

# Фрактальная сложность хаотических ритмов ЭЭГ-сигналов реальных и воображаемых движений рук

И.А. Русанова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Казанский федеральный университет, Кремлевская 16а, Казань, Россия, 420008

**Аннотация.** В настоящее время большое внимание уделяется разработке и применению в области современных нейротехнологий интерфейсов "мозг-компьютер" (ИМК), способных обеспечить человеку коммуникацию с внешними электронными и электронно-механическими устройствами на базе ЭЭГ и воображаемых движений. Проведенный фрактальный анализ сигналов ЭЭГ для случаев, когда испытуемому предлагалось произвести движения рукой, а затем мысленно воспроизвести их, выявил чувствительность данного метода к присутствию в их структуре свойств пространственно-временного самоподобия. Показано, что воображаемые движения рук оказывают такой же эффект на активность участков головного мозга, как и выполнение реальных движений. При повторном выполнении физического движения рукой наблюдается локализация области возбуждения коры головного мозга в правом полушарии. Выявлено ярко выраженное уменьшение фрактальной размерности по величине при выполнении движения рукою «назад», что может свидетельствовать о включении эффекта «торможения». Исследование фрактальных свойств на разных временных интервалах позволяет выявить формирование особых областей флуктуаций мозговой активности в зависимости от длительности выполнения тех или иных видов движений рука.

## 1. Введение

В настоящее время большое внимание уделяется разработке и применению в области современных нейротехнологий интерфейсов "мозг-компьютер" (ИМК), способных обеспечить человеку коммуникацию с внешними электронными и электронно-механическими устройствами без использования периферических нервов и мышц, например, на основе регистрации электрической активности головного мозга [1-4]. Осуществляется распознавание различных паттернов сигналов электроэнцефалограмм (ЭЭГ), преобразующиеся затем в команды управления механической части ИМК. Разработки интерфейса ИМК на основе ЭЭГ, магнитоэнцефалографии, функциональной магнитно-резонансной томографии, электрокортикографии, импульсной активности нейронов, распределения и интенсивности кровотока в мозге и т.п., ведутся исследовательскими группами по всему миру [5,6]. Однако, ни одна из моделей ИМК не получила на данный момент широкого применения в клинике, где необходимы соблюдение требований к безопасности пациента (неинвазивность), простота устройства и относительная дешевизна технологии. Одним из многообещающих в данном случае подходов является использование ИМК на базе ЭЭГ и воображаемых движений [7,8]. Используемые на сегодняшний день различные подходы к количественному анализу ЭЭГ в приложениях ИМК, не обеспечивают необходимой точности классификации, требуемой для создания систем, комфортных для использования в повседневной жизни. Актуальной

проблемой является выбор методов обработки сигналов ЭЭГ с целью классификации ЭЭГ-паттернов реальных и воображаемых движений рукою.

В многочисленных исследованиях продемонстрировано, что доминирующий в спектре ЭЭГ альфа-ритм (основной компонент фоновой электрической активности здорового бодрствующего мозга человека) обладает фрактальной размерностью [9,10]. Изменение размерности ритмов ЭЭГ показал широкий спектр и странный аттрактор в фазовом пространстве. Также, все системы здорового мозга, являющиеся источниками ЭЭГ-сигналов, а также активность отдельных нейронов и нейронных сетей в норме проявляют хаотическое поведение [11,12]. Сенсомоторные ритмы в состоянии покоя характеризуются высокой амплитудой (синхронизация ритма). Предполагают, что хаотическая траектория внутри фазового пространства делает нейроны способными быстро переключаться между различными состояниями, обеспечивая лабильность центральной нервной системы и ее устойчивость к внешним воздействиям [13]. Присущая нейроактивности коры мозга хаотическая фрактальная динамика ЭЭГ-сигналов свидетельствует о его нормальном функционировании, тогда как избыточно упорядоченный режим свидетельствует о присутствии патологии [14]. При движении или подготовке к выполнению двигательной функции, в процессе активации соответствующих моторных или сенсорных участков коры, наблюдается спад их интенсивности, что приводит к десинхронизации ритма [15]. Основной задачей ИМК является корректное распознавание состояний десинхронизации и синхронизации ритмов.

