Внутрикортикальная возбудимость как управляющий сигнал нейроинтерфейса

А. Н. Васильев*, Ю. Г. Шевцова‡, А. Я. Каплан§

Разработан интерфейс мозг–компьютер (ИМК), использующий новый для ИМК тип маркеров — показатели внутрикортикальной возбудимости моторной коры. Эти показатели определяют по транскраниальным вызванным потенциалам (ТВП), регистрируемым при подпороговой транскраниальной магнитной стимуляции. У 18 испытуемых точность распознавания мысленного представления движения по ТВП в режиме реального времени составила $77{,}4 \pm 12{,}5\,\%$ и не коррелировала с точностью ИМК на основе мю-ритма. Информативным признаком служило ослабление компонента N100 при мысленном представлении движения. Гибридный ИМК (ТВП и мю-ритм) обеспечил точность $83{,}6 \pm 8{,}6\,\%$.

Ключевые слова: нейроинтерфейс, транскраниальные вызванные потенциалы, внутрикортикальная возбудимость, представление движения, мю-ритм.

Введение. В интерфейсах мозг–компьютер (ИМК), основанных на мысленном представлении движения, признаком служит десинхронизация сенсомоторного мю-ритма; такие ИМК применяются в нейрореабилитации для идеомоторного тренинга [1]. Однако мю-ритм является неспецифическим показателем соматосенсорного внимания [2] и не характеризует возбудимость моторной коры, поэтому при тренинге подкрепляется десинхронизация мю-ритма, а не изменение корковой возбудимости. Внутрикортикальную возбудимость и распространение возбуждения между корковыми структурами отражают ответы ЭЭГ на импульсы транскраниальной магнитной стимуляции (ТМС) — транскраниальные вызванные

* *Васильев Анатолий Николаевич* — канд. биол. наук, ст. науч. сотр., МГУ имени М. В. Ломоносова, Москва, Россия, e-mail: a.n.vasilev.home@gmail.com, ORCID: 0000-0002-1573-0730.

Vasilyev Anatoly Nikolaevich — Cand. Sci. (Biol.), Senior Researcher, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia.

‡ *Шевцова Юлия Геннадьевна* — аспирант, МГУ имени М. В. Ломоносова, Москва, Россия, e-mail: shevtsova.jg@gmail.com, ORCID: 0009-0003-8508-0280.

Shevtsova Yulia Gennadievna — PhD Student, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia.

§ *Каплан Александр Яковлевич* — д-р биол. наук, профессор, зав. лабораторией, МГУ имени М. В. Ломоносова, Москва, Россия, e-mail: akaplan@mail.ru, ORCID: 0000-0002-3912-4639.

Kaplan Alexander Yakovlevich — Dr. Sci. (Biol.), Professor, Head of Laboratory, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia.

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

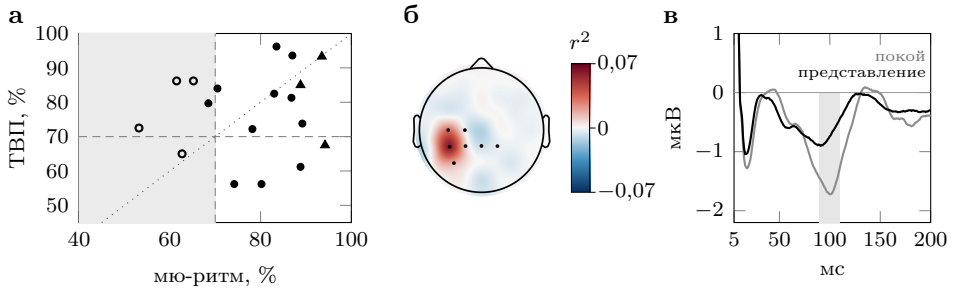


Рис. 1: (а) Точность ИМК на основе ТВП и мю-ритма. Закрашенными маркерами обозначены испытуемые с точностью распознавания по мю-ритму выше случайного уровня; треугольниками — испытуемые с ВМО. (б) Различие признаков в интервале 90–110 мс между представлением движения и покоем (r^2 со знаком), среднее по испытуемым; точки — электроды классификатора. (в) ТВП в отведении CP3 при представлении движения и в покое, усреднённые по испытуемым; выделен компонент N100.

потенциалы (ТВП; в данном случае — ТМС-вызванные потенциалы) [3], которые изменяются при подготовке движения [4]. Цель работы — оценить возможность использования ТВП при подпороговой ТМС моторной коры в качестве признаков ИМК.

Методы. В исследовании участвовали 18 здоровых добровольцев (9 мужчин и 9 женщин, 18–34 года). Каждая серия включала 40 шестисекундных проб, во время которых испытуемые по инструкции мысленно представляли движение правой кисти либо находились в покое. В трёх сериях проводили непрерывную навигационную ТМС левой моторной коры с межимпульсным интервалом 1,3–1,5 с и интенсивностью ниже моторного порога (медиана 45 % максимального выхода стимулятора) и регистрировали 64-канальную ЭЭГ и ЭМГ мышц правой кисти. Признаками служили амплитуды ТВП в интервале 20–150 мс на электродах над левой сенсомоторной корой. Классификатор на основе линейного дискриминантного анализа обучали на данных первой серии. В последующих сериях его переобучали после каждых 10 новых ответов, причём каждый ответ сначала классифицировали и лишь затем включали в обучающую выборку. Для сравнения точность ИМК на основе мю-ритма оценивали в отдельной серии без ТМС. В гибридном ИМК объединяли решения двух классификаторов: один использовал ТВП, другой — мю-ритм, зарегистрированный в межимпульсных интервалах тех же проб.

