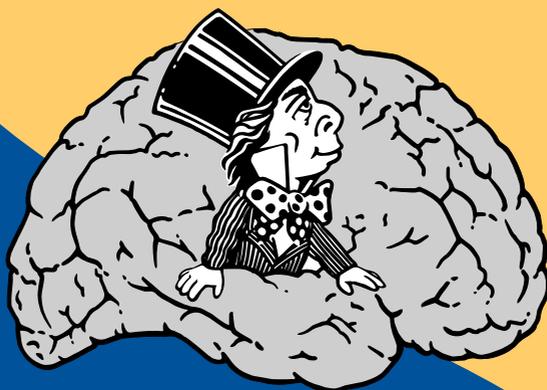


# КОГНИТИВНАЯ НАУКА

В МОСКВЕ



НОВЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

МАТЕРИАЛЫ  
КОНФЕРЕНЦИИ  
2019

Под ред. Е.В. Печенковой, М.В. Фаликман

УДК 159.9  
ББК 88.25  
К57

Когнитивная наука в Москве: новые исследования. Материалы конференции 19 июня 2019 г. Под ред. Е. В. Печенковой, М. В. Фаликман. – М.: ООО «Буки Веди», ИППиП. 2019 г. – 656 стр.

ISBN 978-5-4465-2346-7

УДК 159.9  
ББК 88.25

ISBN 978-5-4465-2346-7

©Авторы статей, 2019

## ИЗМЕНЕНИЯ ИНДЕКСА НЕЛИНЕЙНОЙ ДИНАМИКИ СИГНАЛА ФМРТ В СОСТОЯНИИ ПОКОЯ ПОСЛЕ АВЕРСИВНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

А. О. Тетерева\* (1), О. В. Мартынова (1, 2)

[alina.tao@mail.ru](mailto:alina.tao@mail.ru)

1 – Институт высшей нервной деятельности и нейрофизиологии РАН;

2 – Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»

**Аннотация.** Нейронная активность демонстрирует критическую динамику, которая может быть описана долгосрочной временной корреляцией. Эта нелинейная характеристика показывает скрытое изменение динамических свойств сигнала. В некоторых работах было обнаружено влияние разных когнитивных задач и состояний на критическую динамику активности в определенных областях мозга. В нашей работе мы показываем изменение индекса автокорреляции сигнала – экспоненты Хёрста – в состоянии покоя на данных фМРТ после аверсивного воздействия. В ходе анализа выявилось несколько областей мозга, в которых индекс достоверно различается в состоянии покоя после воздействия в сравнении с исходной активностью. В большинстве выделенных зон происходило повышение индекса, что говорит о возрастании автокорреляции сигнала. Среди них было обнаружено несколько зон, активность которых функционально связывают с переживанием негативных эмоций и боли. Понижение индекса Хёрста было выявлено только в правой средней лобной извилине, ответственной за память, что может указывать на реактивные изменения активности мозга в состоянии покоя, связанной с памятью о недавнем воздействии.

**Ключевые слова:** фМРТ, экспонента Хёрста, DFA, нелинейная динамика, состояние покоя, негативные эмоции, автокорреляция

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 16-15-00300).

### Введение

Как и многие биологические системы, человеческий мозг работает на грани критического состояния. Это состояние представляет собой транзитную фазу между двумя противоположными состояниями, такими как ригидность или чрезмерная хаотичность. В обоих полярных состояниях информация распространяется хуже и на небольшие расстояния, и только критическое состояние динамического равновесия между ними обеспечивает быстрое и направленное распространение информации (Chialvo et al., 2010). Надежной характеристикой критического состояния является феномен критического спа-

да, который отражается в увеличении долгосрочной временной корреляции сигнала во всей системе (Chialvo et al., 2010).

Зависимый от оксигенации крови сигнал (blood oxygen level dependent, – BOLD) функциональной магниторезонансной томографии (фМРТ) также демонстрирует временную корреляцию и спектр мощности, подобный динамике  $1/f$ , где  $f$  – это частота (Bullmore et al., 2001). Одно время предполагалось, что это поведение вызвано низкочастотной наводкой от оборудования в виде розового шума. Однако позже было доказано, что сам мозг продуцирует такую активность (He et al., 2010).  $1/f$ -поведение (или безмасштабное) варьируется между серым, белым веществом и церебральной жидкостью, а также между когнитивными сетями (He et al., 2010). Так, в ряде исследований было показано снижение индекса долгосрочных временных корреляций в определенных областях мозга при выполнении различных задач, во сне, а также по сравнению с активностью в состоянии покоя (Churchill et al., 2016; He et al., 2011; Tagliazucchi et al., 2016).

В нашем исследовании мы поставили задачу проследить изменения индекса нелинейной динамики сигнала BOLD в состоянии покоя до и после аверсивного воздействия. Мы предполагали, что эта динамика может отличаться в областях, связанных с обработкой эмоций.