Воображаемые движения о физических упражнениях способны замедлить или даже остановить атрофию мышц, так как мысленные мышечные упражнения влияют на нервно-мышечные проводящие пути, что важно для людей с ограниченной подвижностью. Технику визуализацию используют также профессиональные спортсмены для улучшения показателей. Такие ИМК необходимы для реабилитации пациентов с нарушениями в двигательной сфере, но могут использоваться и здоровыми людьми для управления вспомогательными устройствами: экзоскелетами, протезами конечностей, электростимуляторами мышц и т.д. [16,17].

Необходимо отметить, что в настоящее время большое внимание врачей, физиологов, биохимиков, психологов и специалистов, занимающихся физическими упражнениями, уделяется нелинейной динамике, касающейся воздействию физических упражнений на изменения в сложности нейроактивности в височной области. Как правило, такие изменения связаны с уменьшением фрактальной сложности хаотических ритмов во времени, и височная область участвует в компенсационном регулировании при однообразном выполнении физических нагрузок. Было выдвинуто предположение, что для поддержания физиологической активности необходимо в отличие от акцентирования на однообразном повторении интенсивной физической нагрузки, использовать положительные специфические эффекты, которые дают качественные и количественные изменения в практических упражнениях [18].

## **2. Регистрация сигналов электрической активности коры головного мозга**

В работе [19] регистрация сигналов коры головного мозга осуществлялась при помощи 19 сенсоров с частотой дискретизации 500 Гц. Порядок электродов FP1 FP2 F3 F4 C3 C4 P3 P4 O1 O2 F7 F8 T3 T4 T5 T6 FZ CZ PZ представлен на Рисунке 1, III. Сигналы ЭЭГ регистрировались у здорового испытуемого (мужчина в возрасте 21 год). Во время снятия сигналов ЭЭГ испытуемый не контролировал свое дыхание или глотание. Запись сигналов производилась с закрытыми глазами. Переход от одного вида движения к другому осуществлялся аудио сигналом «перейти». Эксперимент включал следующие серии испытаний: три последовательных движения левой рукой вперед (назад) по 3008 точек, правой рукой вперед (назад); воображаемые направленные движения рукой (правой, левой) по 7040 точек, случайные непрерывные движения руками (правой, левой).

## **3. Вычисление показателя фрактальности**

Размерность  $D$  во фрактальной геометрии количественно выражает меру сложности временного сигнала и присутствия в нем эффектов самоподобия. Наличие флуктуаций в сигнале ЭЭГ приводит к большей или меньшей степени покрытия им плоскости, что позволяет

выделить присутствие свойств пространственно-временного скейлинга (масштабной инвариантности) и самоподобия. Чем ярче они проявляются, тем большее значение приобретает показатель  $D$ . Характерной особенностью сигналов являются процессы взаимодействия различных мод, что приводит к случайному распределению фаз и к кластеризации. Термин фрактальной размерности относится к нецелому числу или дробной размерности геометрического объекта. Как известно, размерности плоскости и линии равны 2 и 1, соответственно, рассматривая сигналы ЭЭГ в качестве геометрического объекта, ожидается, что их размерность также будет принимать значения  $1 < D < 2$ .

Рассмотрим временной ряд дискретных значений  $X(t)$ . Наложим на кривую  $n$  равных модулей (прямоугольников) с длиной основания  $\alpha = t_{i+1} - t_i = \frac{N-k}{n}$ , так, чтобы полностью её покрыть,

где  $N$  – количество точек временного ряда,  $k = 1, 2, \dots, n$  – начальный отсчет времени.

Поставим в соответствие временному ряду частично упорядоченное конечное множество  $X(N)$ , где  $N$  – число элементов  $x_i$  в множестве  $x_i \in X(N)$ ,  $i = 1 \dots N$ . Произведем выборку элементов множества для определения минимальной площади его покрытия с получением частичных сумм высот модулей  $Y(x, \alpha) = \sum_{i=1}^n x(k + i\alpha) - x(k + (i-1)\alpha)$  в виде разности максимального и

минимального значений элементов на текущем интервале. Будем считать, что элементы множества обладают некоторыми свойствами  $H_\xi(x)$  (размер, форма, цвет и т.д.). Если общих свойств несколько ( $\xi > 1$ ), то описание множества производится с помощью нескольких фрактальных размерностей [20-23]. Определим фрактальную размерность  $D_\xi$  множества  $X(N)$  по свойству  $H_\xi(x)$  угловым коэффициентом количества неперекрывающихся модулей, как величину занимаемой площади  $\log Y_\xi \alpha$  от  $\log \alpha$ :

