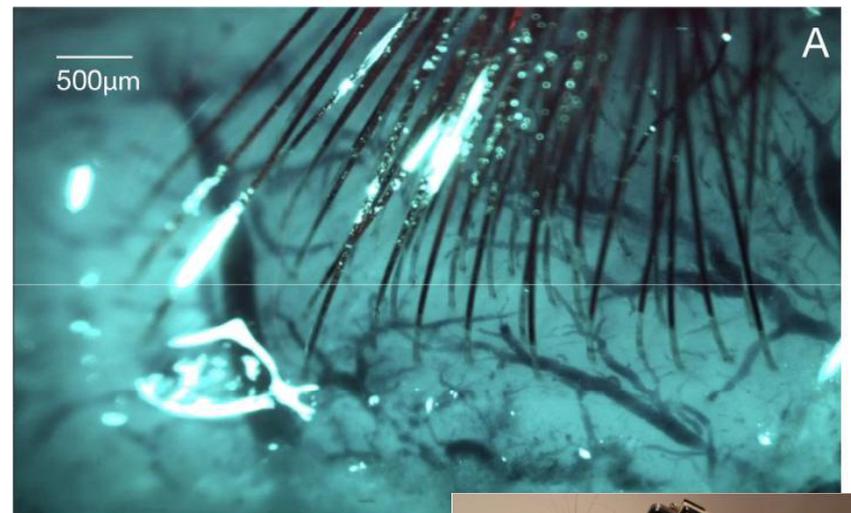
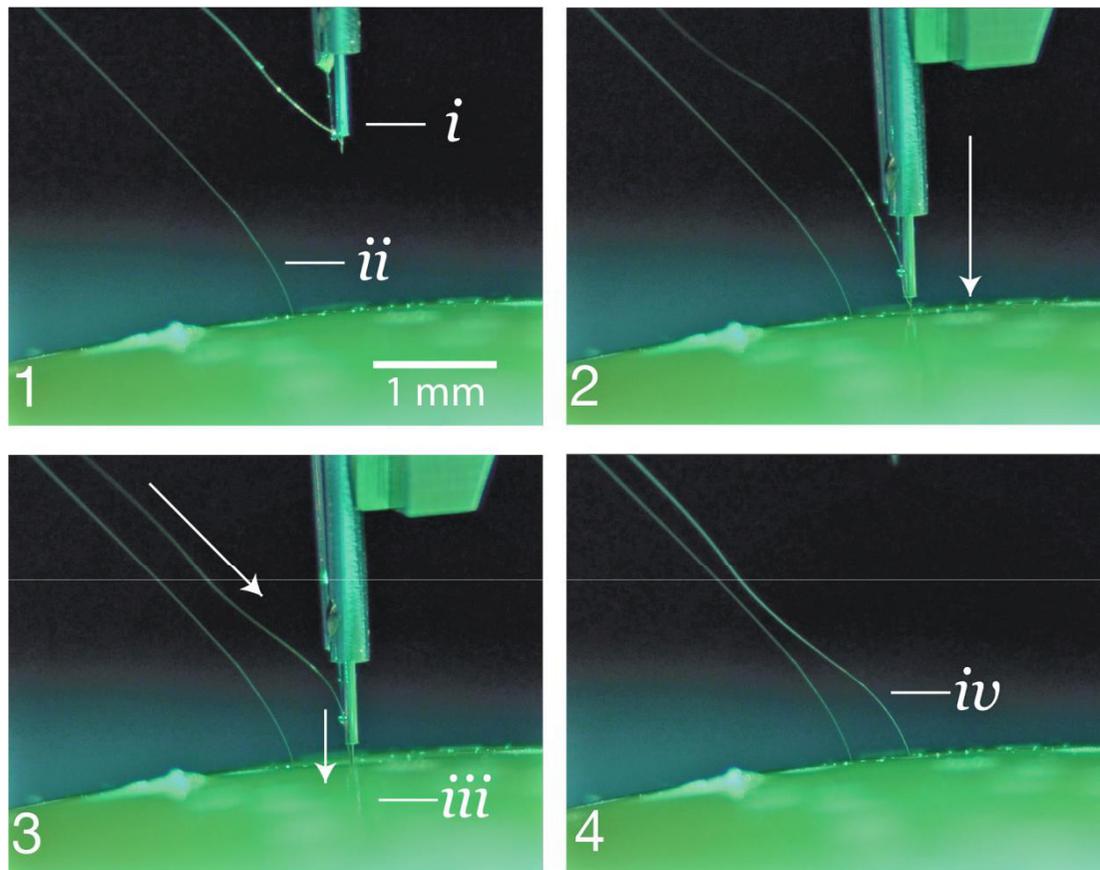
M. Velliste, S. Perel, M. C. Spalding, A. S. Whitford,
A. B. Schwartz, Nature, 2008

Пациент с тетраплегией

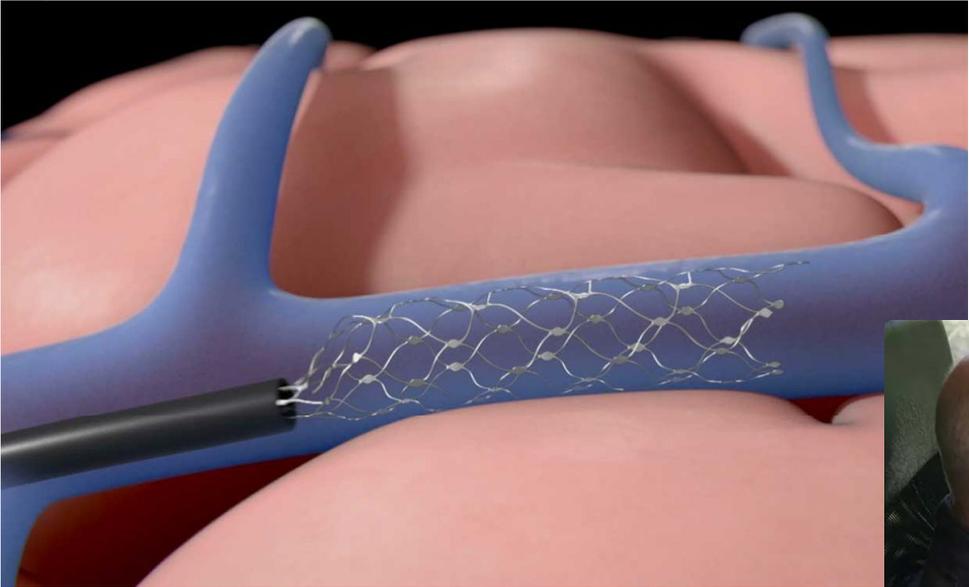


L. R. Hochberg et al
Nature, 2012

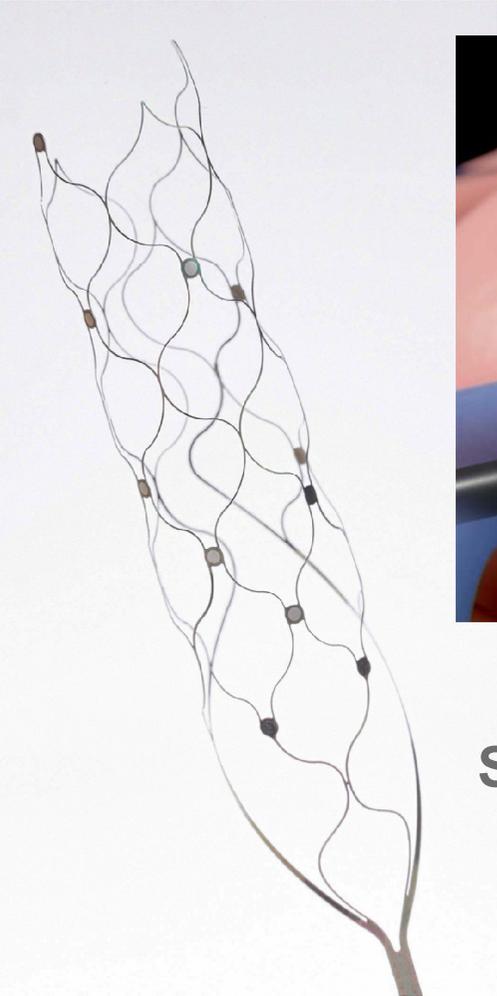
Интегрированная платформа с тысячами каналов: Elon Musk & Neuralink



Электроды-стенды («stentrode»)