## Методы

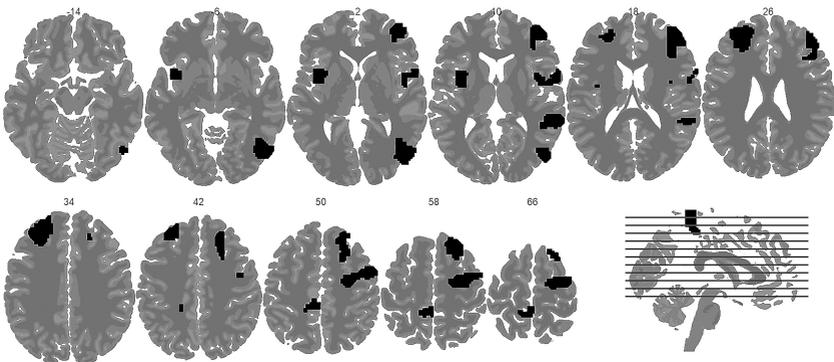
В исследовании приняли участие 23 добровольца от 18 до 35 лет (5 жен.), правши, без неврологических заболеваний и травм. Испытуемые прошли два 10-минутных фМРТ-сканирования (Siemens Magnetom Verio 3T) в течение одного дня: первое до и второе после выработки и угашения условного рефлекса на изображения путем частичного подкрепления слабым электрокожным раздражением. Между сканированиями 1 и 2 был перерыв на выработку условной реакции страха вне сканера и ее угашение внутри сканера. В состоянии покоя испытуемых просили лежать не двигаясь, с закрытыми глазами, и стараться ни о чем не думать. Функциональная запись в режиме T2\* была сделана с TR = 2s, TE = 20ms; всего получено 300 изображений в каждом сканировании. Препроцессинг выполнялся в пакете FSL 5.0 с такими параметрами, как корегистрация со структурным изображением, поправка на чередующийся сьем срезов, поправка на магнитные искажения, сглаживание 4 мм. Данные были очищены от артефактов методом независимых компонент с последующей фильтрацией на плохие компоненты и поправкой на движения. Фильтрация для анализа сигнала BOLD в состоянии покоя (0.01 – 0.1 Гц) была выполнена с помощью функции 3DTproject пакета AFNI.

В качестве показателя долгосрочных временных корреляций была выбрана экспонента Хёрста (H), рассчитанная методом DFA (detrended fluctuation analysis), взятым из пакета Nolds (<https://cschoel.github.io/nolds/nolds.html>), с дополнительной поправкой на неперекрывающиеся окна и линейную подгонку экспоненты. Размер окон составлял 12, 15, 20, 25, 30 изображений в соответствии с рекомендациями (Hardstone et al., 2012; Tagliazucchi et al., 2016).

Данные были парцелированы с использованием функционального атласа (Fan et al., 2016) на 246 зон, в каждой из которых для каждого испытуемого был рассчитан индекс  $H$  и его соответствие модели (goodness of fit). Полученные данные были сравнены по областям атласа до и после воздействия методом парного критерия Стьюдента. Представленные далее результаты сравнения и выводы являются предварительными, так они не прошли поправку на множественные сравнения (FWE).

## Результаты

Усредненная экспонента во всех областях находилась в промежутке  $0.5 < H < 1$ , с высоким соответствием модели  $1/f$ , что говорит о наличии долговременных автокорреляций и стационарности сигнала BOLD (Tagliazucchi et al., 2016). Из 246 масок только 9 показали достоверное различие в состоянии покоя до и после аверсивного воздействия (табл. 1 и рис. 1). Примечательно повышение индекса почти во всех различающихся областях, в сравнении с исходным состоянием, что обычно связывают с меньшими усилиями, меньшей когнитивной нагрузкой на область (Tagliazucchi et al., 2016). Вероятно, это можно объяснить релаксацией области после специфической нагрузки, но это предположение требует дальнейшего исследования. Область № 22 (правая средняя лобная извилина), имеющая отношение к вниманию и рабочей памяти (Fan et al., 2016), показала снижение индекса, что говорит об ее активизации (He et al., 2011). Среди других областей, показавших возрастание  $H$  после воздействия, с негативными эмоциями и ощущением боли связано 3 участка: № 62 (левая прецентральная извилина), № 173 (левая островковая кора) и № 202 (правая латеральная затылочная кора). Изменения динамики активности остальных областей из 9 (табл. 1) могут быть связаны с условиями проведения исследования (височная кора — шум от томографа) и подавлением движений (парацентральная доля (Fan et al., 2016)), так как на момент второго сканирования состояния покоя испытуемые находились в сканере уже 20 минут.



**Рисунок 1.** Аксиальные срезы с проекциями областей, в которых индекс DFA достоверно отличается после аверсивного воздействия

## Выводы

Наши результаты указывают на то, что критическая динамика сигнала BOLD также может отражать реактивные изменения активности мозга в состоянии покоя. Примечательно, что изменения наблюдались в областях, связанных с негативными переживаниями и памятью, что может быть связано с последствиями выработки условного рефлекса на аверсивное воздействие. Однако это предположение требует дальнейшего исследования с применением статистических поправок и сравнением с данными контрольной группы без воздействия.