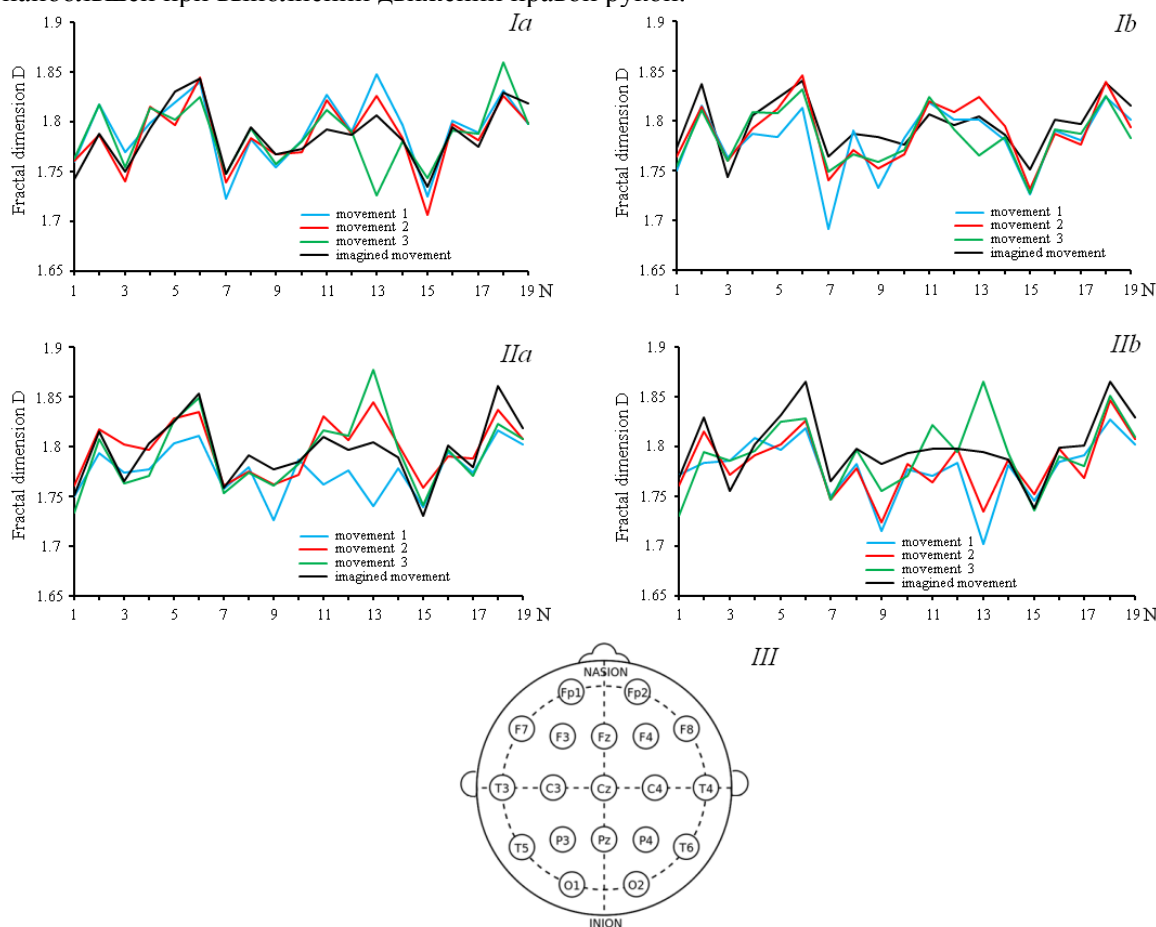
$$D_\xi = \sum_{\gamma} \frac{\log Y_\xi \alpha_\gamma - \log Y_\xi \alpha_{\gamma-1}}{\log \alpha_\gamma - \log \alpha_{\gamma-1}} \left( \frac{n_\gamma - n_{\gamma-1}}{(N-k)(\alpha_\gamma - \alpha_{\gamma-1})} \right)$$

#### 4. Фрактальный анализ сигналов ЭЭГ

Двигательные функции разных органов создают различные распределения активности участков головного мозга. Особый интерес представляет выявление активности областей мозга, которые непосредственно задают моторную команду, а также предшествуют ее формированию. Например, области, которые соответствуют определению выбора исполнительного органа, направления его направленного функционирования к цели, и затем распознаванию параметров объекта манипулирования.

