



Известия высших учебных заведений. Прикладная нелинейная динамика. 2025. Т. 33, № 3  
Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Applied Nonlinear Dynamics. 2025;33(3)

Научная статья  
УДК 530.182

DOI: 10.18500/0869-6632-003159  
EDN: NDICVN

**Маркеры состояния пациентов после ортодонтического воздействия:  
применение рекуррентного анализа к данным ЭЭГ, полученным  
при выполнении когнитивных тестов**

*А. О. Сельский<sup>✉</sup>, Е. П. Емельянова, Е. Е. Дрождева*

Саратовский национальный исследовательский государственный университет  
имени Н. Г. Чернышевского, Россия

E-mail: ✉selskii@yandex.ru, meretari@yandex.ru, drozhdeva.e@bk.ru

Поступила в редакцию 12.09.2024, принята к публикации 20.12.2024,  
опубликована онлайн 16.01.2025, опубликована 30.05.2025

**Аннотация.** Цель настоящего исследования — изучить различия рекуррентных показателей, построенных по сигналам электроэнцефалографии пациентов после ортодонтического воздействия во время выполнения когнитивных тестов. В зависимости от типа воздействия (установка брекетов или элайнеров) выделить в каналах маркеры, по которым можно в дальнейшем определить силу стресса от ортодонтического вмешательства для последующей коррекции лечения. **Методы.** Для изучения данных электроэнцефалографии использовался рекуррентный анализ. В частности, строились рекуррентные показатели для каждого канала каждого пациента. **Результаты.** Продemonстрированы каналы, в которых изменения рекуррентных показателей при различном типе ортодонтического воздействия наибольшие. Для этих каналов описана динамика рекуррентных показателей в них для выделения некоторых маркеров стресса и боли, которые испытывает пациент. **Заключение.** В ходе исследования построены рекуррентные показатели по данным электроэнцефалографии пациентов после ортодонтического воздействия. Показано, что наиболее заметные отличия для пациентов разных групп демонстрируют височные и затылочные каналы (O1, O2, T3, T4, T5, T6). Таким образом, значения рекуррентных показателей этой группы каналов следует использовать в качестве маркера состояния пациента.

**Ключевые слова:** рекуррентный анализ, ортодонтия, электроэнцефалография, маркеры, инклюзия.

**Благодарности.** Работа поддержана Российским научным фондом, проект No. 23-72-01021.

**Для цитирования:** Сельский А. О., Емельянова Е. П., Дрождева Е. Е. Маркеры состояния пациентов после ортодонтического воздействия: применение рекуррентного анализа к данным ЭЭГ, полученным при выполнении когнитивных тестов // Известия вузов. ПНД. 2025. Т. 33, № 3. С. 399–411. DOI: 10.18500/0869-6632-003159. EDN: NDICVN

Статья опубликована на условиях Creative Commons Attribution License (CC-BY 4.0).

## Markers of patients' condition after orthodontic treatment: application of recurrent analysis to EEG data obtained during cognitive tests

A. O. Selskii<sup>✉</sup>, E. P. Emelyanova, E. E. Drozhdeva

Saratov State University, Russia

E-mail: ✉selskii.ao@gmail.com, meretari@yandex.ru, drozhdeva.e@bk.ru

Received 12.09.2024, accepted 20.12.2024, available online 16.01.2025, published 30.05.2025

**Abstract.** The purpose of this study — is to study the differences in recurrent indicators based on electroencephalography signals of patients after orthodontic treatment during cognitive tests. Depending on the type of impact (installation of braces or aligners), identify markers in the canals, which can be used to further determine the strength of stress from orthodontic intervention for subsequent correction of treatment. *Methods.* Recurrence analysis was used to study electroencephalography data. In particular, recurrent indicators were constructed for each channel of each patient. *Results.* The channels in which changes in recurrent indicators with different types of orthodontic influence are the greatest are demonstrated. For these channels, the dynamics of recurrent indicators in them is described to highlight some markers of stress and pain experienced by the patient. *Conclusion.* In the course of the study, recurrent indices were constructed based on the electroencephalography data of patients after orthodontic treatment. It was shown that the highest differences in patients of different groups were demonstrated by the temporal and occipital canals (O1, O2, T3, T4, T5, T6). Thus, the value of recurrent indices of this group of indices should be used as a marker of the patient's condition.

**Keywords:** recurrent analysis, orthodontics, electroencephalography, markers, inclusion.

**Acknowledgements.** The work was supported by the Russian Science Foundation, project No. 23-72-01021.

**For citation:** Selskii AO, Emelyanova EP, Drozhdeva EE. Markers of patients' condition after orthodontic treatment: application of recurrent analysis to EEG data obtained during cognitive tests. *Izvestiya VUZ. Applied Nonlinear Dynamics*. 2025;33(3):399–411. DOI: 10.18500/0869-6632-003159

*This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution License (CC-BY 4.0).*

### Введение

Одной из важных, но мало изученных проблем является вопрос о влиянии длительного лечения на состояние пациента [1]. Особенно данная проблема важна в случае, если лечение сопровождается дискомфортом или болевыми ощущениями. Именно такая ситуация часто возникает при ортодонтическом лечении [2]. На сегодняшний день продолжительность лечения может весьма сильно варьироваться: от нескольких лет при традиционной ортодонтии для взрослых пациентов до нескольких месяцев при использовании новаторских подходов, включающих хирургические вмешательства (например, остеотомия, кортикотомия и пр.), дополняемых физиотерапевтическими методами воздействий [3, 4]. Несмотря на явное преимущество сокращения времени ношения ортодонтических аппаратов, связанное со снижением их отрицательного влияния на зубы и околозубные ткани, возникают вопросы об адаптационных возможностях челюстно-лицевого аппарата и окружающих его тканей для быстрой перестройки данной системы при ускорении коррекции [5]. В настоящей статье предпринята попытка расширить для специалистов данной области спектр объективных диагностических возможностей в оценке наблюдения за адаптационными процессами пациентов, а именно: будет использован анализ электроэнцефалографических записей в процессе определения когнитивного статуса пациента для выделения и описания объективных диагностических критериев (биофизических маркеров) адаптационных процессов организма.