**Таблица 1.** Области мозга, в которых обнаружено достоверное различие после аверсивного воздействия. Приведены усредненные индексы до и после воздействия, а так же результаты парного критерия Стьюдента

Номер области	Название по атласу	Анатомическая область	Сторона	До воздействия, среднее	После воздействия, среднее	T	p-value
4	SFG_R_7_2	верхняя лобная извилина	правая	0.757	0.839	-3.022	.006
15	MFG_L_7_1	средняя лобная извилина	левая	0.782	0.85	-2.649	.015
22	MFG_R_7_4	средняя лобная извилина	правая	0.865	0.798	2.427	.024
56	PrG_R_6_2	прецентральная извилина	правая	0.792	0.855	-2.093	.048
62	PrG_R_6_5	прецентральная извилина	правая	0.748	0.805	-2.485	.021
65	PCL_L_2_1	парацентральная доля	левая	0.734	0.805	-2.089	.048
124	pSTS_R_2_2	задняя часть верхней височной извилины	правая	0.751	0.832	-2.248	.0349
173	INS_L_6_6	островковая кора	левая	0.676	0.768	-2.634	.015
202	LOcC_R_4_2	латеральная затылочная кора	правая	0.75	0.832	-2.343	.029

## Литература

- Bullmore E., Long C., Suckling J., Fadili J., Calvert G., Zelaya F., Carpenter T. A., Brammer M. Colored noise and computational inference in neurophysiological (fMRI) time series analysis: Resampling methods in time and wavelet domains // *Human Brain Mapping*. 2001. Vol. 12. No. 2. P. 61 – 78.
- Chialvo D. R. Emergent complex neural dynamics // *Nature Physics*. 2010. Vol. 6. No. 10. P. 744 – 750. doi:10.1038/nphys1803
- Churchill N. W., Spring R., Grady C., Cimprich B., Askren M. K., Reuter-Lorenz P. A., Jung M. S., Peltier S., Strother S. C., Berman M. G. The suppression of scale-free fMRI brain dynamics

across three different sources of effort: Aging, task novelty and task difficulty // *Scientific Reports*. 2016. Vol. 6. No. 1. P. 30895. doi:10.1038/srep30895

Fan L., Li H., Zhuo J., Zhang Y., Wang J., Chen L., Yang Z., Chu C., Xie S., Laird A. R., Fox P. T., Eickhoff S. B., Yu C., Jiang T. The human brainnetome atlas: A new brain atlas based on connective architecture // *Cerebral Cortex*. 2016. Vol. 26. No. 8. P. 3508–3526. doi:10.1093/cercor/bhw157

Hardstone R., Poil S.-S., Schiavone G., Jansen R., Nikulin V. V., Mansvelde H. D., Linkenkaer-Hansen K. Detrended fluctuation analysis: A scale-free view on neuronal oscillations // *Frontiers in Physiology*. 2012. Vol. 3. doi:10.3389/fphys.2012.00450

He B. J. Scale-free properties of the functional magnetic resonance imaging signal during rest and task // *Journal of Neuroscience*. 2011. Vol. 31. No. 39. P. 13786–13795. doi:10.1523/jneurosci.2111-11.2011

He B. J., Zempel J. M., Snyder A. Z., Raichle M. E. The temporal structures and functional significance of scale-free brain activity // *Neuron*. 2010. Vol. 66. No. 3. P. 353–369. doi:10.1016/j.neuron.2010.04.020

Tagliazucchi E., Chialvo D. R., Siniatchkin M., Amico E., Brichant J.-F., Bonhomme V., Noirhomme Q., Laufs H., Laureys S. Large-scale signatures of unconsciousness are consistent with a departure from critical dynamics // *Journal of The Royal Society Interface*. 2016. Vol. 13. No. 114. P. 20151027. doi:10.1098/rsif.2015.1027

## NONLINEAR DYNAMICS INDEX OF THE FMRI SIGNAL CHANGES AT REST AFTER AVERSIVE STIMULATION

A. O. Teterova\* (1), O. V. Martynova (1, 2)

alina.tao@mail.ru

1 – Institute of Higher Nervous Activity and Neurophysiology RAS, Moscow;

2 – National Research University “Higher School of Economics”, Moscow

**Abstract.** Neural activity demonstrates critical dynamics that can be described by long-range temporal correlation. The nonlinear characteristic reveals hidden changes in the dynamic properties of a signal. Some studies have found the influence of various cognitive tasks and states on the critical dynamics of activity in certain areas of the brain. In this work, we show changes in the autocorrelation index of the signal – the Hurst exponents – on fMRI data collected at a resting state after aversive exposure. The analysis revealed several areas of the brain in which the index significantly differs in the resting states before and after aversive stimulation. Most of the selected zones have an increase in the index, which indicates a rise in the signal autocorrelation. Among them were found several zones in which activity is functionally associated with the experience of negative emotions and pain. The Hurst index decline was found only in the right middle frontal gyrus responsible for memory, which may indicate reactive changes in brain activity at rest associated with the memory of recent stimulation.

**Keywords:** fMRI, Hurst exponent, DFA, nonlinear dynamics, resting state, negative emotions, autocorrelation