Самоорганизация как способность к формированию разнообразных пространственно-временных паттернов проявляется по-разному при выполнении моторных функций руками (ногами). На Рисунке 1 (*Ia*, *Ib*) представлены значения фрактальной размерности  $D$  для сигналов ЭЭГ (по горизонтали 19 датчиков) при выполнении испытуемым трех направленных последовательных движений левой (правой) рукой (назад, вперед). Выполнение первого движения по-разному «запускает» усиление «регуляторных» возможностей мозга при выборе исполнительной руки в действии и направления ее функционирования. Так, для левой руки первое выполняемое движение «назад» показывает наибольшую фрактальную размерность для всей коры, кроме лево и правозатылочной областей, с уменьшением по величине при повторных движениях, особенно в левовисочной области. При выполнении движения «вперед» левой рукой, фрактальная размерность достигает наибольших значений для большинства областей мозга во время выполнения второго движения. Следует отметить, что в левовисочной

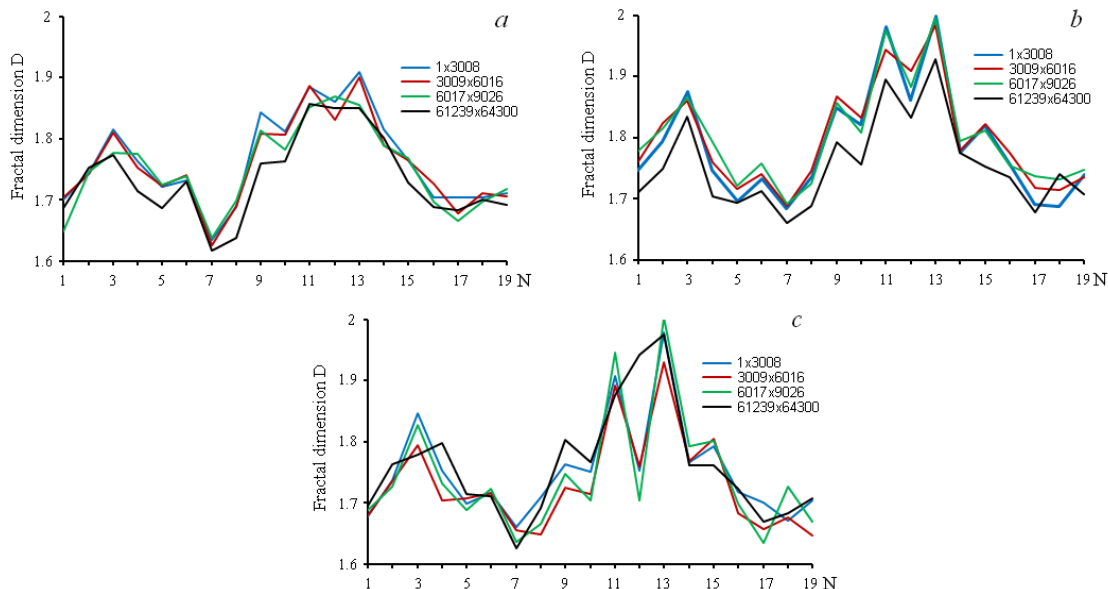
области формируется пространственно-временной паттерн, характеризуемый наименьшей фрактальной размерностью нейроактивности мозга при движении левой рукой (назад, вперед), и наибольшей при выполнении движений правой рукой.



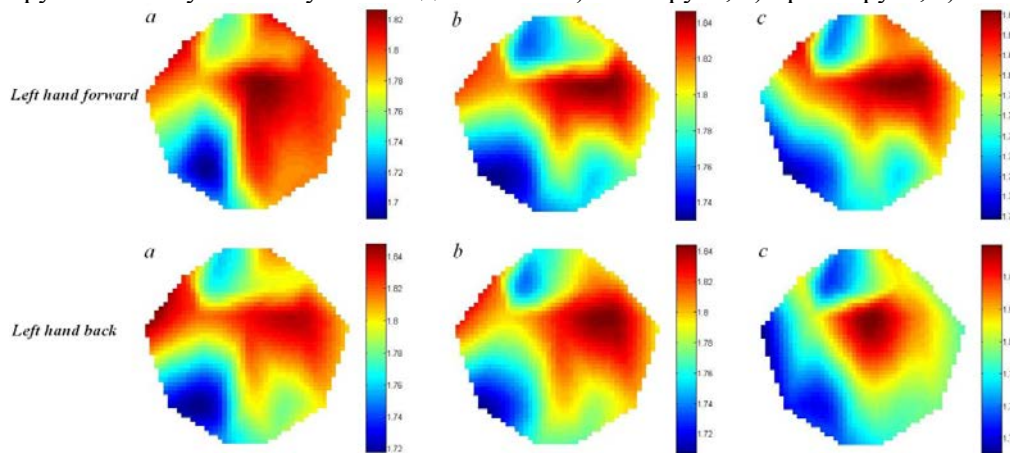
**Рисунок 1.** Значения показателя фрактальности  $D$  сигналов ЭЭГ (19 датчиков) при выполнении праворуким испытуемым движений и их мысленного воспроизведения: *Ia*) левая рука назад, *Ib*) левая рука вперед, *IIa*) правая рука назад, *IIb*) правая рука вперед, *III*) расположение сенсоров ЭЭГ.