Результаты. Точность ИМК на основе ТВП в режиме реального времени (доля правильно распознанных проб) составила $77{,}4 \pm 12{,}5\,\%$ и превышала случайный уровень ($50\,\%$) у 16 из 18 испытуемых ($p < 0{,}05$). Информативные признаки соответствовали компоненту N100 над левой сенсомоторной корой (рис. 1б, в): при мысленном представлении движения выраженность этого компонента уменьшалась (критерий Уилкоксона, $p = 0{,}001$), что согласуется с ослаблением N100 при подготовке движения, связанным с повышением возбудимости моторной коры [4]. При контрольной стимуляции других областей (вертекса и задней теменной коры) различий между представлением движения и покоем не наблюдалось. Исключение трёх испытуемых с вызванными моторными ответами (ВМО; треугольники на рис. 1а) не изменило результата ($76{,}5 \pm 12{,}6\,\%$).

Точность ИМК на основе мю-ритма ($78{,}3 \pm 12{,}2\,\%$) не коррелировала с точностью ИМК на основе ТВП ($\rho = 0{,}09$; рис. 1а). Высокая точность распознавания по ТВП достигалась в том числе у испытуемых, для которых ИМК на основе мю-ритма был неэффективен (точность ниже $70\,\%$ [5]). Объединение решений двух классификаторов в тех же пробах (гибридный ИМК) обеспечило точность $83{,}6 \pm 8{,}6\,\%$.

Заключение. Таким образом, ТВП при подпороговой ТМС позволяют распознавать мысленное представление движения независимо от мышечных ответов и использовать показатели внутрикортикальной возбудимости моторной коры в качестве управляющего сигнала ИМК. В перспективе такой подход позволит сделать корковую возбудимость непосредственной мишенью нейрообратной связи при идеомоторном тренинге.

Исследование выполнено в рамках государственного задания МГУ имени М. В. Ломоносова № 121032300070-1.

Список литературы

[1] R. Mane, T. Chouhan, C. Guan, “BCI for stroke rehabilitation: motor and beyond”, *Journal of Neural Engineering*, **17**:4 (2020), 041001. DOI: 10.1088/1741-2552/aba162.

[2] K. L. Anderson, M. Ding, “Attentional modulation of the somatosensory mu rhythm”, *Neuroscience*, **180** (2011), 165–180. DOI: 10.1016/j.neuroscience.2011.02.004.

[3] N. C. Rogasch, P. B. Fitzgerald, “Assessing cortical network properties using TMS–EEG”, *Human Brain Mapping*, **34**:7 (2013), 1652–1669. DOI: 10.1002/hbm.22016.

[4] V. V. Nikulin, D. Kičić, S. Kähkönen, R. J. Ilmoniemi, “Modulation of electroencephalographic responses to transcranial magnetic stimulation: evidence for changes in cortical excitability related to movement”, *European Journal of Neuroscience*, **18**:5 (2003), 1206–1212. DOI: 10.1046/j.1460-9568.2003.02858.x.

[5] C. Vidaurre, B. Blankertz, “Towards a cure for BCI illiteracy”, *Brain Topography*, **23**:2 (2010), 194–198. DOI: 10.1007/s10548-009-0121-6.

Статья поступила 24 октября 2026 г.

Intracortical excitability as a brain–computer interface control signal

A. N. Vasilyev, Y. G. Shevtsova, A. Y. Kaplan

We developed a brain–computer interface (BCI) that uses a class of markers new to BCIs: indices of intracortical excitability. These indices are derived from transcranial evoked potentials (TEPs) elicited by subthreshold transcranial magnetic stimulation of the motor cortex. In 18 participants, online accuracy for distinguishing motor imagery from rest using TEPs reached $77.4 \pm 12.5\,\%$ and did not correlate with mu-rhythm BCI accuracy. The discriminative feature was attenuation of the N100 component during motor imagery. Combining TEP and mu-rhythm classifiers in a hybrid BCI yielded an accuracy of $83.6 \pm 8.6\,\%$.

Keywords: brain–computer interface, transcranial evoked potentials, intracortical excitability, motor imagery, mu rhythm.

References

[1] R. Mane, T. Chouhan, C. Guan, “BCI for stroke rehabilitation: motor and beyond”, *Journal of Neural Engineering*, **17**:4 (2020), 041001. DOI: 10.1088/1741-2552/aba162.

[2] K. L. Anderson, M. Ding, “Attentional modulation of the somatosensory mu rhythm”, *Neuroscience*, **180** (2011), 165–180. DOI: 10.1016/j.neuroscience.2011.02.004.

[3] N. C. Rogasch, P. B. Fitzgerald, “Assessing cortical network properties using TMS–EEG”, *Human Brain Mapping*, **34**:7 (2013), 1652–1669. DOI: 10.1002/hbm.22016.

[4] V. V. Nikulin, D. Kičić, S. Kähkönen, R. J. Ilmoniemi, “Modulation of electroencephalographic responses to transcranial magnetic stimulation: evidence for changes in cortical excitability related to movement”, *European Journal of Neuroscience*, **18**:5 (2003), 1206–1212. DOI: 10.1046/j.1460-9568.2003.02858.x.

[5] C. Vidaurre, B. Blankertz, “Towards a cure for BCI illiteracy”, *Brain Topography*, **23**:2 (2010), 194–198. DOI: 10.1007/s10548-009-0121-6.

Received on October 24, 2026