



РАСЧЁТНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ РАЗМЫТИЯ ПОТЕНЦИАЛА ПРИ ТРАНСКРАНИАЛЬНОЙ МИКРОПОЛЯРИЗАЦИИ ДВУМЯ БЛИЗКО РАСПОЛОЖЕННЫМИ ЭЛЕКТРОДАМИ СТАНДАРТНОЙ ФОРМЫ

Н.Н. Каркищенко¹, Д.Б. Чайванов^{2,*}, Ю.Ю. Клосс²

¹ ФГБУН «Научный центр биомедицинских технологий ФМБА России»
143442, Российская Федерация, Московская обл., Красногорский р-н, п. Светлые горы, 1

² ФГБУ «Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»
123182, Российская Федерация, Москва, пл. Академика Курчатова, 1

В статье описан численный эксперимент, в котором исследовалось протекание постоянного электрического тока между двумя электродами малой площади, установленными на внешней поверхности скальпа человека. В эксперименте было показано размытие потенциала между двумя близко расположенными электродами.

Ключевые слова: микрополяризация, транскраниальная микрополяризация, нейростимуляция

Конфликт интересов: авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Каркищенко Н.Н., Чайванов Д.Б., Клосс Ю.Ю. Расчётно-теоретический анализ размытия потенциала при транскраниальной микрополяризации двумя близко расположенными электродами стандартной формы *Биомедицина*. 2026;22(1):60–64. <https://doi.org/10.33647/2074-5982-22-1-60-64>

Поступила 15.12.2025

Принята после доработки 12.01.2026

Опубликована 30.04.2026

COMPUTATIONAL AND THEORETICAL ANALYSIS OF POTENTIAL BLURRING IN TRANSCRANIAL DIRECT CURRENT STIMULATION WITH TWO CLOSELY SPACED STANDARD-SHAPED ELECTRODES

Nikolay N. Karkischenko¹, Dmitry B. Chaivanov^{2,*}, Yury Yu. Kloss²

¹ Scientific Center of Biomedical Technologies of the Federal Medical and Biological Agency of Russia
143442, Russian Federation, Moscow Region, Krasnogorsk District, Svetlye Gory Village, 1

² National Research Centre “Kurchatov Institute”
123182, Russian Federation, Moscow, Akademika Kurchatova Square, 1

This article presents a numerical study investigating the direct current flow between two small-scale electrodes placed on the human scalp. The findings reveal spatial blurring of the electric potential between two closely spaced electrodes.

Keywords: direct current stimulation, transcranial direct current stimulation, neurostimulation

Conflict of interest: the authors declare no conflict of interest.

For citation: Karkischenko N.N., Chaivanov D.B., Kloss Yu.Yu. Computational and Theoretical Analysis of Potential Blurring in Transcranial Direct Current Stimulation with Two Closely Spaced Standard-Shaped Electrodes. *Journal Biomed.* 2026;22(1):60–64. <https://doi.org/10.33647/2074-5982-22-1-60-64>

Submitted 15.12.2025

Revised 12.01.2026

Published 30.04.2026

Введение

Транскраниальная микрополяризация (ТМКП) является одним из методов нейростимуляции, который заключается в подаче слабого постоянного электрического тока через электроды малой площади, установленные на поверхности скальпа. ТМКП вызывает изменения физиологических (электроэнцефалография, вызванный потенциал) и биофизических (плотность синапсов, их локализация) показателей корковых и подкорковых отделов мозга [3–5, 8]. Микрополяризационное воздействие на височные области коры улучшает слуховую память, память на время и память на слова; на префронтальную кору — улучшает двигательную память; на теменно-затылочную кору — приводит к улучшению зрительной памяти [3]. ТМКП применяются для лечения широкого круга заболеваний в т.ч. шизофрении с синдромом вербального псевдогаллюциноза, депрессии и т.д. [3–5, 7].