Фрактальная размерность нейроактивности коры для правой руки (Рисунок 1,II(a,b)) достигает максимального значения при выполнении третьего направленного движения как назад, так и вперед для всех областей, кроме лобной части. Повторное выполнение реальных движений руками должно постепенно приводить к некоторому эффекту торможения нейроактивности большинства задействованных областей головного мозга, однако данный эффект не проявляется для правой руки, что может быть связано с тем, что испытуемый праворукий. В то же время, выполнение воображаемых движений для обеих рук (назад, вперед) обладает общей направленностью активации соответствующих моторных участков коры, с характерным уменьшением фрактальной размерности  $D$  в левой и правой височной областях и ростом в лобной, теменной и затылочной областях. Фрактальный анализ ЭЭГ-сигналов позволил выявить присутствие одинакового мультимасштабного эффекта, связанного с тем, что воображаемые движения рук активизируют те же области головного мозга, как и реально выполняемые движения. Для случайных движений руками как правой, так и левой формируется подобный пространственно-временной паттерн нейроактивности мозга, с наиболее значительным ростом фрактальной размерности  $D$  для правой руки (Рисунок 2,b). Топографические диаграммы фрактальной размерности для ЭЭГ-сигналов трех последовательных движений левой рукой (вперед, назад) на разных временных интервалах

демонстрируют различную локализацию области возбуждения нейроактивности коры головного мозга в теменной и правовисочной областях к третьему движению, с наибольшим уменьшением фрактальной размерности  $D$  при движении «назад» (эффект торможения) (Рисунок 3,с).



**Рисунок 2.** Значения показателя фрактальности  $D$  сигналов ЭЭГ (19 датчиков) при выполнении праворуким испытуемым случайных движений: *a)* левая рука, *b)* правая рука, *c)* обе руки.



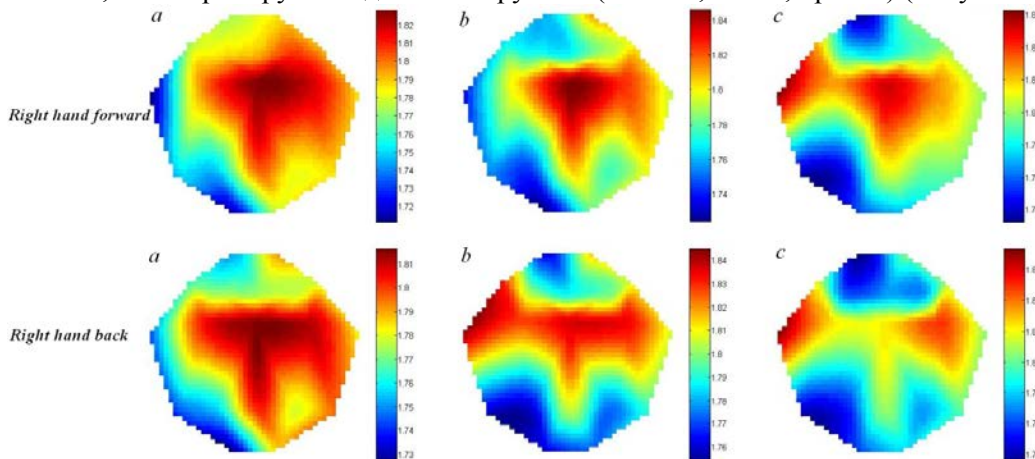
**Рисунок 3.** Топографические диаграммы фрактальной размерности для ЭЭГ-сигналов трех последовательных движений левой рукой на временных интервалах: *a)* 1-3008, *b)* 3009-6016, *c)* 6017-9024.