Stentrode Brain-Computer Interface

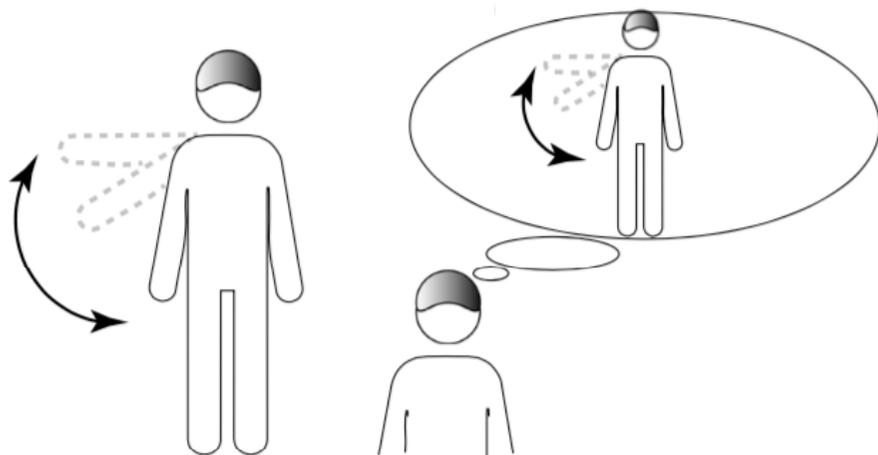


Synchron's stentrode



Неинвазивные исследования

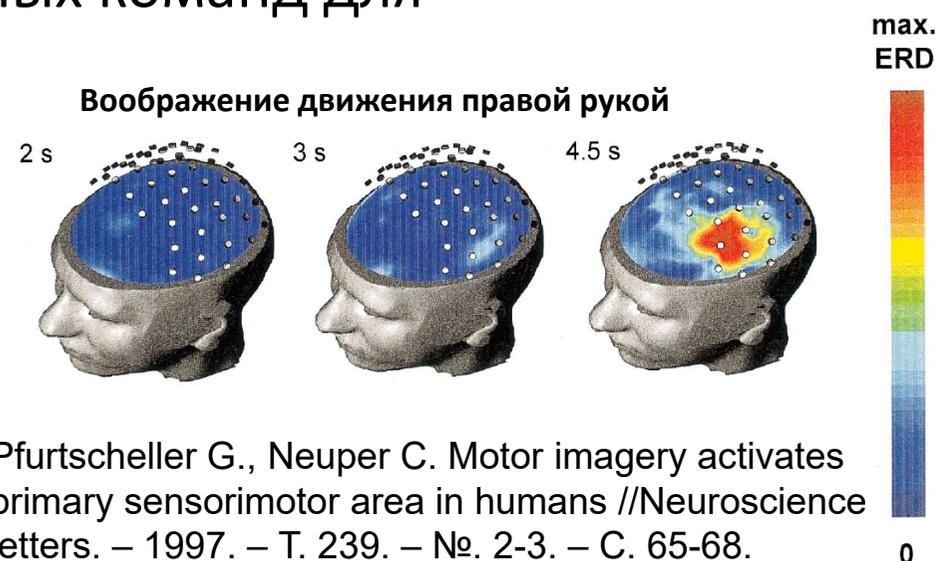
- Формирование управляющих ментальных команд для интерфейсов мозг-компьютер



Event-related synchronization/ desynchronization (ERS/ERD)

– синхронизация/десинхронизация, связанные с событием.

Во время воображения движений происходит подавление энергии активности мозга в альфа/мю и бета диапазонах



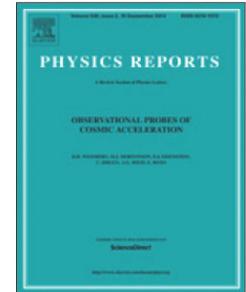
Возникновение ERD в соматосенсорной коре является хорошо известным маркером реальной и воображаемой двигательной активности, который можно использовать для классификации



Contents lists available at [ScienceDirect](#)

Physics Reports

journal homepage: www.elsevier.com/locate/physrep



Physical principles of brain–computer interfaces and their applications for rehabilitation, robotics and control of human brain states

Alexander E. Hramov^{a,b,c}, Vladimir A. Maksimenko^{a,c},
Alexander N. Pisarchik^{a,d,*}

^a *Laboratory of Neuroscience and Cognitive Technology, Innopolis University, Universitetskaya Str. 1, 420500 Innopolis, Republic of Tatarstan, Russia*

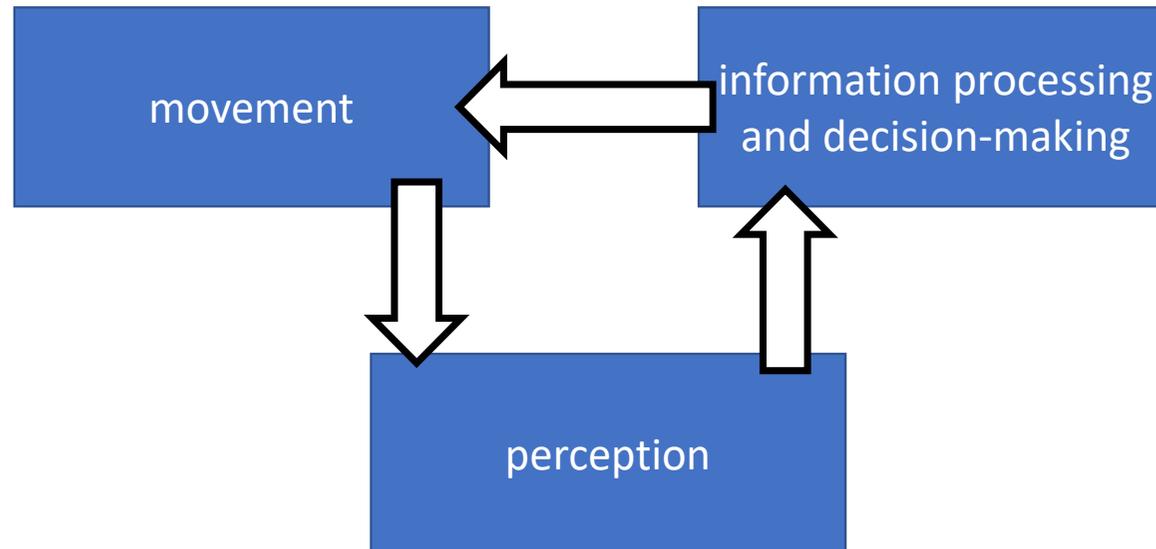
^b *Immanuel Kant Baltic Federal University, A. Nevskogo Str. 14, 236016 Kaliningrad, Russia*

^c *Saratov State Medical University, Bolshaya Kazachia Str. 112, 410012 Saratov, Russia*

^d *Center for Biomedical Technology, Universidad Politécnic de Madrid, Campus Montegancedo, 28223 Pozuelo de Alarcón, Spain*