В целях избирательной стимуляции мозговых структур электроды должны иметь небольшие размеры. В то же время для получения эффекта необходимо подавать на электроды токи достаточной амплитуды. Уменьшение площади электрода при заданной величине подаваемого на него тока приведёт к увеличению плотности тока, втекающего в скальп. Слишком высокая плотность втекающего в скальп тока вызывает болевые эффекты и повреждения скальпа. Таким образом, уменьшать площадь электродов можно только до достижения максимально допустимой плотности тока [6].

В целях прогноза терапевтического эффекта ТМКП представляется важным

определить область нейростимуляции. Эта область не будет иметь чётких границ и не будет заканчиваться сразу за областью, находящейся под электродом. Напротив, будет наблюдаться размытие области стимуляции, вызванное постепенным снижением потенциала по мере удаления от внешней границы подэлектродной области. Ранее нами был проведён численный эксперимент, в котором мы оценили степень размытия потенциала для случая одного электрода, установленного на поверхности скальпа [2].

Цель работы — оценить степень размытия области стимуляции для случая применения двух близко расположенных электродов стандартной формы.

Материалы и методы

Математическая модель

Система уравнений, описывающая течение тока и распределение потенциала, имеет вид:

$$\begin{cases} j = \lambda \cdot \text{grad}(\varphi), \\ \text{div}(j) = 0, \end{cases} \quad (1)$$

где: j — плотность тока, λ — проводимость тканей головы, φ — потенциал.

Первое векторное уравнение отражает закон Ома для непрерывной среды в приближении пренебрежимо малого реактивного сопротивления. Второе уравнение отражает закон сохранения заряда в среде с пренебрежимо малой удельной емкостью.

Проводимости и геометрические размеры структур головы приведены в таблице согласно общеизвестным данным [1]. Мы приближённо считали, что мозг имеет форму шара, а прочие структуры имеют форму сферических слоёв.

Таблица. Проводимости и размеры структур головы
Table. Conductivities and dimensions of head structures

Название структуры	Проводимость (Ом·см) ⁻¹	Размеры структуры, мм
Скальп	0,330	5,0 (толщина стоя)
Верхняя костная пластина	0,004	1,5 (толщина стоя)
Ячеистый слой кости	0,050	4,0 (толщина стоя)
Нижняя костная пластина	0,004	1,5 (толщина стоя)
Твердая мозговая оболочка	0,010	2,0 (толщина стоя)
Мозг	0,270	76,0 (диаметр)

Граничные условия задают постоянный потенциал в области наложения электродов на скальп и нулевую составляющую нормали плотности тока к внешней поверхности скальпа в местах отсутствия электродов.

В численном эксперименте мы положили потенциалы на электродах равными одному и минус одному вольту. При других значениях потенциалов произойдёт растяжение или сжатие результата по оси потенциала, но нормированная на разность потенциалов степень размытия стимуляционного пятна никак не изменится. В нашем численном эксперименте мы будем использовать следующие граничные условия:

$$\begin{cases} \varphi=1 \text{ (поверхность скальпа под первым электродом)} \\ \varphi=-1 \text{ (поверхность скальпа под вторым электродом)} \\ j_{\perp}(\varphi)=0 \text{ (поверхность скальпа, свободная} \\ \text{от электродов)} \end{cases} \quad (2)$$

Метод решения системы уравнений

Система уравнений, описывающая растекание тока и распределение потенциала, может быть существенно упрощена: для этого возьмём дивергенцию от всех членов первого уравнения системы (1) и в результате получим:

$$\begin{cases} \operatorname{div}(j)=\operatorname{div}(\lambda \cdot \operatorname{grad}(\varphi)), \\ \operatorname{div}(j)=0. \end{cases} \quad (3)$$

Подставим значение дивергенции плотности тока (равное нулю) из второго уравнения в первое. В результате получим уравнение для потенциала:

$$\operatorname{div}(\lambda \cdot \operatorname{grad}(\varphi))=0. \quad (4)$$

Таким образом, для расчётно-теоретического анализа размытия потенциала до-

статочно численно решить одно скалярное уравнение.