На Рисунке 4 показано, что при выполнении повторных движений правой рукой «вперед», наблюдается локализация возбуждения в теменной области, тогда как при повторных движениях «назад» формируется особая реакция нейроактивности мозга, перераспределяющаяся в направлении от теменной области к лево и правовисочной областям. Наблюдаемое перераспределение зон активности участков головного мозга, с пространственной локализацией области возбуждения при повторных двигательных действиях, демонстрирует уменьшение структурной сложности фоновой активности участков головного мозга с присущими им фрактальными свойствами масштабной пространственно-временной инвариантности и формированием временных паттернов.

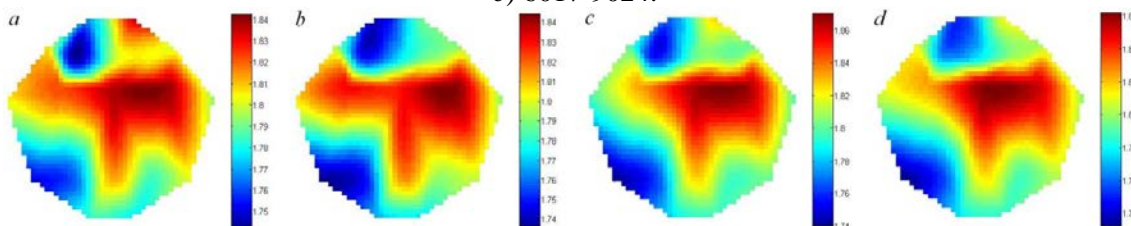
Топографические диаграммы фрактальной размерности для ЭЭГ-сигналов воображаемого движения левой (правой) руками демонстрируют формирование одинакового пространственно-



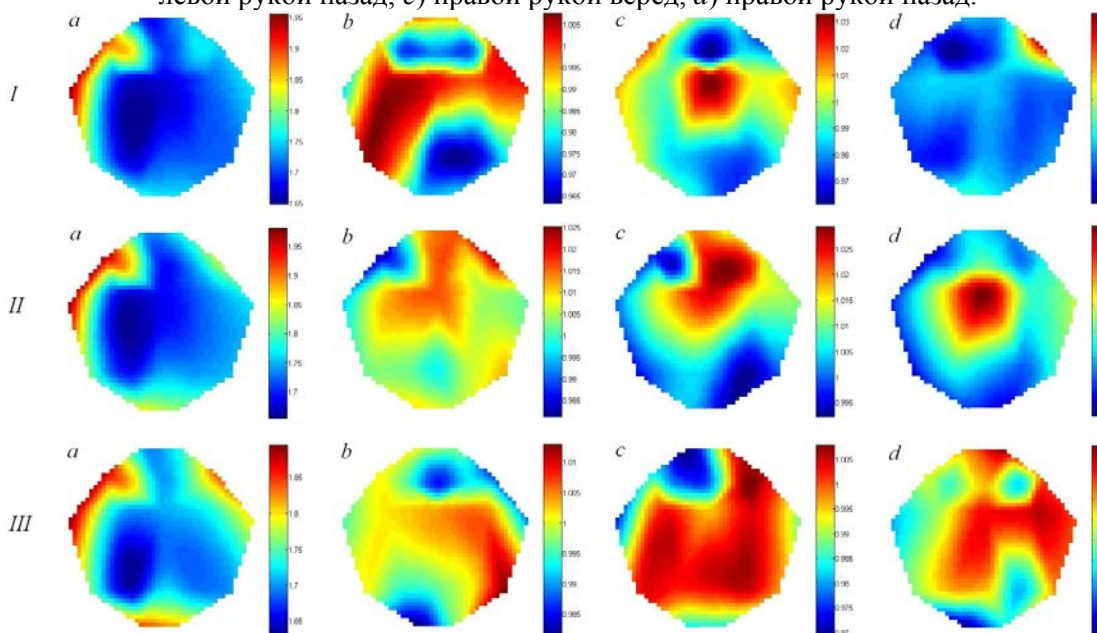
временного паттерна для движений вперед (назад), с ростом фрактальной размерности по величине при воображаемых движениях правой рукой (Рисунок 5). В качестве контрольной группы процесса обучения на разных временных этапах представлены сигналы ЭЭГ случайно направленных, неконтролируемых движений руками (обеими, левой, правой) (Рисунок 6).