Для анализа в ходе экспериментальных записей пациенты проходили когнитивные тесты, так как в некоторых исследованиях было отмечено, что длительное воздействие боли и стресса приводят к снижению когнитивных функций [6]. В качестве самих тестов использовались хорошо известные в области нейронаук задачи на счет, запоминание, концентрацию внимания, к примеру,

таблицы Шульте [7, 8]. Всего в каждом эксперименте было четыре разных теста, чтобы оценить влияние ортодонтического воздействия на различные когнитивные функции. Кроме того, чтобы отследить динамику изменения рекуррентных показателей, эксперимент для каждого пациента проводился трижды. Первый раз — до установки брекет-системы или элайнеров. Второй раз — сразу после ортодонтического вмешательства. Третий эксперимент проводился спустя некоторое время после второго и призван продемонстрировать возникшие в результате длительного стресса изменения.

В настоящее время активно исследуются вопросы направленности связи при адаптации активности мозга и восстановления здоровья ротовой полости [9]. В частности, работы по наложению окклюзионных шин продемонстрировали значительные изменения в сенсомоторной коре [10], кроме того, работы [11] показали, что установка имплантатов меняет активность фронтальных зон, не затрагивая сенсомоторные зоны. Показано, что когнитивные функции человека, такие как память, гнозис и праксис, снижаются из-за потери нормальной окклюзии, связанной с удалением зубов и/или жевательной дисфункцией [12]. В то же время можно уверенно утверждать, что активность головного мозга и когнитивный статус пациента демонстрируют существенные, хорошо изученные взаимосвязи и корреляции [13, 14]. Кроме того, ортодонтические операции могут сопровождаться болевыми ощущениями, а продолжительное лечение, кроме того, накапливающимся стрессом, которые могут приводить к снижению когнитивных функций [6].

В качестве основного метода анализа данных ЭЭГ в настоящей работе предлагается использовать сравнение рекуррентных показателей. Данный метод имеет ряд преимуществ, которые делают его весьма востребованным для задач, связанных с анализом физиологических сигналов [15–17]. Во-первых, рекуррентный анализ не требует сложных вычислений, что экономит время проведения расчетов, снижает вероятность появления ошибок, позволяет впоследствии легко перейти к системам, работающим в реальном времени, а не в режиме постобработки [18]. Во-вторых, рекуррентный анализ позволяет работать с существенно нелинейными и хаотическими сигналами и сравнивать их между собой с минимальными нормировками, так как метод не зависит от амплитудных характеристик сигнала и подсчитывает только число возвратов на фиксированном временном ряду [15]. Кроме того, рекуррентные показатели являются довольно устойчивыми в статистическом смысле в рамках одного эксперимента или теста, что позволяет работать даже с малыми статистическими выборками данных [19].

Цель настоящего исследования — изучение различий рекуррентных показателей, построенных по сигналам электроэнцефалографии пациентов после ортодонтического воздействия во время выполнения когнитивных тестов. В зависимости от типа воздействия (установка брекетов или элайнеров) выделить в каналах маркеры, по которым можно в дальнейшем определить силу стресса от ортодонтического вмешательства для последующей коррекции лечения.

## 1. Методика

**1.1. Описание нейрофизиологического эксперимента.** Испытуемые добровольно участвовали в эксперименте на бесплатной основе. Все испытуемые подписали информированное согласие на участие в клиническом исследовании, получили все необходимые разъяснения по поводу исследования и дали согласие на последующую публикацию результатов исследования. Собранные экспериментальные данные обрабатывались с учетом конфиденциальности и анонимности участников исследования. Все процедуры, выполненные в исследованиях с участием людей, соответствовали Хельсинкской декларации 1964 года и ее более поздним поправкам. Все клинические данные и дизайн клинического исследования были одобрены местным комитетом по этике исследований.

Таблица. Разделение пациентов на группы по типу лечения и соответствующей силе ортодонтического воздействия

Table. Dividing patients into groups according to the type of treatment and the corresponding strength of orthodontic influence

№	Type of treatment	Group
1	Braces	#1
2	Braces	#1
3	Braces	#1
4	14,15,24,25	#2
5	13,23,14,24	#2
6	16,17,26,27	#2
7	11,21,22	#3
8	23,14,16	#3

Использовались следующие каналы: O1, O2, Oz, P3, P4, Pz, C3, C4, Cz, F3, F4, F7, F8, Fr1, Fr2, T3, T4, T5, T6. Сигналы ЭЭГ фильтровались с полосой пропускания 0.1...40 Гц и дискретизировались с частотой 500 Гц и  $\Delta t = 0.002$  с, а также приводились к среднему нулевому значению. Запись каждого канала ЭЭГ можно рассматривать как отдельный одномерный сигнал  $x(t_i)$ .

В настоящей работе для всестороннего исследования ортодонтического воздействия на активность мозга пациентов была предложена следующая схема проведения экспериментальных записей: первая запись проводилась примерно за две недели до ортодонтической операции по установке брекетов или элайнеров. Второй эксперимент — сразу после установки аппарата. Третий раз пациент проходил эксперимент примерно через две недели после ортодонтического воздействия. Схема хронологической последовательности экспериментов указана на рис. 1.

Каждый эксперимент представляет собой последовательность из четырех когнитивных тестов, см. рис. 1. В первом тесте необходимо нажимать в порядке убывания на кружки от числа 25 к числу 1. При правильном нажатии кружки исчезают, что упрощает задачу по ходу прохождения теста. Вторым тестом идет задача на запоминание расположения точек в квадратном поле из шестнадцати ячеек. Пациент должен запомнить конфигурацию точек, которую ему демонстрируют, а затем повторить ее в пустом поле на планшете. Третьим тестом служат таблицы Шульте. Этот тест похож на первый, однако для таблиц Шульте сложность теста не меняется в процессе его прохождения. Четвертый тест представляет собой задание на счет. Пациенту демонстрируют различное число квадратов, а он должен посчитать, четным было их число или нечетным, и нажать соответствующую кнопку на пульте.

**1.2. Рекуррентный анализ.** Одним из методов нелинейной динамики, применяемым для анализа различных данных, является рекуррентный анализ, который позволяет установить взаимосвязи и корреляции между сигналами в сложных распределенных системах [21]. Данный метод нашел применение в широком диапазоне задач обработки нелинейных и хаотических сигналов различной природы [22]. Сам алгоритм расчета отличается простотой [23], что делает его перспективным для работы с большими данными и обработкой сигналов в реальном времени. Рассмотрим сигнал  $x(t)$ , значения которого известны в моменты времени  $t_i$ , где  $i = 1, \dots, n$ .