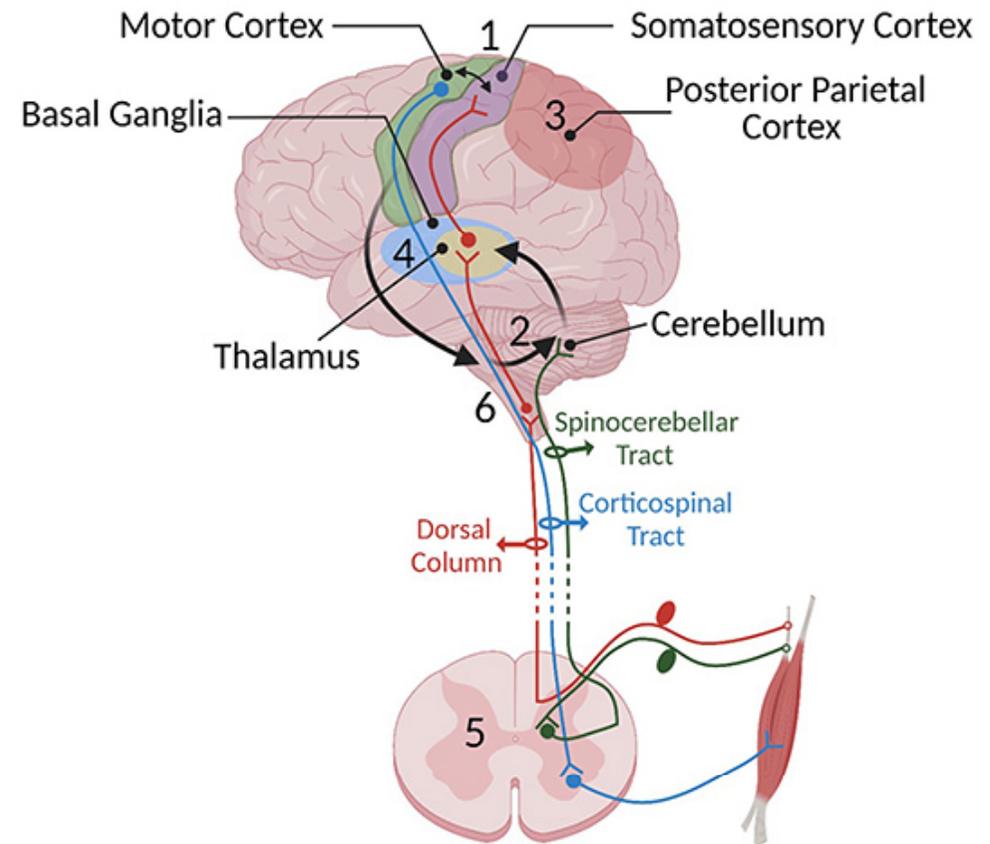
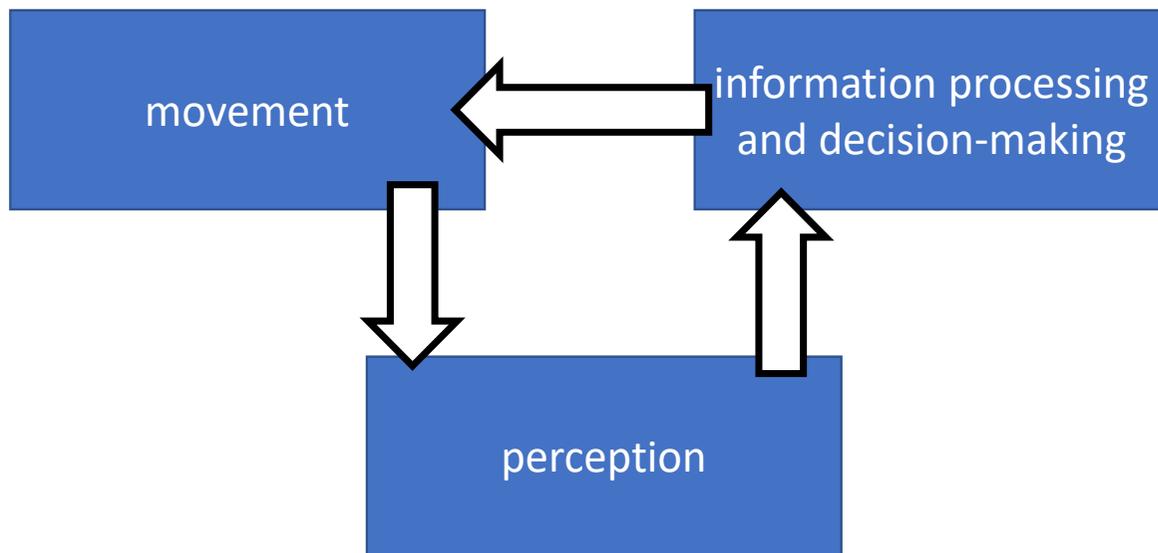


Сенсомоторная интеграция



Сочетание процессов восприятия, переработки информации, принятия решения и движения при наличии цепи обратной связи

Сенсомоторная интеграция



A.S. Asan et al, Frontiers in Neuroscience, 2022

Нелинейно-динамические подходы для анализа сенсомоторных процессов

- Сложности сигналов: частотно-временные характеристики, сложность и т.д.

Нелинейно-динамические подходы для анализа сенсомоторных процессов

- Сложности сигналов: частотно-временные характеристики, сложность и т.д.
- Функциональные связи в головном мозге

Июнь 2021 г.

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

Том 191, № 6

ОБЗОРЫ АКТУАЛЬНЫХ ПРОБЛЕМ

Функциональные сети головного мозга: от восстановления связей до динамической интеграции

А.Е. Храмов, Н.С. Фролов, В.А. Максименко,
С.А. Куркин, В.Б. Казанцев, А.Н. Писарчик

Представлен обзор физико-математических методов восстановления функциональных сетей головного мозга на основании регистрируемой активности головного мозга. Рассматриваются наиболее эффективные и популярные методы, а также их преимущества, недостатки и ограничения применения. Обсуждаются вопросы применения теории сложных сетей к восстанавливаемым функциональным сетям головного мозга для объяснения эффектов динамической интеграции в головном мозге и их влияния на разнообразную функциональность головного мозга и сознания, а также процессов, приводящих к патологической активности центральной нервной системы. Рассматриваются вопросы приложений данных подходов как к описанию функционирования головного мозга при различных когнитивных и патологических процессах, так и для создания новых нейроинтерфейсов, основанных на детектировании изменения функциональных связей в головном мозге.

Нелинейно-динамические подходы для анализа сенсомоторных процессов

- Сложности сигналов: частотно-временные характеристики, сложность и т.д.
- Функциональные связи в головном мозге
- Внешнее воздействие и биологическая обратная связь

Рекуррентный анализ

J.-P. Eckmann, S.O. Kamphorst, D. Ruelle, Recurrence plots of dynamical systems, *Europhys. Lett.* 5 (1987) 973–977.†

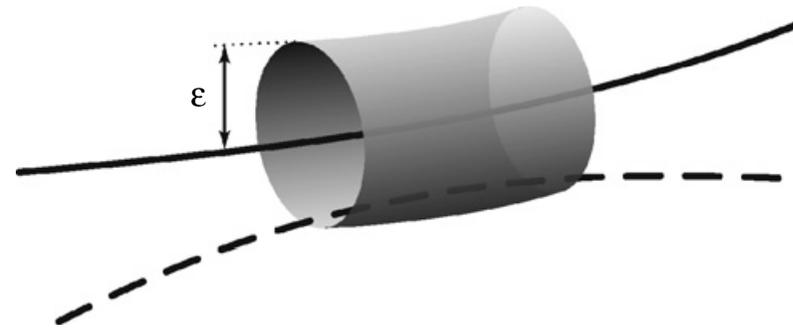
Recurrence is a fundamental property of system dynamics reflected fact of possibility of short-term prediction. A powerful tool for their visualisation and analysis is *recurrence plot* (RP)

The corresponding RP is based on the following recurrence matrix:

$$\mathbf{R}_{i,j} = \begin{cases} 1: \vec{x}_i \approx \vec{x}_j, \\ 0: \vec{x}_i \not\approx \vec{x}_j, \end{cases} \quad i, j = 1, \dots, N,$$

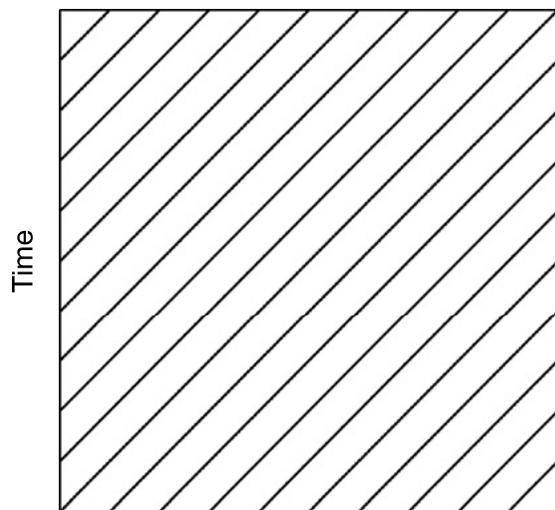
where N is the number of considered states and $x_i \approx x_j$ means equality up to an error (or distance) ε .

ε is essential as systems often do not recur exactly to a formerly visited state but just approximately.

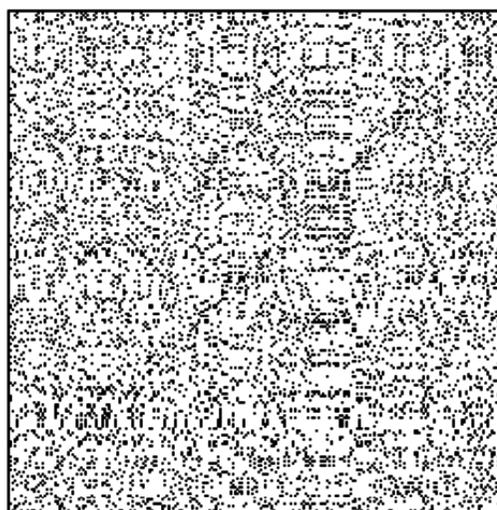


$$\mathbf{R}_{i,j}(\varepsilon) = \Theta(\varepsilon - \|\vec{x}_i - \vec{x}_j\|), \quad i, j = 1, \dots, N$$

