Двухклассовая классификация тактильного воображения по данным многоканальной ЭЭГ

А. А. Мирошников*, Л. В. Яковлев[x], М. В. Морозова[§], А. Я. Каплан[¶]

В трёх экспериментах проанализированы 3826 эпох тактильного воображения (ТВ) и покоя из 72 записей ЭЭГ, полученных от 60 уникальных испытуемых. Для индивидуальной классификации использовались регуляризованные ковариации и логистическая регрессия. Средняя сбалансированная точность при пятикратной проверке по эпохам составила 76,03–78,42% по наборам; медиана — 80,00%.

Ключевые слова: электроэнцефалография, тактильное воображение, классификация, интерфейс мозг–компьютер.

---

* *Мирошников Андрей Алексеевич* — инженер-лаборант каф. физиологии человека и животных биологического ф-та МГУ имени М. В. Ломоносова, e-mail: andrej.miroshnikow@gmail.com.

Miroshnikov Andrei Alekseevich — Laboratory Engineer, Department of Human and Animal Physiology, Faculty of Biology, Lomonosov Moscow State University.

x *Яковлев Лев Владимирович* — канд. биол. наук, старший научный сотрудник каф. физиологии человека и животных биологического ф-та МГУ имени М. В. Ломоносова; старший преподаватель биологического факультета Университета МГУ–ППИ в Шэньчжэне, КНР, e-mail: leojackovlev@gmail.com.

Yakovlev Lev Vladimirovich — Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher, Department of Human and Animal Physiology, Faculty of Biology, Lomonosov Moscow State University; Senior Lecturer, Faculty of Biology, Shenzhen MSU-BIT University, China.

§ *Морозова Марина Витальевна* — младший научный сотрудник Центра нейрокогнитивных исследований (МЭГ-центр) Московского государственного психолого-педагогического университета (ФГБОУ ВО МГППУ), e-mail: m.morozova.v@yandex.ru.

Morozova Marina Vitalevna — Junior Researcher, Center for Neurocognitive Research (MEG Center), Moscow State University of Psychology and Education (MSUPE).

¶ *Каплан Александр Яковлевич* — д-р биол. наук, профессор каф. физиологии человека и животных биологического ф-та МГУ имени М. В. Ломоносова, e-mail: akaplan@mail.ru.

Kaplan Alexander Yakovlevich — Doctor of Biological Sciences, Professor, Department of Human and Animal Physiology, Faculty of Biology, Lomonosov Moscow State University.

Опубликовано на условиях лицензии CC-BY 4.0
Published under CC-BY 4.0

1. Постановка задачи

Тактильное воображение (ТВ) рассматривается как возможная команда для интерфейса мозг–компьютер [1]. Оценивалась точность различения ТВ и покоя по ЭЭГ в трёх наборах данных.

2. Материал и методы

Исследованы 72 записи ЭЭГ из трёх экспериментов (22, 20 и 30 записей); число уникальных испытуемых составило $N_{\text{исп}} = 60$. Пиктограмма руки служила сигналом к началу мысленного воспроизведения прикосновения к пальцам правой руки; в эпохах покоя предъявлялись многоугольники для мысленного счёта [1]. Проанализированы 2073 эпохи ТВ и 1753 эпохи покоя: по наборам 670/650, 203/203 и 1200/900. ЭЭГ регистрировалась по 127 электродам системы 10–05 при 1000 Гц с общим средним референтом (CAR); эпохи не исключались. Сигнал фильтровался в полосе 6–40 Гц; окно анализа составляло 0,5–3,5 с от начала эпохи.