В текущее исследование были включены данные 8 испытуемых, распределенных по трем группам. В первую группу вошли пациенты, которым устанавливались брекеты. Вторая группа состояла из пациентов, которым были установлены элайнеры на четыре зуба. В последней группе пациентам были установлены элайнеры на три зуба. Хотя основное внимание будет уделяться общим закономерностям и деление на группы из-за их малого размера скорее условно, полезно рассмотреть также отличия между данными группами пациентов. Данные о разбиении на группы и проводимом лечении собраны в Таблице. Для элайнеров в Таблице указаны номера зубов, на которые устанавливается аппарат.

Регистрация электрической активности головного мозга проводилась по стандартной схеме 10–20 [20], устанавливались 19 каналов.

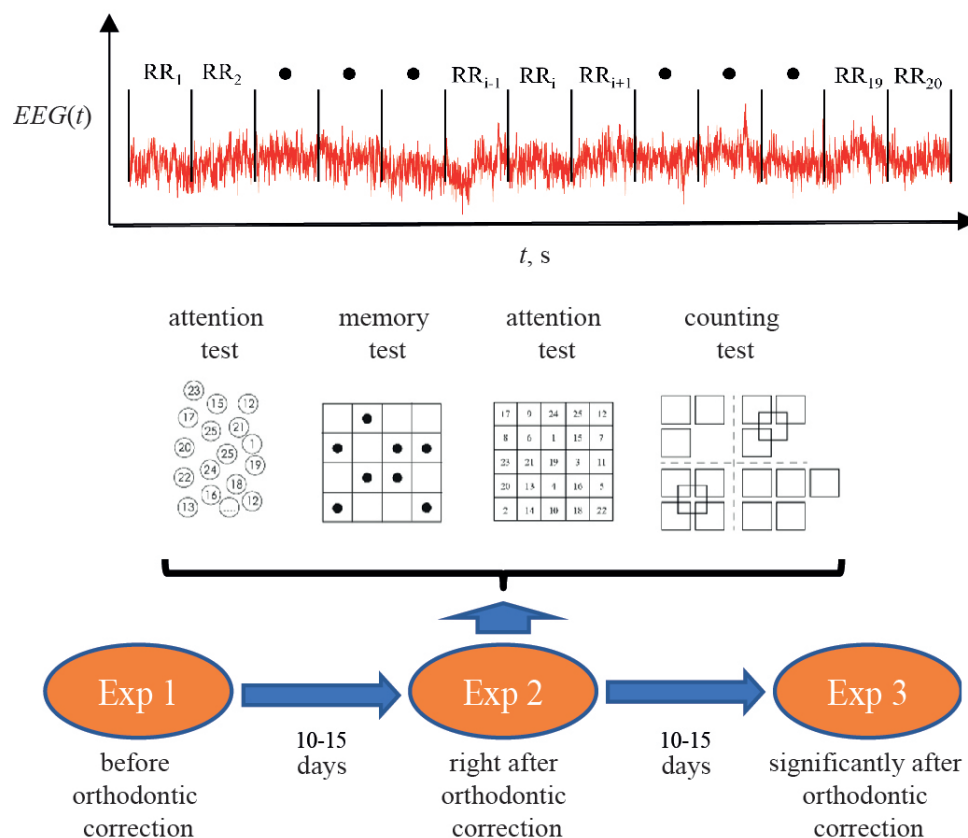


Рис. 1. Схематичное изображение разбиения исходного сигнала на несколько интервалов, по которым проводился расчет рекуррентных показателей. Проводимые в рамках каждого эксперимента тесты: два на внимание, по одному на запоминание и счет. Общая схема эксперимента: первый — за 10–15 дней до ортодонтической операции, второй — в день после операции, третий — спустя 10–15 дней после операции

Fig. 1. Schematic representation of the division of the initial signal into several intervals, by which the calculation of recurrent indicators was carried out. Tests carried out within the framework of each experiment: two for attention, one for memorization and counting. General scheme of the experiment: the first — 10–15 days before orthodontic surgery, the second — on the day after the surgery, the third — 10–15 days after the surgery

Для него можно построить рекуррентную матрицу по следующему правилу:

$$R_{i,j} = \theta(\varepsilon - \|x(t_i) - x(t_j)\|), \quad (1)$$

где  $R_{i,j}$  — элемент рекуррентной матрицы для сигнала  $x$ ;  $t_i$  и  $t_j$  — моменты времени  $t$ ;  $\theta$  — функция Хевисайда, которая принимает нулевое значение для отрицательных аргументов и единичное при неотрицательных. Таким образом, если в момент времени  $t_j$  сигнал вернулся в  $\varepsilon$ -окрестность значения сигнала в момент времени  $t_i$ , то в рекуррентной матрице будет 1. Пороговое значение  $\varepsilon = 0.02$  является ключевым параметром метода, обеспечивающего необходимую точность. Слишком большое значение параметра приведет к тому, что динамических повторов в сигнале будет слишком много и рекуррентная диаграмма окажется почти целиком заполнена. Уменьшение параметра, напротив, приводит к тому, что точек почти не будет. В обоих случаях теряется ценная информация о динамике системы. В рамках настоящей работы значение параметра  $\varepsilon$  было рассчитано эмпирически так, чтобы плотность точек на рекуррентной диаграмме составляла около 1% (в соответствии с [24]) для подавляющего большинства исследуемых сигналов ЭЭГ.

Для оценки количества повторов в сигнале используется рекуррентный показатель, являющийся суммой всех ненулевых значений рекуррентной матрицы, нормированной на ее размер [12].

Рекуррентный показатель может быть рассчитан для каждого анализируемого сигнала  $x$  по всей длине временного ряда или по небольшому временному фрагменту. Из-за очень большого объема данных в сигналах электроэнцефалографии рекуррентный показатель часто стоит рассчитывать для относительно небольших временных фрагментов. Поэтому для длительных записей имеет смысл разделить сигнал на несколько частей и посчитать рекуррентные показатели для каждой части отдельно. При этом нормировка рекуррентного показателя на размер рекуррентной матрицы дает возможность корректно сравнивать рекуррентные показатели фрагментов сигнала различной длительности.