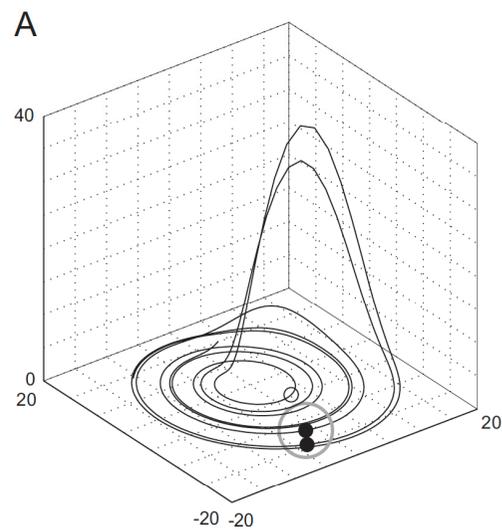
Примеры рекуррентных диаграмм



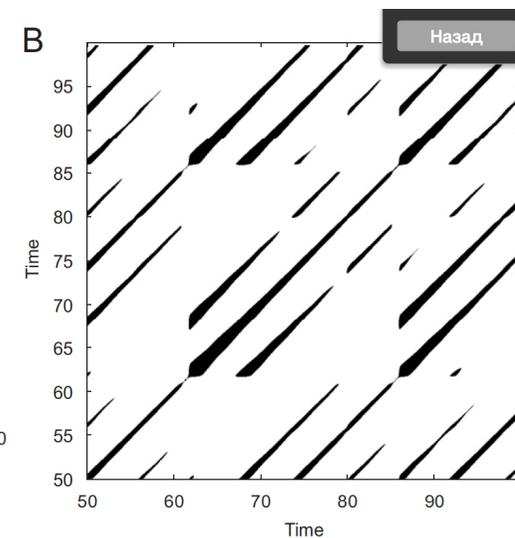
Time
Time
Периодический сигнал с одной частотой



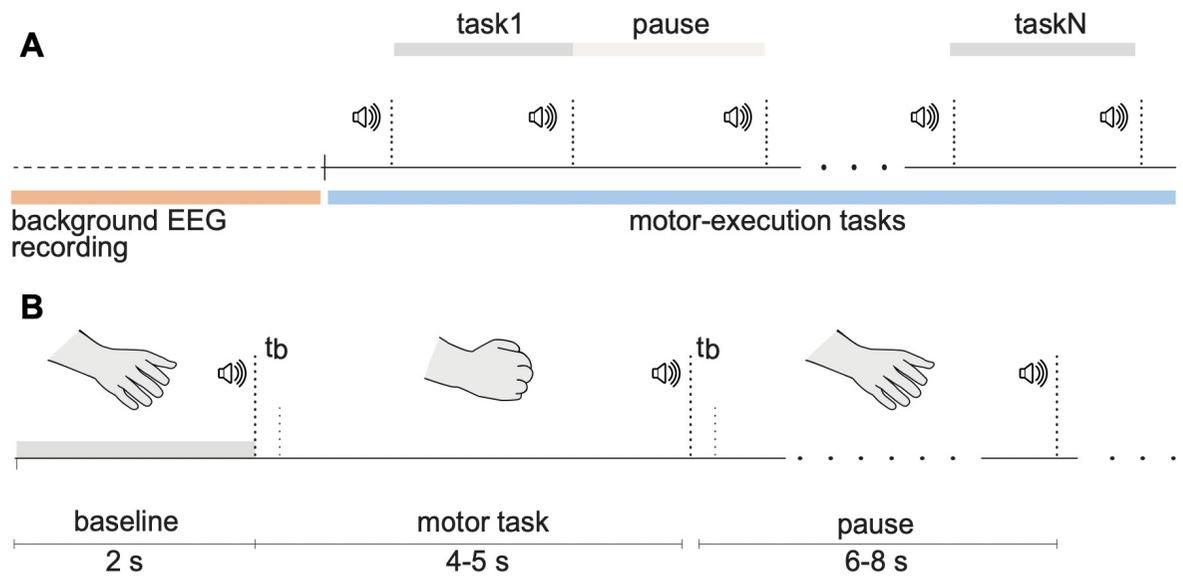
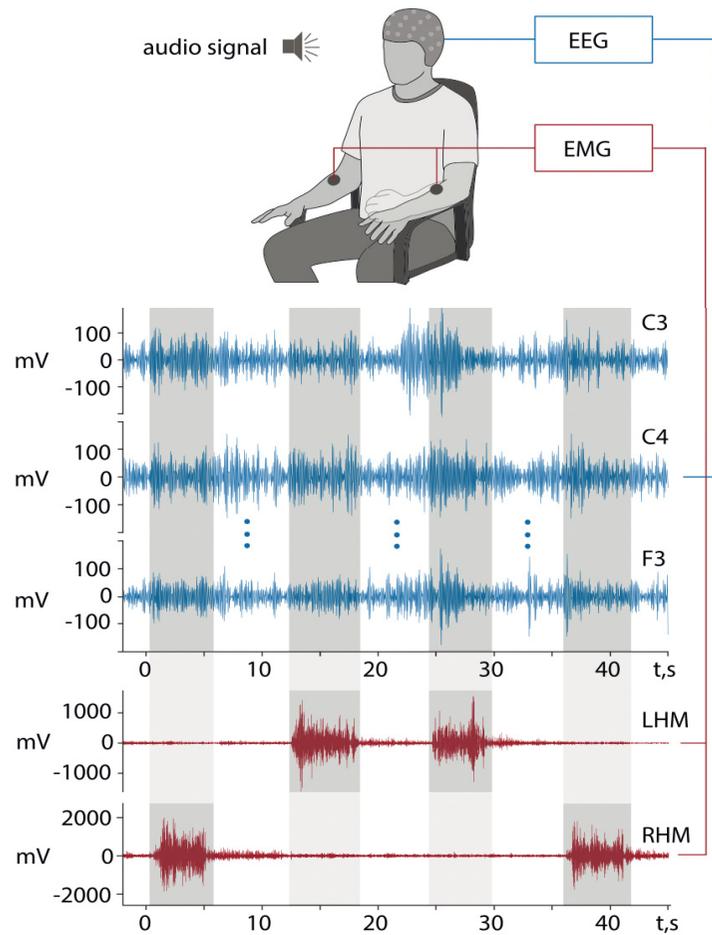
Белый шум

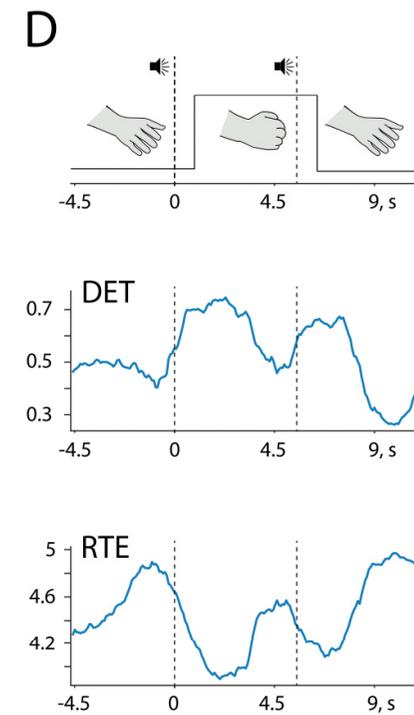
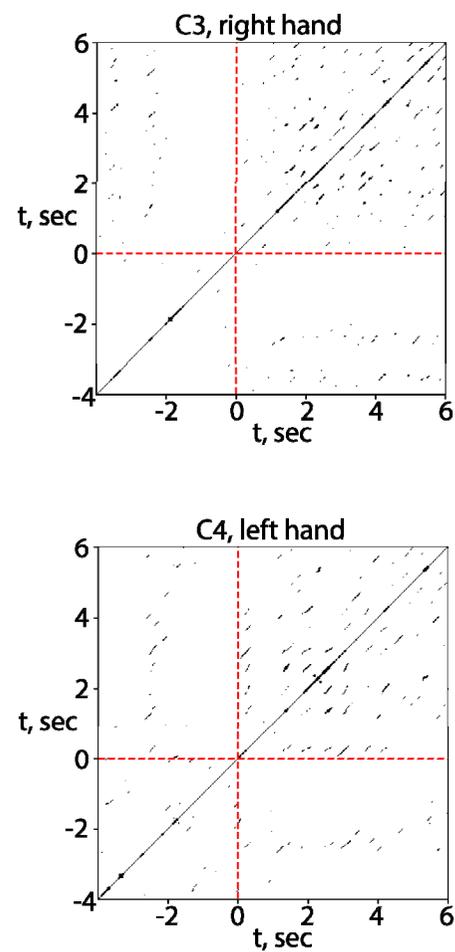
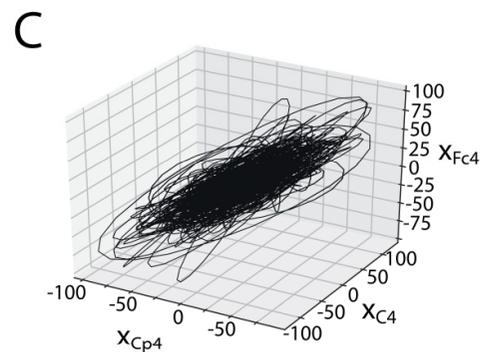
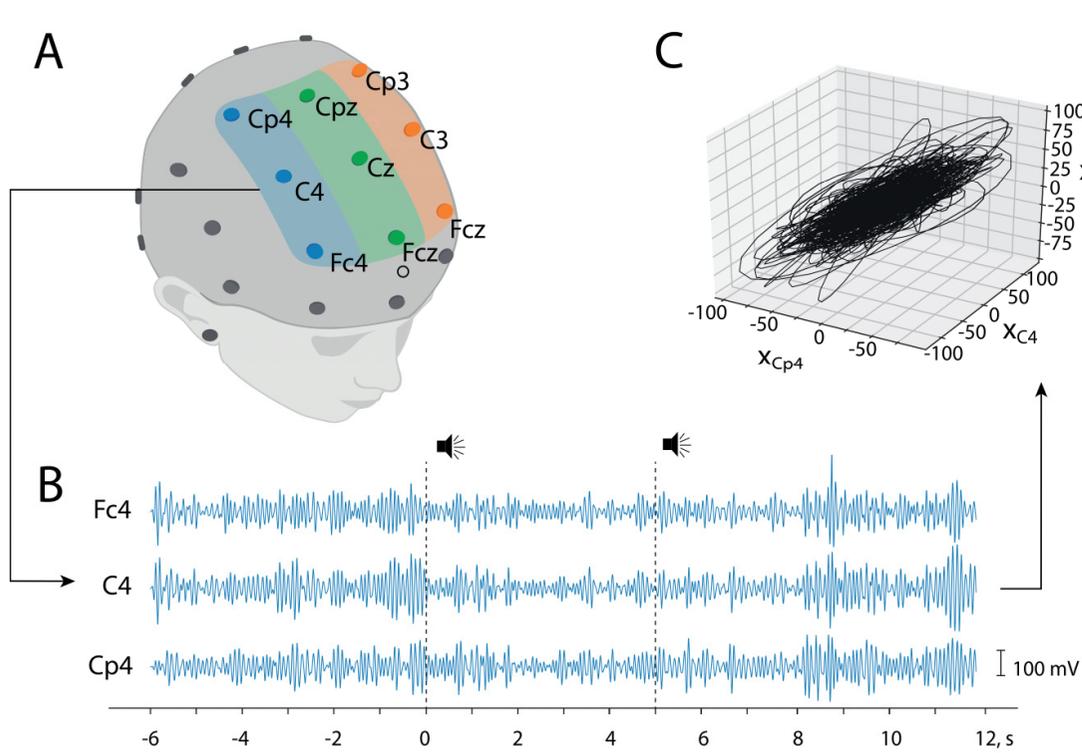


