

01;14

## Исследование изменения характеристик физиологических сигналов после ортодонтической коррекции

© А.О. Сельский<sup>1</sup>, Е.Е. Дрождева<sup>1,2</sup>, Р.К. Насруллаев<sup>1,2</sup>, Д.Е. Суетенков<sup>3</sup>, Е.П. Емельянова<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского, Саратов, Россия

<sup>2</sup> Саратовский государственный медицинский университет им. В.И. Разумовского, Саратов, Россия

<sup>3</sup> Российский государственный социальный университет, Москва, Россия

E-mail: selskii@o@gmail.com

Поступило в Редакцию 16 января 2024 г.

В окончательной редакции 7 февраля 2024 г.

Принято к публикации 11 марта 2024 г.

Рассматривается влияние ортодонтической коррекции на характеристики сигнала ЭЭГ, полученного во время прохождения когнитивного теста. Такой подход позволяет найти отличия для различных групп пациентов (с разным типом ортодонтического лечения) после коррекции и поможет в будущем отслеживать состояние пациентов для изменения лечения. В ходе работы показано, что характеристики ЭЭГ для одних типов лечения различаются наиболее сильно сразу после коррекции, а для других — спустя длительное время после него.

**Ключевые слова:** электроэнцефалография, рекуррентный анализ, живые системы, инклюзия.

DOI: 10.61011/PJTF.2024.12.58062.19864

В настоящий момент все чаще становятся явными проблемы инклюзии при длительных видах лечения [1]. Одним из таких видов является ортодонтическая коррекция с помощью брекет-систем или элайнеров [2]. Установка и ношение таких систем могут вызывать длительный дискомфорт, приводя к проблемам самого разного характера. Ранее в некоторых исследованиях было показано, что боль и стресс приводят к снижению когнитивных функций [3]. Поэтому в настоящей работе предлагается рассмотреть характеристики сигнала ЭЭГ при выполнении когнитивного теста.

Рекуррентный анализ, применяемый в данном исследовании для изучения записей ЭЭГ, представляется хорошим методом для работы со сложными сигналами, так как сам метод прост в реализации и не требует большого числа сложных вычислений [4] в отличие от многих более традиционных методов частотного анализа сигналов. Помимо этого рекуррентный анализ может быть применен без внесения серьезных изменений в метод к любому из типов физиологических данных [5–7]. Это может быть полезно при дальнейшем изучении влияния ортодонтического лечения на другие биологические сигналы. Также важным фактором для применения рекуррентного анализа к обработке физиологических записей является устойчивость рекуррентных показателей в статистическом смысле [8], что позволяет работать даже с малыми статистическими выборками.

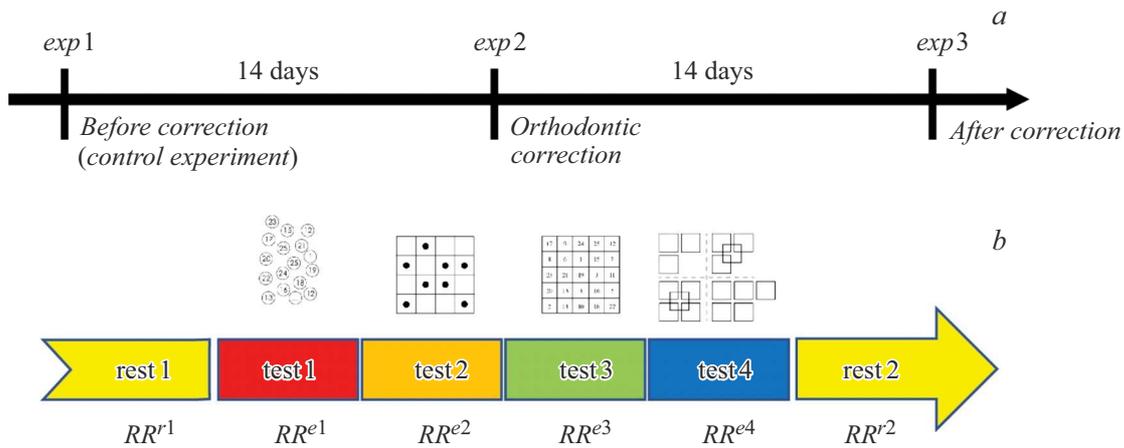
В настоящей работе для всестороннего исследования влияния ортодонтического лечения на состояние пациента была предложена следующая схема проведения экспериментальных записей: первая запись осуществлялась за две недели до ортодонтической коррекции с установкой брекет-систем или элайнеров. Второй экспе-

римент проводился сразу после коррекции. Третий раз пациент участвовал в эксперименте через две недели после ортодонтической коррекции.