Схема деления записи ЭЭГ на части показана на рис. 1. Для расчета рекуррентных показателей вся запись когнитивных тестов разбивалась на двадцать отрезков одинаковой длительности. Отличие в длительности записей ЭЭГ в разных экспериментах и у разных испытуемых нивелируется нормировкой на длину фрагмента при расчете рекуррентного показателя. Кроме записей когнитивных тестов, в полученные двадцать фрагментов входят и две записи состояния покоя с закрытыми глазами. Кроме удобства расчета, такая схема позволяет оценить, как изменяется активность головного мозга в процессе прохождения когнитивного теста. Таким образом, для каждого пациента было проанализировано по три экспериментальных записи, где для каждого канала было рассчитано 20 рекуррентных показателей  $RR^i$ . Для сравнения динамики рекуррентных показателей между пациентами и между разными экспериментальными записями необходимо провести некоторую нормировку полученных показателей. С этой целью были найдены для каждого эксперимента и каждого канала среднее значение рекуррентного показателя, а в качестве нормированного значения используется разность между текущим значением и средним.

$$NRR_i = RR^i - \overline{RR}, \overline{RR} = \frac{1}{20} \sum RR^i. \quad (2)$$

Кроме того, в описанной процедуре проведения экспериментов первый эксперимент — до ортодонтического воздействия — может служить в некотором смысле нормальной реакцией пациента на когнитивный тест. Показатель может быть индивидуальным и отличаться в рамках одной группы. Поэтому, кроме нормировки на среднее значение, приведенное выше, будем рассматривать вторую нормировку на средний рекуррентный показатель в первом эксперименте:

$$1NRR_i = NRR_i - \frac{1}{20} \sum NRR^{i1}, \quad (3)$$

где  $RR^{i1}$  — рекуррентные показатели в первом эксперименте для данного канала этого пациента.

В ходе работы показатели  $NRR_i$  и  $1NRR_i$  были рассчитаны для каждого канала каждого пациента, чтобы провести в дальнейшем поиск статистических закономерностей по группам пациентов.

## 2. Результаты

Так как изменения активности головного мозга при длительном лечении могут носить не только общий, но и локальный характер, необходимо рассматривать изменение статистических закономерностей рекуррентных показателей между экспериментами отдельно для всех 19 каналов сигнала ЭЭГ. Такую информацию проще предоставить и анализировать графически в виде следующего рисунка — рис. 2. Из рисунка видно, что для первой группы распределение рекуррентных показателей от эксперимента к эксперименту визуально не изменяется. Сохраняются значения среднего и медианы, а также разброс показателей.

Для второй группы эксперимент, проводимый сразу после ортодонтического воздействия, мало отличается от эксперимента до воздействия, за исключением нескольких каналов — O1, O2,



T6 — для которых рекуррентные показатели второго эксперимента имеют немного меньший разброс. А вот разброс рекуррентных показателей для третьего эксперимента во второй группе существенно возрастает. Если для остальных экспериментов медиана и среднее примерно равны, то для третьего эксперимента значение среднего заметно превосходит медиану.

Для третьей группы наблюдаются похожие результаты, за тем исключением, что чаще разброс рекуррентных показателей для первого эксперимента больше разброса для второго эксперимента. Особенно заметным становится рост разброса рекуррентных показателей в третьем эксперименте для каналов в височных областях — T3, T4, T5, T6.

Рис. 2 построен по нормировке на среднее значение для каждого канала каждого пациента в конкретном эксперименте. При этом значение рекуррентного показателя, соответствующего прохождению когнитивных тестов, может быть индивидуальной характеристикой и должно учитываться отдельно. Для этой цели будет проведена дополнительная нормировка на среднее значение рекуррентного показателя для данного канала данного пациента во время прохождения первого эксперимента. Так как первый эксперимент проводился до ортодонтического воздействия, значение рекуррентных показателей в этом эксперименте будем считать типичным для данного

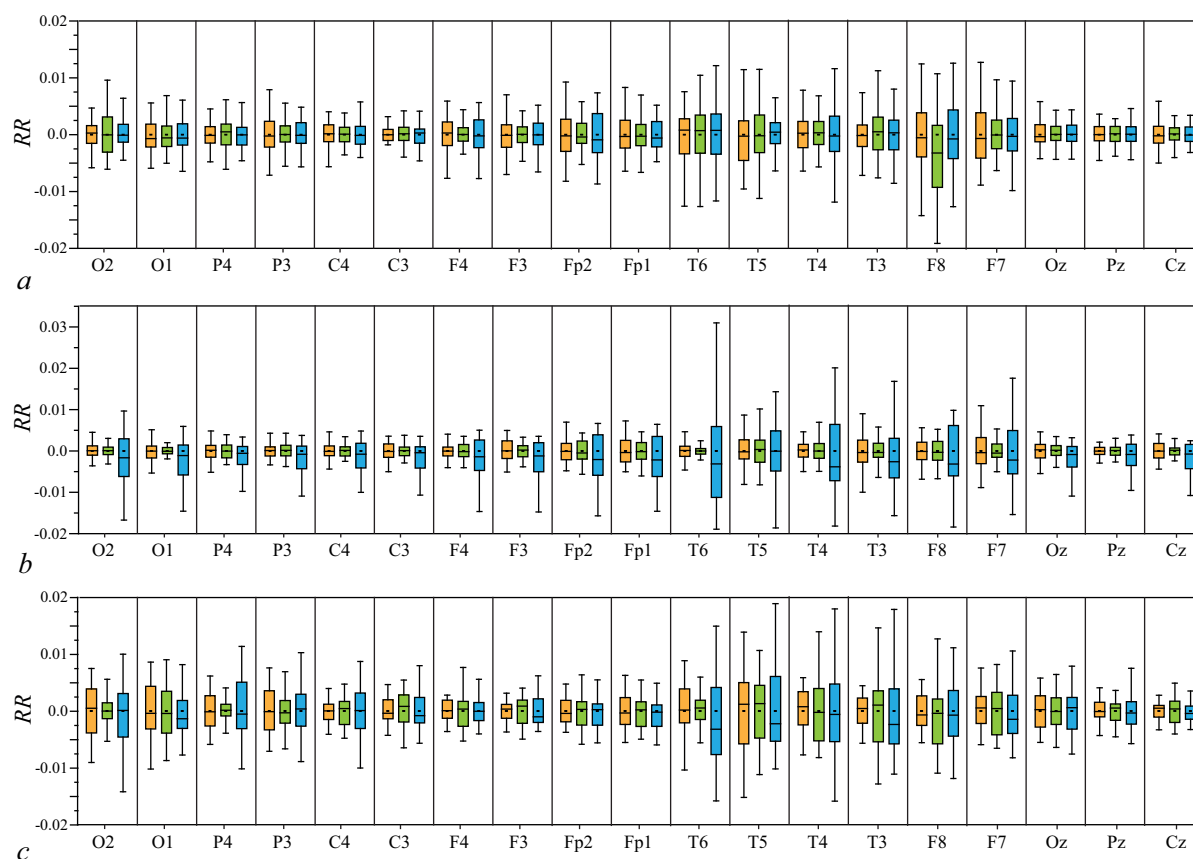


Рис. 2. Характеристики распределения нормированных рекуррентных показателей  $NRR_i$  пациентов в первой (a), второй (b) и третьей (c) группах в зависимости от канала ЭЭГ и номера эксперимента: оранжевым цветом — первый эксперимент (до ортодонтического воздействия), зеленым цветом — второй (сразу после) и синим цветом — третий (спустя 10–15 дней после воздействия) (цвет онлайн)