Для каждой записи обучалась отдельная модель. Ковариация каждой эпохи оценивалась методом Ледуа–Вольфа [2]:

$$C_i = (1 - \lambda_i) S_i + \lambda_i \frac{\operatorname{tr}(S_i)}{127} I. \tag{1}$$

Опорная матрица G — аффинно-инвариантное риманово среднее ковариаций обучающих эпох обоих классов [3]. Признаки получали по формуле

$$\mathbf{x}_i = \operatorname{vec}_{\text{sym}}\left[\log\left(G^{-1/2} C_i G^{-1/2}\right)\right]. \tag{2}$$

Здесь S_i — выборочная ковариация, λ_i — коэффициент регуляризации, $\operatorname{vec}_{\text{sym}}$ — векторизация симметричной матрицы с множителем $\sqrt{2}$ для внедиагональных элементов. Применялась логистическая регрессия с L2-регуляризацией ($C = 1$) и балансировкой классов. При стратифицированной пятикратной проверке по эпохам G и параметры модели вычислялись только на обучающей части. Сбалансированная точность $BA = \frac{1}{2}(TPR + TNR)$, где TPR и TNR — доли верно распознанных эпох ТВ и покоя. Для каждой записи усреднялись 5 значений BA; по полученным индивидуальным оценкам вычислялись среднее и медиана для каждого набора.

3. Результаты

Во всех 72 записях сбалансированная точность превышала 50%; средняя точность по наборам — 76,03–78,42%, медиана по всем записям — 80,00% (табл. 1).

Таблица 1: Сбалансированная точность различения ТВ и покоя, %

Набор	Записей	Среднее	Медиана	Точность > 75%, n (%)
1	22	76,03	78,45	12 (54,5)
2	20	78,42	80,00	11 (55,0)
3	30	77,82	82,29	22 (73,3)
Всего	72	77,44	80,00	45 (62,5)

4. Обсуждение и заключение

Во всех трёх наборах показана возможность индивидуального различения ТВ и покоя по ЭЭГ, что позволяет рассматривать ТВ как команду интерфейса мозг–компьютер. Влияние различий зрительных сигналов и зависимости соседних эпох на оценку точности предстоит уточнить. Также необходима проверка переноса классификатора на независимые записи и его работы в реальном времени.

Список литературы

[1] L. Yakovlev, N. Syrov, A. Miroshnikov, M. Lebedev, A. Kaplan, “Event-Related Desynchronization Induced by Tactile Imagery: an EEG Study”, *eNeuro*, **10**:6 (2023), ENEURO.0455-22.2023. DOI: 10.1523/ENEURO.0455-22.2023.

[2] O. Ledoit, M. Wolf, “A well-conditioned estimator for large-dimensional covariance matrices”, *Journal of Multivariate Analysis*, **88**:2 (2004), 365–411. DOI: 10.1016/S0047-259X(03)00096-4.

[3] A. Barachant, S. Bonnet, M. Congedo, C. Jutten, “Multiclass Brain–Computer Interface Classification by Riemannian Geometry”, *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, **59**:4 (2012), 920–928. DOI: 10.1109/TBME.2011.2172210 .

Статья поступила 10 ноября 2026 г.

Binary Classification of Tactile Imagery Using Multichannel EEG

A. A. Miroshnikov, L. V. Yakovlev, M. V. Morozova, A. Y. Kaplan

Across three experiments, 72 EEG recordings from 60 unique participants and all 3,826 tactile imagery (TI) and rest epochs were analyzed. Individual logistic regression models used regularized covariance features. In fivefold epoch-wise cross-validation, mean balanced accuracy ranged from 76.03% to 78.42% across datasets; the median of 72 estimates was 80.00%.

Keywords: electroencephalography, tactile imagery, classification, brain–computer interface.

References

[1] L. Yakovlev, N. Syrov, A. Miroshnikov, M. Lebedev, A. Kaplan, "Event-Related Desynchronization Induced by Tactile Imagery: an EEG Study", *eNeuro*, **10**:6 (2023), ENEURO.0455-22.2023. DOI: 10.1523/ENEURO.0455-22.2023.

[2] O. Ledoit, M. Wolf, "A well-conditioned estimator for large-dimensional covariance matrices", *Journal of Multivariate Analysis*, **88**:2 (2004), 365–411. DOI: 10.1016/S0047-259X(03)00096-4.

[3] A. Barachant, S. Bonnet, M. Congedo, C. Jutten, "Multiclass Brain–Computer Interface Classification by Riemannian Geometry", *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, **59**:4 (2012), 920–928. DOI: 10.1109/TBME.2011.2172210.

Received on November 10, 2026