Граничными условиями в месте наложения электродов на скальп будут постоянные заданные потенциалы. Граничным условием на внешней поверхности скальпа, свободной от установки электродов, будет равенство нормальной к поверхности скальпа составляющей градиента потенциала нулю (5). Такое значение нормальной составляющей градиента равносильно аналогичному значению нормальной составляющей тока, что следует из первого уравнения системы (1).

$$\begin{cases} \varphi=1 \text{ (поверхность скальпа под первым электродом)} \\ \varphi=-1 \text{ (поверхность скальпа под вторым электродом)} \\ \operatorname{grad}_{\perp}(\varphi)=0 \text{ (поверхность скальпа, свободная} \\ \text{от электродов)} \end{cases} \quad (5)$$

Решение уравнения было осуществлено нами с помощью солвера из пакета FiPy 4.0.1, являющегося библиотекой языка Python. Для построения сетки использовался модуль Gmsh. Для графического представления результатов была применена библиотека matplotlib языка Python. Для удобства графического представления результатов расчёта поверхность головы была приведена к плоскости (по аналогии с географической картой, отражающей рельеф на сферической поверхности Земли).

Результаты исследования

Распределение потенциала для электродов эллиптической и прямоугольной формы, полученное в результате численного решения уравнений, представлено на рисунке.

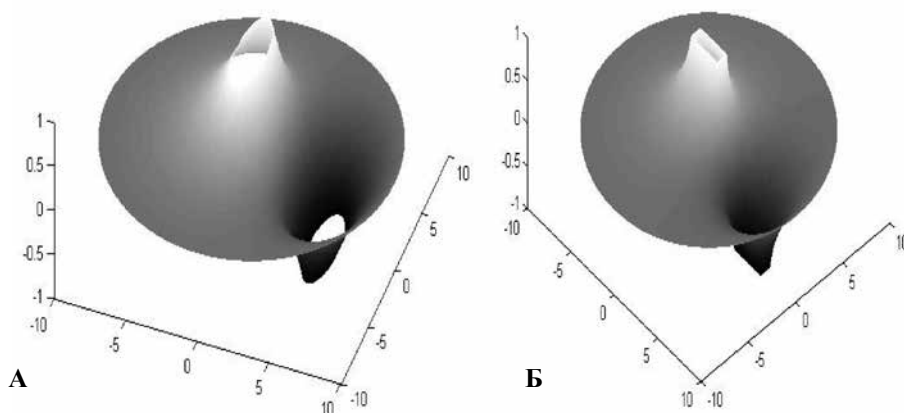


Рис. Распределение потенциала при стимуляции электродами стандартной формы: А — электроды эллиптической формы; Б — электроды прямоугольной формы.

Fig. Potential distribution during stimulation with standard-shaped electrodes: А — elliptical electrodes; Б — rectangular electrodes.

Выводы

1. При микрополяризации двумя близко расположенными электродами стандартной формы потенциал не спадает сразу за границей электрода микрополяризации. Напротив, в непосредственной близости от электрода создаётся зона размытия, в которой потенциал постепенно уменьшается.

2. При микрополяризации двумя близко расположенными электродами стандарт-

ной формы размеры области размытия мало зависят от формы электродов и соизмеримы с геометрическими размерами электродов.

3. При микрополяризации двумя близко расположенными электродами стандартной формы стимуляции подвержены не только области мозга, находящиеся непосредственно под электродами, но и области, находящиеся вблизи от проекции на мозг границ электрода.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ | REFERENCES