Fig. 2. Characteristics of the distribution of normalized recurrent rates  $NRR_i$  of patients in the first (a), second (b) and third (c) groups depending on the EEG channel and experiment number: orange is the first experiment (before orthodontic treatment), green is the second (immediately after) and blue third color (10–15 days after exposure) (color online)

пациента. На рис. 3 представлены найденные статистические закономерности для такой нормировки. Значения для первого эксперимента не приводятся, так как они становятся малоинформативными.

Как и предполагалось, в этом случае разница становится заметнее. Более других отличия заметны в тех же каналах — T3, T4, T5, T6. Можно уверенно сказать, что, используя локальные записи каналов T5 и T6 во время выполнения когнитивного теста, можно отличать пациентов, которым сделали операцию по установке ортодонтического аппарата. В случае, если с течением времени и силой ортодонтического воздействия разброс рекуррентных показателей в данных каналах будет возрастать, то это может являться эффективным маркером, который показывает то, насколько сильно лечение влияет на пациента, чтобы скорректировать лечение.

Кроме этого, новая нормировка показывает интересный тренд, связанный со сравнением разных групп пациентов во втором и третьем эксперименте. Если для пациентов второй группы (установка элайнеров на 4 зуба) нет четкого увеличения разброса рекуррентных показателей для одного из экспериментов, то для двух других групп тенденции очевидны. Так, у первой группы (пациенты с брекетами) разброс во втором эксперименте куда заметнее,

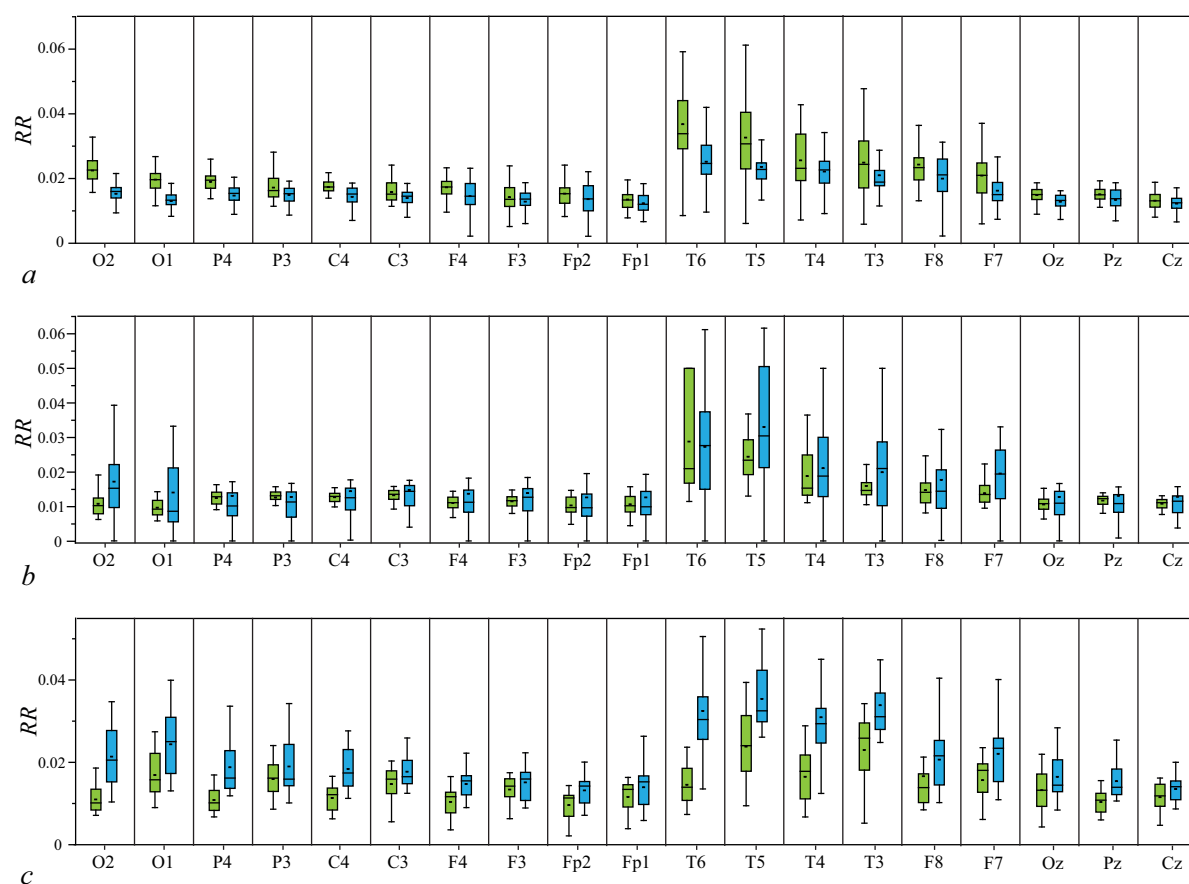


Рис. 3. Характеристики распределения нормированных рекуррентных показателей  $1NNRR_i$  пациентов в первой (a), второй (b) и третьей (c) группах в зависимости от канала ЭЭГ и номера эксперимента: зеленым цветом — второй (сразу после) и синим цветом — третий (спустя 10–15 дней после воздействия) (цвет онлайн)

Fig. 3. Characteristics of the distribution of normalized recurrent rates  $1NNRR_i$  of patients in the first (a), second (b) and third (c) groups depending on the EEG channel and experiment number: green is the second (immediately after) and blue third color (10–15 days after exposure) (color online)



чем для третьего эксперимента. А у пациентов третьей группы, наоборот, разброс возрастает для третьего эксперимента.