**Рисунок 4.** Топографические диаграммы фрактальной размерности для ЭЭГ-сигналов трех последовательных движений правой рукой на временных интервалах: *a*) 1-3008, *b*) 3009-6016, *c*) 6017-9024.



**Рисунок 5.** Топографические диаграммы фрактальной размерности для ЭЭГ-сигналов воображаемого движения на временном интервале (1-7040 точек): *a*) левой рукой вперед; *b*) левой рукой назад; *c*) правой рукой вперед, *d*) правой рукой назад.



**Рисунок 6.** Топографические диаграммы фрактальной размерности  $D$  (*a*) и их отношения для сигналов ЭЭГ случайных движений обеими (*I*), правой (*II*) и левой (*III*) руками: *a*)  $(1 \times 3008 \text{ точ.})$ , *b*)  $(3009 \times 6016 \text{ точ.}) / (1 \times 3008 \text{ точ.})$ , *c*)  $(6017 \times 9024 \text{ точ.}) / (1 \times 3008 \text{ точ.})$ , *d*)  $(61293 \times 64300 \text{ точ.}) / (1 \times 3008 \text{ точ.})$ .

## 5. Заключение

Данное исследование представляет особый интерес, так как демонстрирует чувствительность фрактальной геометрии к выявлению изменения нейронной активности от возрастания до уменьшения на различных временных интервалах выполнения движений руками. Это может быть связано с тем, что на раннем временном этапе происходит поиск нового паттерна активности, и после его нахождения активность сенсомоторных ритмов уменьшается. Исследование фрактальных свойств на разных временных интервалах позволяет выявить формирование особых областей флуктуаций мозговой активности в зависимости от длительности выполнения тех или иных видов движений руками. Такие процессы не всегда соответствует критерию нелинейного хаоса, при котором воздействие некоторого «шума» сопровождается ростом упорядоченности, сопровождаемого эффектом «торможения» при длительном выполнении однотипных движений.

Представленные результаты формирования пространственно-временных паттернов фрактальной размерности  $D$  позволяют провести предварительную диагностику функциональной активности двигательного аппарата и нейроактивности областей головного мозга.

## 6. Литература

- [1] Wolpaw, J.R. Brain-computer interface for communication and control / J.R. Wolpaw, N. Birbaumer, D.J. McFarland // *Clinical Neurophysiology*. – 2002. – Vol. 113. – P. 767-791.
- [2] Zander, T.O. Towards passive brain-computer interfaces: applying brain-computer interface technology to human-machine systems in general / T.O. Zander, C. Kothe // *Journal of Neural Engineering*. – 2011. – Vol. 8(2). – P. 025005.
- [3] Khan, M.J. Decoding of four movement directions using hybrid NIRS-EEG brain-computer interface / M.J. Khan, M.J. Hong, K.S. Hong // *Frontiers in Human neuroscience*. – 2014. – Vol. 8. DOI:10.3389/fnhum.2014.00244.
- [4] Ma, J. A novel EOG/EEG hybrid human-machine interface adopting eye movements and ERPs: application to robot control / J. Ma, Y. Zhang, A. Cichocki, F. Matsuno // *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*. – 2015. – Vol. 62(3). – P. 876-889.
- [5] Lotte, F. Review of classification algorithms for EEG-based brain-computer interfaces / F. Lotte, M. Congedo, A. Lecuyer // *Journal of Neural Engineering*. – 2007. – Vol. 4. – P. 1-24.
- [6] Blankertz, B. Berlin brain-computer interface: non-medical uses of BCI technology / B. Blankertz, M. Tangermann, C. Vidaurre // *Frontiers in neuroscience*. – 2010. – Vol. 4(198). – P. 17.
- [7] Kaiser, V. First steps toward a motor imagery based stroke BCI: new strategy to set up a classifier / V. Kaiser, A. Kreilinger, G.R. Muller-Putz, Ch. Neuper // *Frontiers in Neuroscience*. – 2011. – Vol. 5(86). – P. 10.
- [8] Morash, V. Classifying EEG signals preceding right hand, left hand, tongue, and right foot movements and motor imageries / V. Morash, O. Bai, S. Furlani // *Clinical Neurophysiology*. – 2008. – Vol. 119. – P. 2570.
- [9] Bass, G. Nonlinear Man. Chaos, fractal and homeostatic interplay in human physiology / G. Bass, 1997. [Electronic resource]. – Access mode: [http://www.tonleenders.nl/Pdf/chaos\\_and\\_man.pdf](http://www.tonleenders.nl/Pdf/chaos_and_man.pdf).
- [10] Lehnertz, K. Non-linear time series analysis of intracranial EEG recordings in patient with epilepsy – an overview // *Int. J. Psychophysiol.* – 1999. – Vol. 34. – P. 45-52.
- [11] Korn, H. Is there chaos in the brain? II. Experimental evidence and related models / H. Korn, P. Faure // *C.R. Biologies*. – 2003. – Vol. 326(9). – P. 787-840.
- [12] Izhikevich, E.M. Dynamical Systems in Neuroscience. The Geomerty of Excitability and Bursting / E.M. Izhikevich // The MIT Press: Cambridge, Massachusetts, 2007. – 210 p.
- [13] Schiff, S.J. Controlling chaos in the brain / S.J. Schiff, K. Jerger, D.H. Duong, T. Chang, M.L. Spano, W.L. Ditto // *Nature*. – 1994. – Vol. 370. – P. 615-620.
- [14] Goldberger, A.L. Fractal dynamics in physiology: Alterations with disease and aging / A.L. Goldberger, L.A.N. Amaral, J.M. Hausdorff // *Proc. Natl. Acad. Sci. USA (PNAS)*. – 2002. –