Система Реслера



Простой эксперимент с движениями





$$DET = \frac{\sum_{l=l_{min}}^w lP(l)}{\sum_{l=1}^w lP(l)},$$

$$RTE = - \sum_{t_w=1}^{T_{max}} p(t_w) \ln p(t_w),$$

$$p(t_w) = h(t_w) / \sum_{t_w} h(t_w)$$

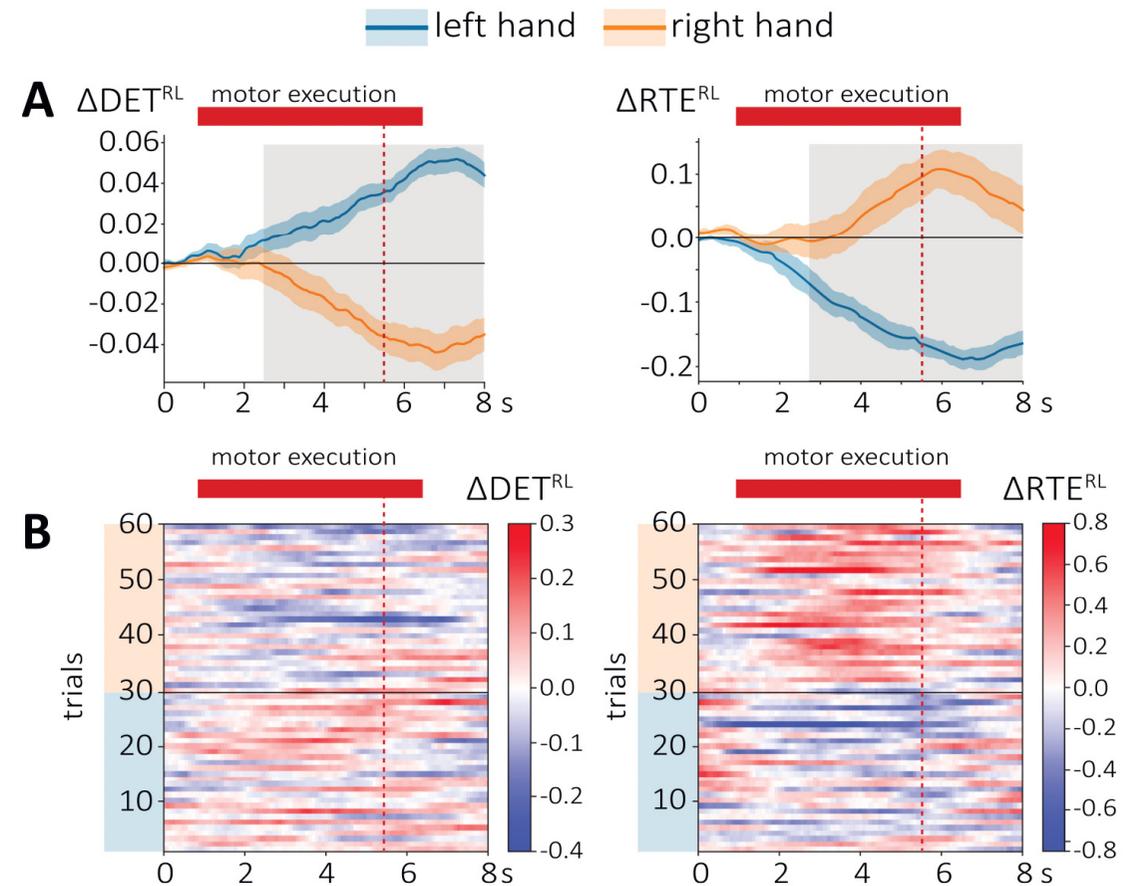
Характеристики сложности при совершении движений левой/правой рукой

$$\Delta DET(t) = DET(t) - DET_{bckg},$$

$$\Delta RTE(t) = RTE(t) - RTE_{bckg},$$

$$\Delta DET^{RL}(t) = \Delta DET^R(t) - \Delta DET^L(t),$$

$$\Delta RTE^{RL}(t) = \Delta RTE^R(t) - \Delta RTE^L(t),$$



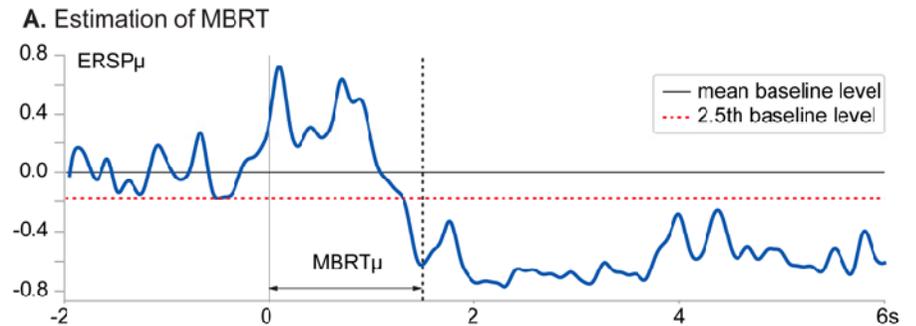
Возрастные изменения совершенства моторных действий у пожилых испытуемых



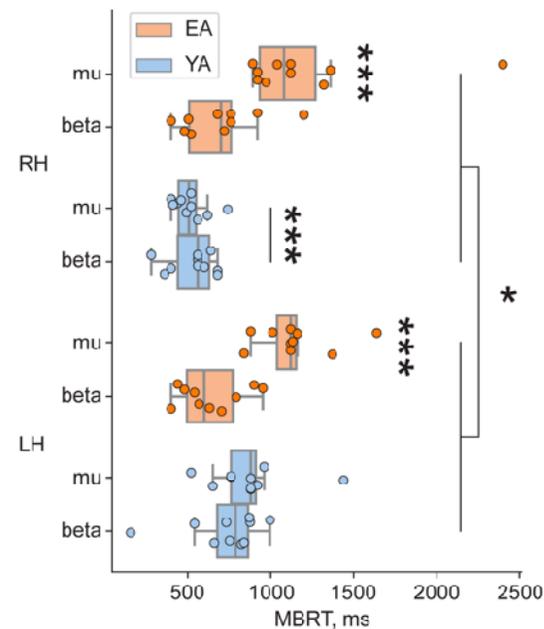
- **YA group**; age: 26.1 ± 5.15 (MEAN \pm SD); range: 19-33