Такое поведение может быть объяснено тем, что пациенты по-разному переносят операцию по установке ортодонтического аппарата. Для пациентов с брекетами их установка является сильным шоком, после которого привыкание к брекетам проходит с меньшим напряжением. А вот для пациентов с элайнерами на три зуба стресс, связанный с привыканием к ортодонтическому аппарату, выше, чем стресс непосредственно после установки элайнеров. Для пациентов второй группы стресс примерно одинаковый, если судить по разбросу рекуррентных показателей в каналах T5, T6. Если данное предположение верно, то при дальнейшем наблюдении за пациентами рекуррентные показатели начнут вести себя схожим образом для всех групп пациентов. Данную особенность, безусловно, нужно учитывать при анализе записей ЭЭГ для корректирования лечения у пациентов с разным типом ортодонтического воздействия.

### Заключение

Целью настоящего исследования было изучение различий рекуррентных показателей, построенных по сигналам ЭЭГ пациентов после ортодонтического воздействия во время выполнения когнитивных тестов. В зависимости от типа воздействия (установка брекетов или элайнеров) необходимо было выделить в каналах маркеры, по которым можно в дальнейшем определить силу стресса от ортодонтического вмешательства для последующей коррекции лечения.

Полученные результаты показали, что оценки статистических закономерностей рекуррентных показателей в височных каналах во время прохождения когнитивного теста достаточно, чтобы получить маркеры для оценки состояния пациентов. В некотором роде полученные результаты коррелируют с работой [25], где, однако, сходные результаты были продемонстрированы с применением существенно более сложных методов, включая анализ отдельных частотных диапазонов с помощью вейвлетного преобразования. Нормировка на первый эксперимент (до установки ортодонтического аппарата) позволяет хорошо различить воздействия разного типа по оценке стресса на установку аппарата и его ношение.

Для использования обоих полученных результатов для создания эффективных маркеров оценки степени стресса при ношении ортодонтического аппарата с целью коррекции лечения необходимо увеличить как число пациентов в выборке, так и время наблюдения за пациентами. Однако в данной статье убедительно показано, что создание подобных маркеров на базе выделения и анализа рекуррентного показателя при прохождении серий когнитивных тестов возможно и представляет большой интерес для исследователей в области ортодонтии и нейронаук.

### Список литературы

1. Bulut O. C., Wallner F., Oladokun D., Kayser C., Plath M., Schulz E., Plinkert P. K., Baumann I. Long-term quality of life changes after primary septorhinoplasty // *Qual Life Res.* 2018. Vol. 27, no. 4. P. 987–991. DOI: 10.1007/s11136-017-1761-8.
2. de Araujo C. M., Schroder A. G. D., de Araujo B. M. M., Cavalcante-Leao B. L., Stechman-Neto J., Zeigelboim B. S., Santos R. S., Guariza-Filho O. Impact of orthodontic-surgical treatment on quality of life: a meta-analysis // *European Journal of Orthodontics.* 2020. Vol. 42, no. 3. P. 281–289. DOI: 10.1093/ejo/cjz093.
3. Parkin N. A., Almutairi S., Benson P. E. Surgical exposure and orthodontic alignment of palatally displaced canines: can we shorten treatment time? // *Journal of Orthodontics.* 2019. Vol. 46. P. 54–59. DOI: 10.1177/1465312519841384.
4. Zimmo N., Saleh M. H., Mandelaris G. A., Chan H. L., Wang H. L. Corticotomy-Accelerated Orthodontics: A Comprehensive Review and Update // *Compend. Contin. Educ. Dent.* 2017. Vol. 38, no. 1. P. 17–25.

5. *Dab S., Chen K., Flores Mir C.* Short- and long-term potential effects of accelerated osteogenic orthodontic treatment: A systematic review and meta-analysis // *Journal of Orthodontics*. 2019. Vol. 22, no. 2. P. 61–68. DOI: 10.1111/ocr.12272.
6. *Zhuravlev M., Novikov M., Parsamyan R., Selskii A., Runnova A.* The objective assessment of event-related potentials: An influence of chronic pain on ERP parameters // *Neurosci Bull*. 2023. Vol. 39, no. 7. P. 1105–1116. DOI: 10.1007/s12264-023-01035-8.
7. *Makarov V. V., Zhuravlev M. O., Runnova A. E., Protasov P., Maksimenko V. A., Frolov N. S., Pisarchik A. N., Hramov A. E.* Betweenness centrality in multiplex brain network during mental task evaluation // *Phys. Rev. E*. 2018. Vol. 98. P. 062413. DOI: 10.1103/PhysRevE.98.062413.
8. *Maksimenko V. A., Runnova A. E., Zhuravlev M. O., Protasov P., Kulandin R., Khramova M. V., Pisarchik A. N., Hramov A. E.* Human personality reflects spatio-temporal and time-frequency EEG structure // *PloS One*. 2018. Vol. 13, no. 9. P. e0197642. DOI: 10.1371/journal.pone.0197642.
9. *Miyamoto I., Yoshida K., Bessho K.* Shortened dental arch and cerebral regional blood volume: an experimental pilot study with optical topography // *Cranio*. 2009. Vol. 27. P. 94–100. DOI: 10.1179/crn.2009.015.
10. *Kordass B., Lucas C., Huetzen D., Zimmermann C., Gedrange T., Langner S., Domin M., Hosten N.* Functional magnetic resonance imaging of brain activity during chewing and occlusion by natural teeth and occlusal splints // *Ann. Anat.* 2007. Vol. 189. P. 371–376. DOI: 10.1016/j.aanat.2007.02.027.
11. *Morokuma M.* Influence of the functional improvement of complete dentures on brain activity // *Nihon Hotetsu Shika Gakkai Zasshi*. 2008. Vol. 52. P. 194–199. DOI: 10.2186/jjps.52.194.
12. *Ono Y., Yamamoto T., Kubo K. Y., Onozuka M.* Occlusion and brain function: mastication as a prevention of cognitive dysfunction // *J. Oral. Rehabil.* 2010. Vol. 37, no. 8. P. 624–640. DOI: 10.1111/j.1365-2842.2010.02079.x.
13. *Zanetti M., Faes L., Nollo G., De Cecco M., Pernice R., Maule L., Pertile M., Fornaser A.* Information Dynamics of the Brain, Cardiovascular and Respiratory Network during Different Levels of Mental Stress // *Entropy*. 2019. Vol. 21, no. 3. P. 275. DOI: 10.3390/e21030275.
14. *Pollatos O., Schandry R., Auer D. P., Kaufmann C.* Brain structures mediating cardiovascular arousal and interoceptive awareness // *Brain Research*. 2007. Vol. 1141. P. 178–187. DOI: 10.1016/j.brainres.2007.01.026.
15. *Yang Y. X., Gao Z. K., Wang X. M., Li Y. L., Han J. W., Marwan N., Kurths J.* A recurrence quantification analysis-based channel-frequency convolutional neural network for emotion recognition from EEG // *Chaos*. 2018. Vol. 28, no. 8. P. 085724. DOI: 10.1063/1.5023857.
16. *Chou E. F., Khine M., Lockhart T., Soangra R.* Effects of ECG data length on heart rate variability among young healthy adults // *Sensors*. 2021. Vol. 21, no. 18. P. 6286. DOI: 10.3390/s21186286.
17. *Terrill P. I., Wilson S. J., Suresh S., Cooper D. M., Dakin C.* Characterising non-linear dynamics in nocturnal breathing patterns of healthy infants using recurrence quantification analysis // *Computers in biology and medicine*. 2013. Vol. 43, no. 4. P. 231–239. DOI: 10.1016/j.combiomed.2013.01.005.
18. *Parro V. C., Valdo L.* Sleep-wake detection using recurrence quantification analysis // *Chaos*. 2018. Vol. 28, no. 8. P. 085706. DOI: 10.1063/1.5024692.
19. *Jenkins B. N., Hunter J. F., Richardson M. J., Conner T. S., Pressman S. D.* Affect variability and predictability: Using recurrence quantification analysis to better understand how the dynamics of affect relate to health // *Emotion*. 2020. Vol. 20, no. 3. P. 391–402. DOI: 10.1037/emo0000556.
20. *Rojas G. M., Alvarez C., Montoya C. E., de la Iglesia-Vayá M., Cisternas J. E., Gálvez M.* Study of resting-state functional connectivity networks using EEG electrodes position as seed // *Front. Neurosci.* 2018. Vol. 12. P. 235. DOI: 10.3389/fnins.2018.00235.