- Vol. 99(1). – P. 2466-2472.
- [15] Dornhege, G. Toward brain-computer interfacing / G. Dornhege, J.R. Millan, T. Hinterberger // A Bradford book. – The MIT Press. Cambridge, 2007. – 520 p.
- [16] Sonkin, K.M. Classification of EEG patterns of imaginary and real movements of the fingers of one hand the method of support vector machines / K.M. Sonkin, L.A. Stankevich, Y.G. Khomenko // Pacific Journal of Medicine. – 2014. – Vol. 2. – P. 30-35.
- [17] Sotnikov, P.I. Review methods of EEG signal processing in the brain-computer interface / P.I. Sotnikov // Electronic Scientific Engineering and Technical Journal Gazette. – 2014. – Vol. 10.
- [18] Pakenas, A. Non-linear dynamics and physical exercise: concepts and applications / A. Pakenas, T.P. Souza, B. Pereira // Rev. Bras. Med. Esporte. – 2007. – Vol.13(5). – P. 299e-303e.
- [19] Brain Computer Interface research at NUST Pakistan // Research carried out at National University of Sciences and Technology) [Electronic resource]. – Access mode: <https://sites.google.com/site/projectbci/>.
- [20] Feder, J. Fractals. – Plenum Press, New York, 1988. – 260 p.
- [21] Tayurskii, D. The Fractal Analysis of the Images and Signals in Medical Diagnostics Fractal Analysis / D. Tayurskii, I. Rusanova // Applications in Health Sciences and Social Sciences. – 2017. – Vol. 3. – P. 57-86.
- [22] Rusanova, I.A. Study of fractal structure of images of nail bed and periungual epithelium / I.A. Rusanova // Biomedical Engineering. – 2013. – Vol. 47(2). – P. 83-85.
- [23] Panishev, O.Yu. Studying Properties of Abnormal Human Brain Activity in Photosensitive Epilepsy Caused by Light Stimulation / O.Yu. Panishev, S.A. Demin, I.A. Rusanova // Biomedical Engineering. – 2015. – Vol. 49(4). – P. 236-239.

## Fractal complexity of the chaotic rhythms of EEG signals of real and imagined movements of the hands

I.A. Rusanova<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Kazan Federal University, Kremliovskaya street 16a, Kazan, Russia, 420008

**Abstract.** Currently, much attention is paid to the development and application in the field of modern neurotechnology "brain-computer" interfaces (BCI), capable for human to communicate with external electronic and electronic-mechanical devices on the basis of the EEG and the imagined movements. The provided fractal analysis of EEG signals for the cases where the patient was asked to perform movements hand, and then reproduce them mentally, has demonstrated clearly the sensitivity of this method to the presence in the EEG signals structure the properties of spatio-temporal self-similarity. It was shown that the imaginary hand movements have the same effect on the activity of brain regions as the real movements. When one repeats a physical hand movement the localization of the excitation region of the cerebral cortex is observed in the right hemisphere. It was revealed a clear decrease of the fractal dimension value during "back" movement of the hand, and it may indicate the inclusion of a "braking" effect. The study of fractal properties at different time intervals allows us to reveal the formation of specific areas of brain activity fluctuations depending on the duration of the execution of directional or random hand movements.