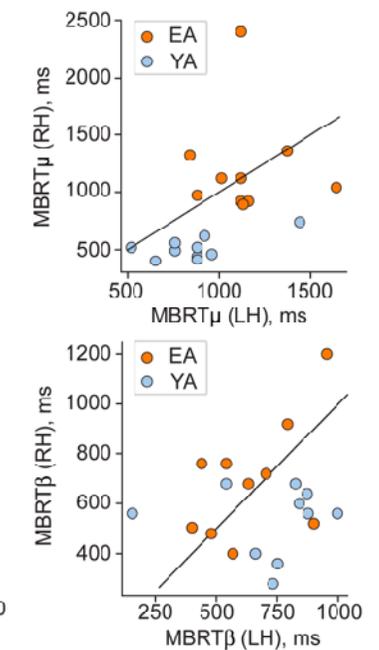
- **EA group**; age: 65 ± 5.69 (MEAN \pm SD); range: 55-72



B. Mixed-design ANOVA



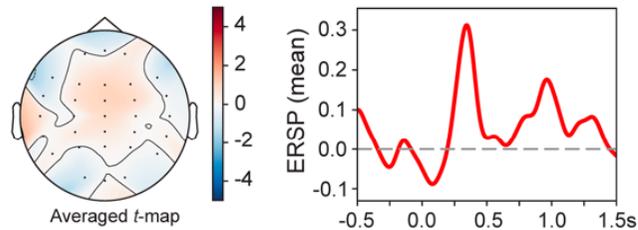
C. Paired observations



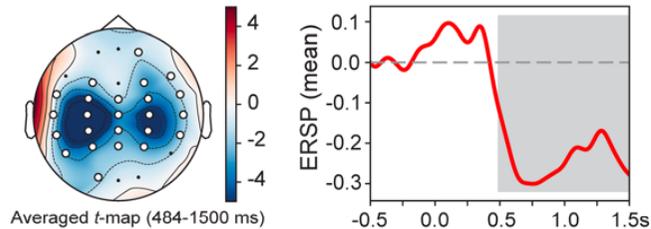
Возрастные изменения совершения моторных действий у пожилых испытуемых

RH condition, YA group

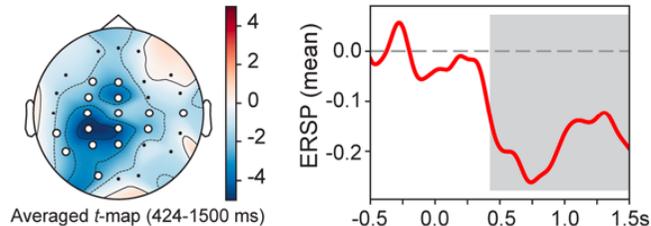
A. Theta-band cluster, 31 sensor, $p = 0.289$



B. Mu-band cluster, 24 sensors, $p = 0.002$

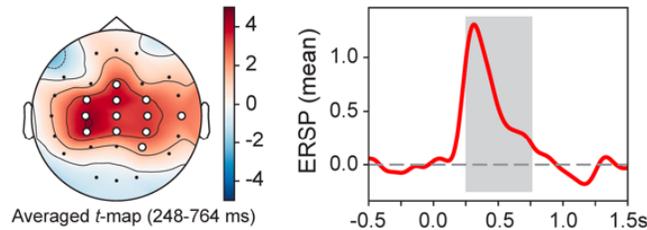


C. Beta-band cluster, 16 sensors, $p = 0.003$

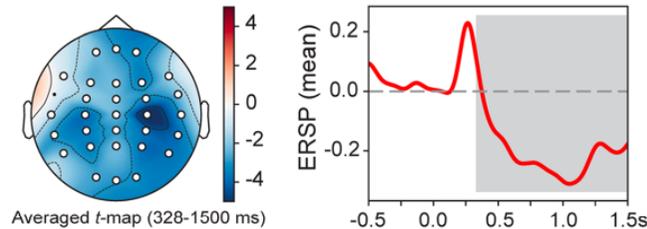


RH condition, EA group

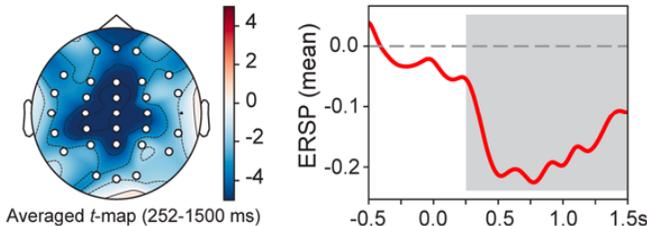
D. Theta-band cluster, 12 sensors, $p = 0.002$



E. Mu-band cluster #2, 30 sensors, $p = 0.003$

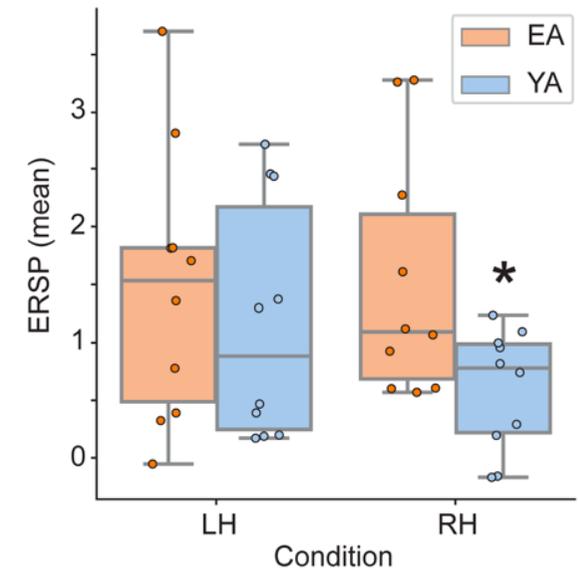


F. Beta-band cluster, 30 sensors, $p = 0.002$

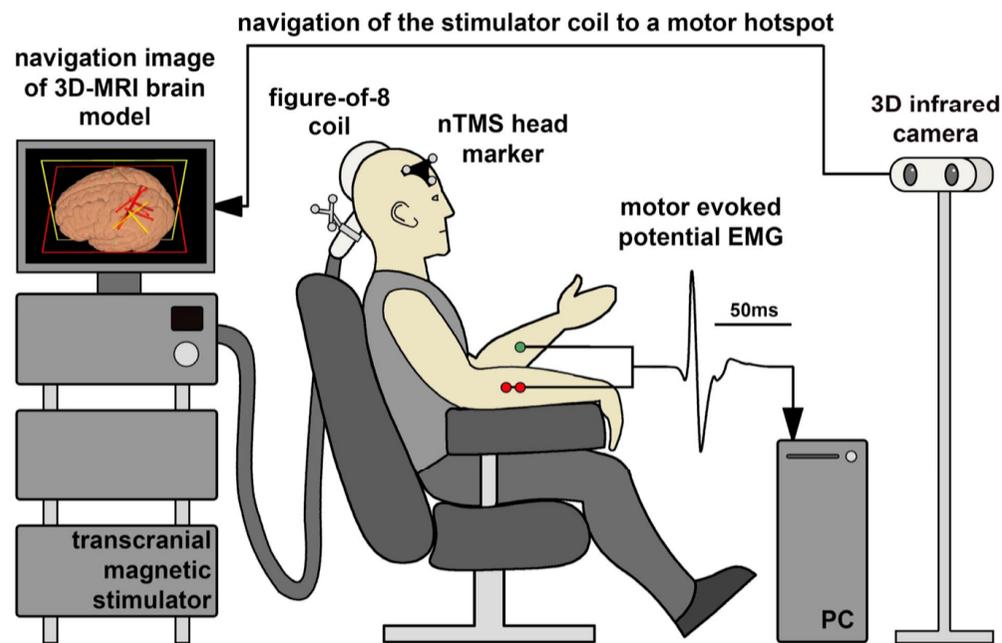


- Пространственно-временные кластеры (слева) и среднее значение спектральной мощности вызванного потенциала соответствующих кластеров (справа)

Mixed-design ANOVA

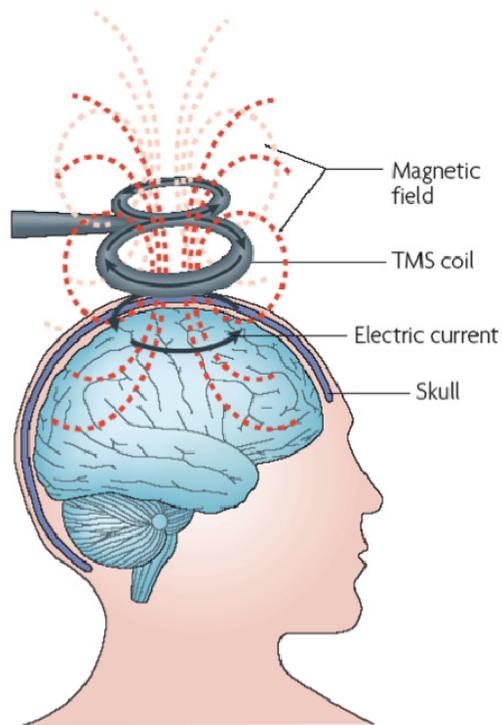


Возможность использования ТМС для облегчения сенсомоторной интеграции во время выполнения задания моторного воображения