21. Acharya U. R., Sree S. V., Swapna G., Martis R. J., Suri J. S. Automated EEG analysis of epilepsy: A review // *Knowledge-Based Systems*. 2013. Vol. 45. P. 147–165. DOI: 10.1016/j.knosys.2013.02.014.
22. Acharya U. R., Sree S. V., Chattopadhyay S., Yu W., Ang P. C. Application of recurrence quantification analysis for the automated identification of epileptic EEG signals // *International Journal of Neural Systems*. 2011. Vol. 21, no. 3. P. 199–211. DOI: 10.1142/S0129065711002808.
23. Eckmann J.-P., Kamphorst S. O., Ruelle D. Recurrence plots of dynamical systems // *Europhysics Letters*. 1987. Vol. 4, no. 9. P. 973–977. DOI: 10.1209/0295-5075/4/9/004.
24. Marwan N., Romano M. C., Thiel M., Kurths J. Recurrence plots for the analysis of complex systems // *Physics Reports*. 2007. Vol. 438, iss. 5–6. P. 237–329. DOI: 10.1016/j.physrep.2006.11.001.
25. Zhuravlev M., Suetenkova D., Parsamyan R., Runnova A., Simonyan M., Nasrullaev R., Kiselev A., Suetenkov D. Changes in EEG oscillatory patterns due to acute stress caused by orthodontic correction // *Eur. Phys. J. Spec. Top.* 2024. Vol. 233. P. 505–518. DOI: 10.1140/epjs/s11734-023-01064-4.

## References

1. Bulut OC, Wallner F, Oladokun D, Kayser C, Plath M, Schulz E, Plinkert PK, Baumann I. Long-term quality of life changes after primary septorhinoplasty. *Qual Life Res*. 2018;27(4):987–991. DOI: 10.1007/s11136-017-1761-8.
2. de Araujo CM, Schroder AGD, de Araujo BMM, Cavalcante-Leao BL, Stechman-Neto J, Zeigelboim BS, Santos RS, Guariza-Filho O. Impact of orthodontic-surgical treatment on quality of life: a meta-analysis. *European Journal of Orthodontics*. 2020;42(3):281–289. DOI: 10.1093/ejo/cjz093.
3. Parkin NA, Almutairi S, Benson PE. Surgical exposure and orthodontic alignment of palatally displaced canines: can we shorten treatment time? *Journal of Orthodontics*. 2019;46:54–59. DOI: 10.1177/1465312519841384.
4. Zimmo N, Saleh MH, Mandelaris GA, Chan HL, Wang HL. Corticotomy-Accelerated Orthodontics: A Comprehensive Review and Update. *Compend. Contin. Educ. Dent*. 2017;38(1):17–25.
5. Dab S, Chen K, Flores Mir C. Short- and long-term potential effects of accelerated osteogenic orthodontic treatment: A systematic review and meta-analysis. *Journal of Orthodontics*. 2019;22(2): 61–68. DOI: 10.1111/ocr.12272.
6. Zhuravlev M, Novikov M, Parsamyan R, Selskii A, Runnova A. The objective assessment of event-related potentials: An influence of chronic pain on ERP parameters. *Neurosci. Bull*. 2023;39(7):1105–1116. DOI: 10.1007/s12264-023-01035-8.
7. Makarov VV, Zhuravlev MO, Runnova AE, Protasov P, Maksimenko VA, Frolov NS, Pisarchik AN, Hramov AE. Betweenness centrality in multiplex brain network during mental task evaluation. *Phys. Rev. E*. 2018;98:062413. DOI: 10.1103/PhysRevE.98.062413.
8. Maksimenko VA, Runnova AE, Zhuravlev MO, Protasov P, Kulanin R, Khramova MV, Pisarchik AN, Hramov AE. Human personality reflects spatio-temporal and time-frequency EEG structure. *PloS One*. 2018;13(9):e0197642. DOI: 10.1371/journal.pone.0197642.
9. Miyamoto I, Yoshida K, Bessho K. Shortened dental arch and cerebral regional blood volume: an experimental pilot study with optical topography. *Cranio*. 2009;27:94–100. DOI: 10.1179/crn.2009.015.
10. Kordass B, Lucas C, Huetzen D, Zimmermann C, Gedrange T, Langner S, Domin M, Hosten N. Functional magnetic resonance imaging of brain activity during chewing and occlusion by natural teeth and occlusal splints. *Ann. Anat*. 2007;189:371–376. DOI: 10.1016/j.aanat.2007.02.027.
11. Morokuma M. Influence of the functional improvement of complete dentures on brain activity. *Nihon Hotetsu Shika Gakkai Zasshi*. 2008;52:194–199. DOI: 10.2186/jjps.52.194.