1. Гнездицкий В.В. *Обратная задача ЭЭГ и клиническая электроэнцефалография*. М.: Медпресс-информ, 2004:624. [Gnezdiczkij V.V. *Obratnaya zadacha EEG i klinicheskaya elektroencefalografiya* [Reverse EEG Problem and Clinical Electroencephalography]. Moscow: Medpress-inform Publ, 2004:624. (In Russian)].
2. Каркищенко Н.Н., Чайванов Д.Б., Вартанов А.А. Расчет потенциалов и токов стимуляции для двухмерной модели скальпа с учетом коэффициентов затекания в мозг. *Биомедицина*. 2013;1(2):6–11. [Karkischenko N.N., Chajvanov D.B., Vartanov A.A. Raschet potencialov i tokov stimulyacii dlya dvuhmernoj modeli skal'pa s uchetom koefficientov zatekaniya v mozg [Calculation of stimulation potentials and currents for a two-dimensional scalp model, taking into account the coefficients of leakage into the brain]. *Biomedicina* [Journal Biomed]. 2013;1(2):6–11. (In Russian)].
3. Пинчук Д.Ю. *Транскраниальные микрополяризации головного мозга*. СПб: Человек, 2007:496. [Pinchuk D.Yu. *Transkranial'nye mikropolyarizacii golovnogo mozga* [Transcranial micropolarization of the brain]. St. Petersburg: Chelovek Publ., 2007:496. (In Russian)].
4. Пономаренко Г.Н. *Физические методы лечения. Справ. по физиотерапии для врачей*. 2-е изд., перераб. и доп. СПб.: Воен.-мед. акад., 2002:299. [Ponomarenko G.N. *Fizicheskie metody lecheniya. Sprav. po fizioterapii dlya vrachej* [Physical methods of treatment. Handbook of Physiotherapy for Doctors]. 2nd ed., revised and enlarged. St. Petersburg: Military Medical Acad. Publ., 2002:299. (In Russian)].
5. Раева С.Н. *Микроэлектродные исследования активности головного мозга человека*. М.: Наука, 1977:205. [Raeva S.N. *Mikroelektroodnye issledovaniya aktivnosti golovnogo mozga cheloveka* [Microelectrode studies of human brain activity]. Moscow: Nauka Publ., 1977:205. (In Russian)].

6. Чайванов Д.Б., Каркищенко Н.Н. Математическая модель биофизических процессов при транскраниальной микрополяризации. *Биомедицина*. 2011;1(3):6–11 [Chajvanov D.B., Karkischenko N.N. Matematicheskaya model' biofizicheskikh processov pri transkraniyal'noj mikropolyarizacii [Mathematical model of biophysical processes during transcranial micropolarization]. *Biomedicina [Journal Biomed]*. 2011;1(3):6–11. (In Russian)].
7. Шелякин А.М., Пономаренко Г.Н. *Микрополяризация мозга*. СПб: ИИЦ Балтика, 2006:222. [Shelyakin A.M., Ponomarenko G.N. *Mikropolyarizaciya mozga [Micropolarization of the brain]*. St. Petersburg: IICz Baltika Publ., 2006:222. (In Russian)].
8. Kadosh R.C., Soskic S., Iuculano T., Kanai R., Walsh V. Modulating neuronal activity produces specific and long-lasting changes in numerical competence. *Current Biology*. 2010;20(22):2016–2020. DOI: 10.1016/j.cub.2010.10.007.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ | INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Каркищенко Николай Николаевич, д.м.н., проф., акад. РАН, чл.-корр. РАН, ФГБУН «Научный центр биомедицинских технологий ФМБА России»;
e-mail: niknik2808@yandex.ru

Nikolay N. Karkischenko, Dr. Sci. (Med.), Prof., Acad. of the Russian Academy of Rocket and Artillery Sciences, Corr. Member of the Russian Academy of Sciences, Scientific Center of Biomedical Technologies of the Federal Medical and Biological Agency of Russia;
e-mail: niknik2808@yandex.ru

Чайванов Дмитрий Борисович*, к.ф.-м.н., ФГБУ «Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»;
e-mail: Chayvanov_DB@nrcki.ru

Dmitry B. Chaivanov*, Cand. Sci. (Phys.-Math.), National Research Centre “Kurchatov Institute”;
e-mail: Chayvanov_DB@nrcki.ru

Клосс Юрий Юрьевич, д.ф.-м.н., ФГБУ «Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»;
e-mail: kloss.yu@gmail.com

Yury Yu. Kloss, Dr. Sci. (Phys.-Math.), National Research Centre “Kurchatov Institute”;
e-mail: kloss.yu@gmail.com

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author