Neuro MS/D magnetic stimulator (Neurosoft, Ivanovo, Russia)

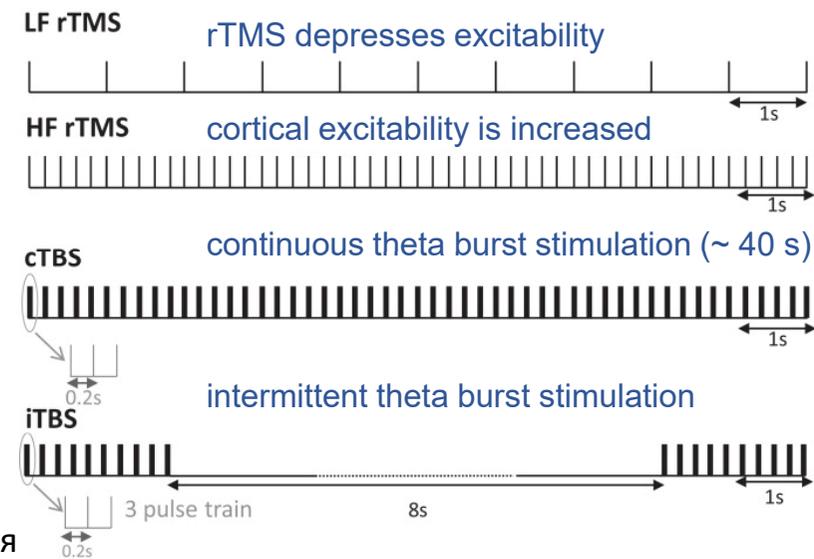
Транскраниальная магнитная стимуляция



TMS - неинвазивная форма стимуляции мозга, при которой изменяющееся магнитное поле используется для создания электрического тока в определенной области мозга посредством электромагнитной индукции.

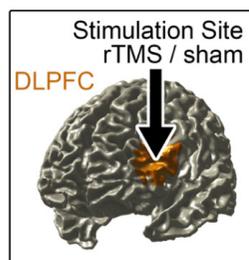
Одноимпульсная TMS обычно используется для исследования функционирования мозга

Повторяющаяся TMS (rTMS) используется для инициации изменений активности мозга, которые могут длиться после периода стимуляции.



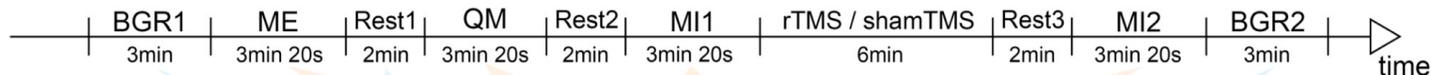
Klomjai, W., Katz, R., & Lackmy-Vallée, A. (2015). Basic principles of transcranial magnetic stimulation (TMS) and repetitive TMS (rTMS). *Annals of physical and rehabilitation medicine*, 58(4), 208-213.

Возможность использования ТМС для облегчения сенсомоторной интеграции во время выполнения задания моторного воображения

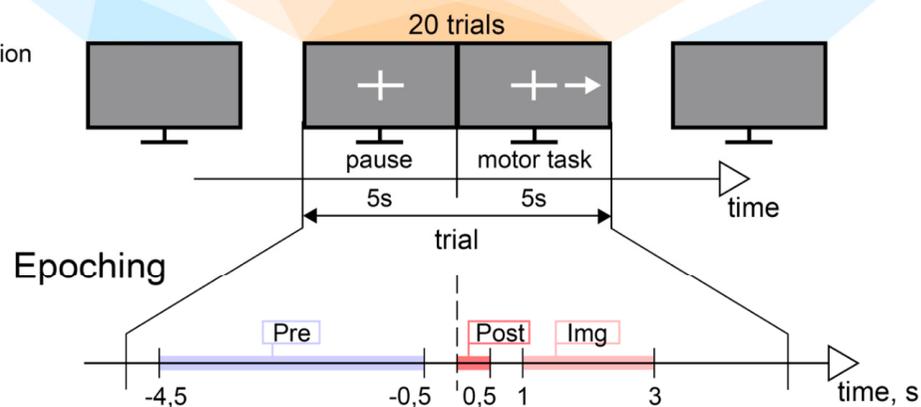


left dorsolateral prefrontal cortex (DLPFC)

Experimental session

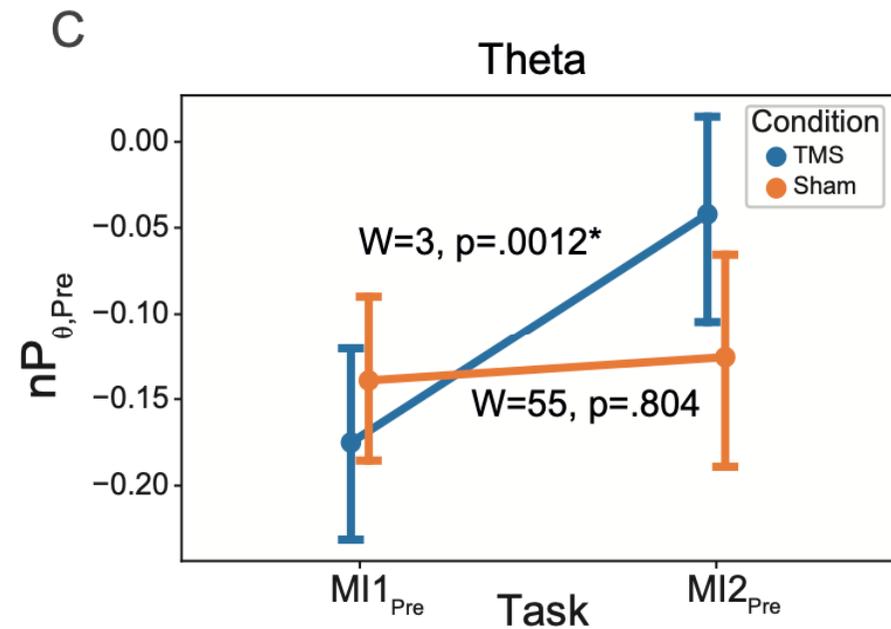
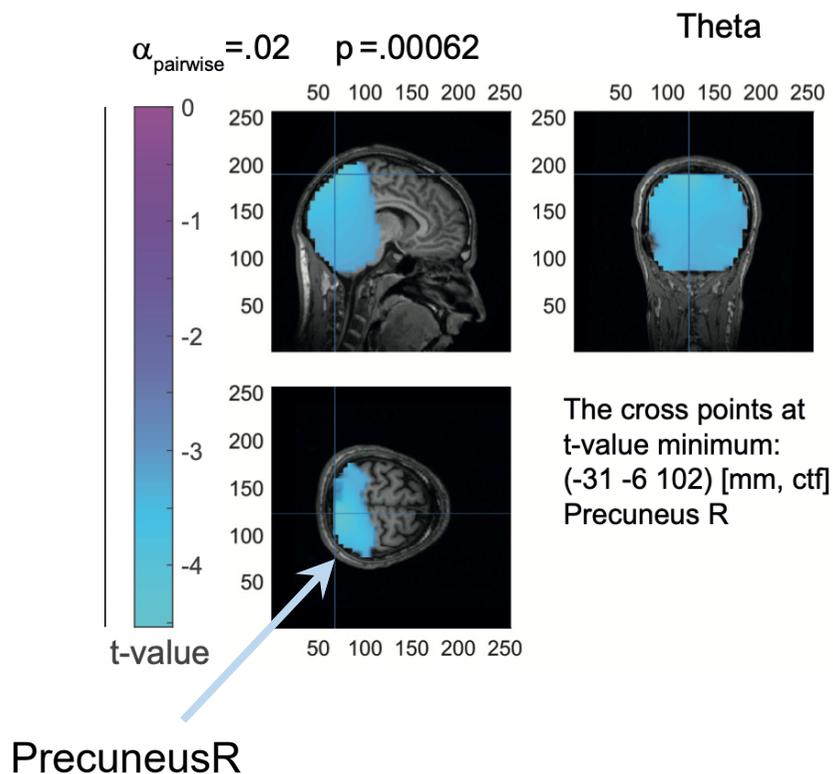