12. Ono Y, Yamamoto T, Kubo KY, Onozuka M. Occlusion and brain function: mastication as a prevention of cognitive dysfunction. *J. Oral Rehabil.* 2010;37(8):624–640. DOI: 10.1111/j.1365-2842.2010.02079.x.
13. Zanetti M, Faes L, Nollo G, De Cecco M, Pernice R, Maule L, Pertile M, Fornaser A. Information Dynamics of the Brain, Cardiovascular and Respiratory Network during Different Levels of Mental Stress. *Entropy.* 2019;21(3):275. DOI: 10.3390/e21030275.
14. Pollatos O, Schandry R, Auer DP, Kaufmann C. Brain structures mediating cardiovascular arousal and interoceptive awareness. *Brain Research.* 2007;1141:178–187. DOI: 10.1016/j.brainres.2007.01.026.
15. Yang YX, Gao ZK, Wang XM, Li YL, Han JW, Marwan N, Kurths J. A recurrence quantification analysis-based channel-frequency convolutional neural network for emotion recognition from EEG. *Chaos.* 2018;28(8):085724. DOI: 10.1063/1.5023857.
16. Chou EF, Khine M, Lockhart T, Soangra R. Effects of ECG Data Length on Heart Rate Variability among Young Healthy Adults. *Sensors.* 2021;21(18):6286. DOI: 10.3390/s21186286.
17. Terrill PI, Wilson SJ, Suresh S, Cooper DM, Dakin C. Characterising non-linear dynamics in nocturnal breathing patterns of healthy infants using recurrence quantification analysis. *Computers in Biology and Medicine.* 2013;43(4):231–239. DOI: 10.1016/j.compbimed.2013.01.005.
18. Parro VC, Valdo L. Sleep-wake detection using recurrence quantification analysis. *Chaos.* 2018;28(8):085706. DOI: 10.1063/1.5024692.
19. Jenkins BN, Hunter JF, Richardson MJ, Conner TS, Pressman SD. Affect variability and predictability: Using recurrence quantification analysis to better understand how the dynamics of affect relate to health. *Emotion.* 2020;20(3):391–402. DOI: 10.1037/emo0000556.
20. Rojas GM, Alvarez C, Montoya CE, de la Iglesia-Vayá M, Cisternas JE, Gálvez M. Study of Resting-State Functional Connectivity Networks Using EEG Electrodes Position As Seed. *Front. Neurosci.* 2018;12:235. DOI: 10.3389/fnins.2018.00235.
21. Acharya UR, Sree SV, Swapna G, Martis RJ, Suri JS. Automated EEG analysis of epilepsy: A review. *Knowledge-Based Systems.* 2013;45:147–165. DOI: 10.1016/j.knosys.2013.02.014.
22. Acharya UR, Sree SV, Chattopadhyay S, Yu W, Ang PC. Application of recurrence quantification analysis for the automated identification of epileptic EEG signals. *International Journal of Neural Systems.* 2011;21(3):199–211. DOI: 10.1142/S0129065711002808.
23. Eckmann J-P, Kamphorst SO, Ruelle D. Recurrence Plots of Dynamical Systems. *Europhysics Letters.* 1987;4(9):973–977. DOI: 10.1209/0295-5075/4/9/004.
24. Marwan N, Romano MC, Thiel M, Kurths J. Recurrence plots for the analysis of complex systems. *Physics Reports.* 2007;438(5–6):237–329. DOI: 10.1016/j.physrep.2006.11.001.
25. Zhuravlev M, Suetenkova D, Parsamyan R, Runnova A, Simonyan M, Nasrullaev R, Kiselev A, Suetenkov D. Changes in EEG oscillatory patterns due to acute stress caused by orthodontic correction. *Eur. Phys. J. Spec. Top.* 2024;233:505–518. DOI: 10.1140/epjs/s11734-023-01064-4.



*Сельский Антон Олегович* — окончил факультет нелинейных процессов СГУ (2011). Кандидат физико-математических наук (2014). Доцент кафедры физики открытых систем СГУ (с 2017). Область научных интересов — междисциплинарное направление нейронауки, включающее в себя анализ сложных сигналов различной биомедицинской природы и разработку новых методов и подходов к анализу таких сигналов.

Россия, Саратов, ул. Астраханская, 83  
 Саратовский национальный исследовательский  
 государственный университет имени Н.Г. Чернышевского  
 E-mail: selskii@yandex.ru  
 ORCID: 0000-0003-3175-895X  
 AuthorID (eLibrary.Ru): 643422

*Сельский А. О., Емельянова Е. П., Дрождева Е. Е.*  
 Известия вузов. ПНД, 2025, т. 33, № 3



*Емельянова Елизавета Петровна* — окончила СГУ (2022) по направлению «Прикладные математика и физика». Область научных интересов — междисциплинарное направление нейронауки, включающее в себя анализ сложных нелинейных сигналов различной биомедицинской природы и разработку новых методов и подходов к анализу таких сигналов.

Россия, Саратов, ул. Астраханская, 83  
Саратовский национальный исследовательский  
государственный университет имени Н. Г. Чернышевского  
E-mail: meretari@ya.ru  
ORCID: 0000-0001-5535-8921  
AuthorID (eLibrary.Ru): 1153331



*Дрождева Евгения Евгеньевна* — окончила Саратовский областной базовый медицинский колледж по специальности «Медицинская сестра» (2020). В настоящее время обучается в СГМУ им. В. И. Разумовского по специальности «Педиатрия». Работает в СГУ им. Н. Г. Чернышевского в должности лаборанта-исследователя. Область научных интересов — междисциплинарное направление нейронауки, включающее в себя анализ сложных сигналов различной биомедицинской природы и разработка новых методов и подходов к анализу таких сигналов.

Россия, Саратов, ул. Астраханская, 83  
Саратовский национальный исследовательский  
государственный университет имени Н. Г. Чернышевского  
E-mail: drozhdeva.e@bk.ru  
ORCID: 0009-0008-5361-378X  
AuthorID (eLibrary.Ru): 1258683