BGR - background
ME - movement execution
QM - quasi movement
MI - motor imagery



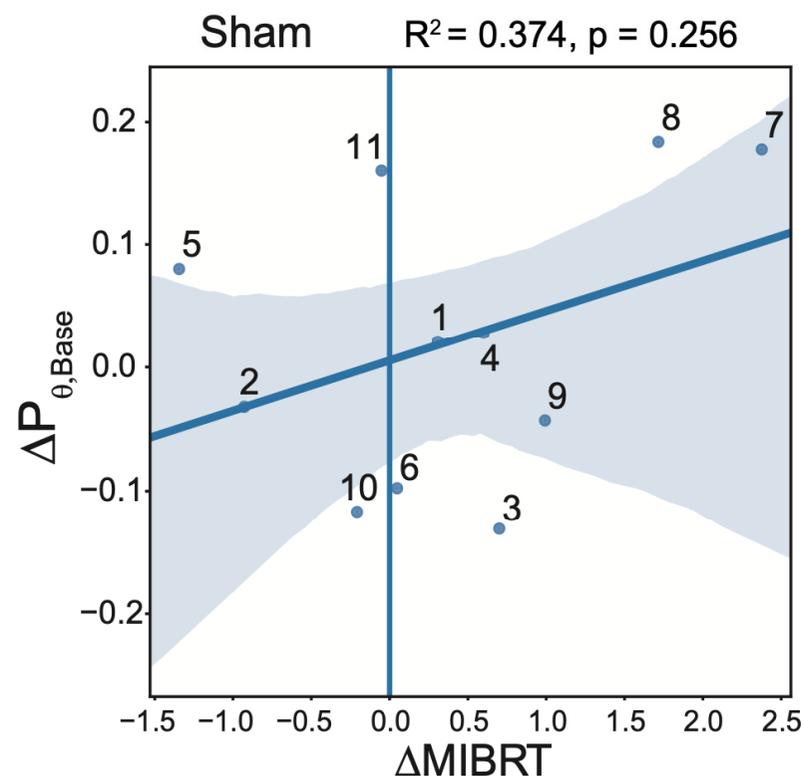
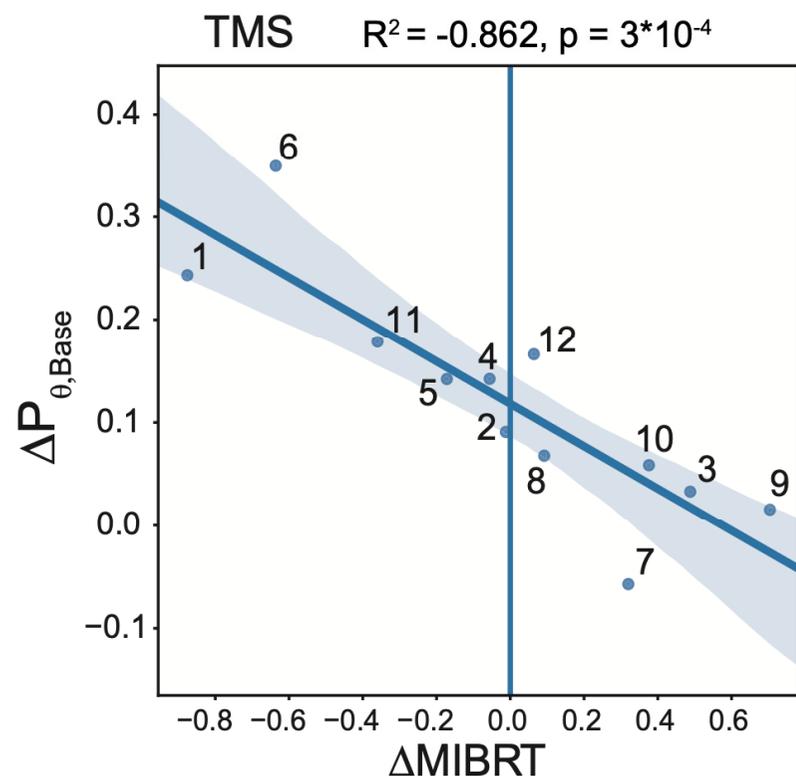
6 min duration, 5 Hz frequency, 1800 pulses, and an intensity set at 90% of the individual resting motor threshold

Возможность использования ТМС для облегчения сенсомоторной интеграции во время выполнения задания моторного воображения



$$nP = (P - P_{Rest}) / P_{Rest}$$

Возможность использования ТМС для облегчения сенсомоторной интеграции во время выполнения задания моторного воображения



Вместо заключения

- Подходы нелинейной динамики дают мощный математический инструмент для анализа быстрых процессов в головном мозге, которые можно исследовать по макроскопическим сигналам
- Оценка сложности сигналов активности мозга позволяет оценить переключения между различными «режимами работы», что может отражать реконфигурацию функциональных сетей мозга
- Транскраниальная магнитная стимуляция может рассматриваться как эффективный инструмент влияния на динамику функциональных сетей мозга

Авторский коллектив



Сусанна
Гордлеева



Владимир
Максименко



Семен
Куркин



Вадим
Грубов



Виктор
Казанцев



Елена
Пицик



БФУ имени
И. Канта

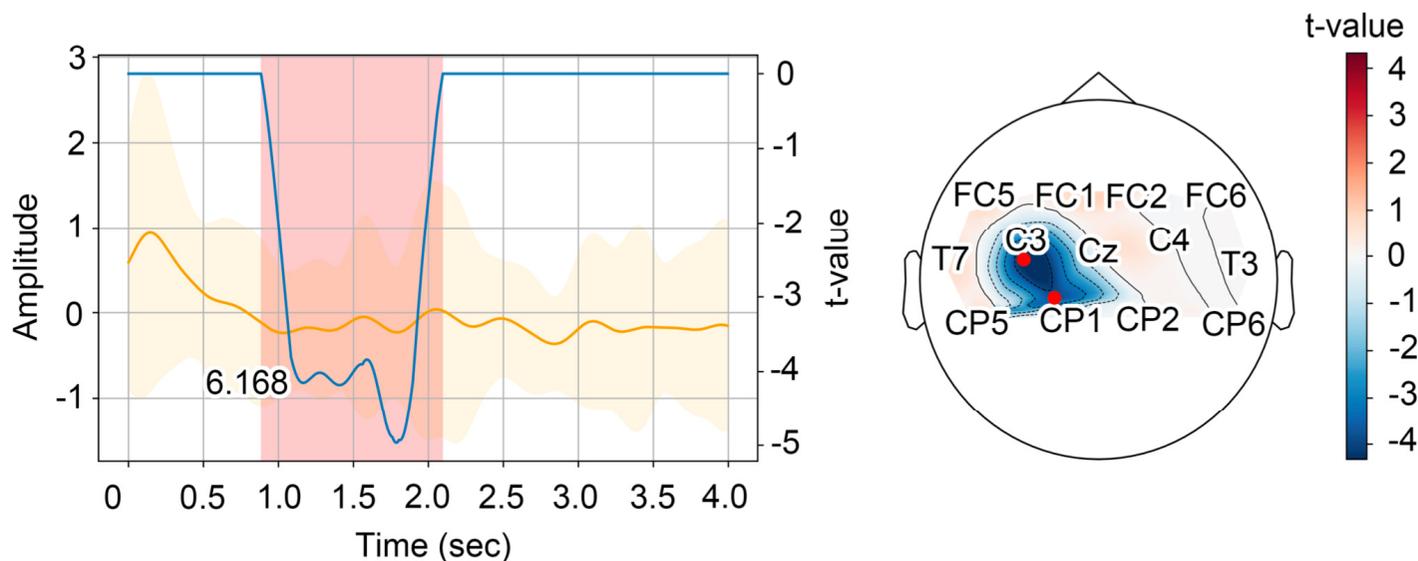


САМАРСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
МЕДИЦИНСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ



**УНИВЕРСИТЕТ
ЛОБАЧЕВСКОГО**

Возможность использования ТМС для облегчения сенсомоторной интеграции во время выполнения задания моторного воображения



Condition	Task 1 / group mean MIBRT \pm SE, s	Task 2 / group mean MIBRT \pm SE, s
Sham	MI1 / 1.56 \pm 0.28	MI2 / 1.69 \pm 0.26
TMS	MI1 / 1.36 \pm 0.18	MI2 / 1.18 \pm 0.14

Перестановочный кластерный тест

Позволяет эффективно преодолеть проблему множественных сравнений: вместо оценки разницы между экспериментальными условиями для каждого из семплов по отдельности, она оценивается с помощью единой тестовой статистики для полной пространственно-спектрально-(временной) сетки.

- (1) Объединяем триалы двух сравниваемых экспериментальных условий в единый набор.
- (2) Случайно выбираем триалы в подмножество 1 и 2 (случайны перестановки).
- (3) Рассчитываем тестовую статистику для этой случайной перестановки.
- (4) Повторяем шаги 2 и 3 большое количество раз и строим гистограмму тестовой статистики.
- (5) Из фактически наблюдаемой тестовой статистики и гистограммы на шаге 4 вычисляем долю случайных перестановок, которые привели к большей тестовой статистике, чем наблюдаемая. Эта доля называется р-значением.
- (6) Если значение р меньше критического альфа-уровня (обычно 0.05), то делаем вывод, что данные в двух экспериментальных условиях значимо различаются.