Сам эксперимент представляет собой последовательность из четырех когнитивных тестов (рис. 1). В первом тесте необходимо нажимать в порядке убывания на кружки от числа 25 к числу 1. При правильной нажатии кружки исчезают, что упрощает задачу по ходу прохождения теста. Второй тест представляет собой задачу 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 Шульце. Этот тест похож на первый, однако для таблиц Шульце сложность теста не меняется в процессе его прохождения [9,10]. Четвертый тест представляет собой задание на счет. Пациенту демонстрируют различное число пересекающихся квадратов, а он должен посчитать четным было их число или нечетным.

Регистрация электрической активности головного мозга проводилась по стандартной схеме 10-20 [11]. В начале и конце записи испытуемого просили пять минут провести с закрытыми глазами в состоянии покоя.

Как указывалось ранее, для обработки данных ЭЭГ в работе использовался рекуррентный анализ. Данный метод нашел применение в широком диапазоне задач обработки сложных сигналов различной природы [12]. Сам алгоритм расчета отличается простотой [13], 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  $i = 1, \dots, n$ . Для него можно построить



**Рис. 1.** Схемы экспериментальных сессий (a) и схема каждого эксперимента (b).  $RR^k$  — рекуррентные показатели соответствующих временных интервалов.

рекуррентную матрицу по следующему правилу:

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

где  $R_{ij}$  — элемент рекуррентной матрицы для сигнала  $x(t)$ ;  $t_i$  и  $t_j$  — моменты времени  $t$ ;  $\varepsilon$  — эмпирически определенное пороговое значение, обеспечивающее необходимую точность метода,  $\theta(\dots)$  — функция Хевисайда, которая принимает нулевое значение для отрицательных аргументов и единичное при неотрицательных:

$$\theta(z) = \begin{cases} 0, & z < 0, \\ 1, & z \geq 0. \end{cases} \quad (2)$$

Таким образом, рекуррентная матрица, построенная согласно выражениям (1) и (2), образуется из элементов двух типов: „0“ и „1“. Элемент матрицы равен „1“, если значение сигнала  $x(t_i)$  в момент времени  $t_i$  попадает в  $\varepsilon$ -окрестность значения сигнала  $x(t_j)$  в момент времени  $t_j$ . В то же время элемент матрицы равен „0“, если значения сигнала  $x$  в моменты времени  $t_i$  и  $t_j$  далеки друг от друга. Данные рекуррентные матрицы (1) часто демонстрируют графическим образом в виде рекуррентных диаграмм, на которых точки соответствуют единичным значениям, а пустые пиксели — нулевым значениям матрицы. Таким образом, рекуррентные свойства временного ряда  $x(t_i)$  представляются в виде геометрических структур и позволяют визуализировать динамику ряда в виде простой графической свертки.

Рекуррентный анализ включает в себя методы исследования расположения точек на построенной поверхности рекуррентной диаграммы, которые применялись в последние годы для обработки стохастических временных рядов различной природы. Отметим, что в случае одночастотной периодической динамики на рекуррентной диаграмме можно наблюдать подобие решетки, период которой будет соответствовать периоду колебаний системы. Чем большее число повторов имеет то или иное значение, тем больше соответствующих

элементов рекуррентной матрицы равны „1“. Отсюда легко сделать вывод, что чем выше частота колебаний, тем больше точек мы получаем на рекуррентной диаграмме при прочих фиксированных параметрах. Данный факт позволяет легко выявить в сигнале наиболее часто встречающиеся значения.

В ходе эксперимента, как показано на рис. 1, два раза снималось состояние покоя и по разу каждый когнитивный тест, которых было четыре. Таким образом, были записаны шесть естественных временных интервалов, на которых можно оценить рекуррентный показатель. Исходя из этого формула рекуррентного показателя для каждого временного интервала  $k$  принимает следующий вид:

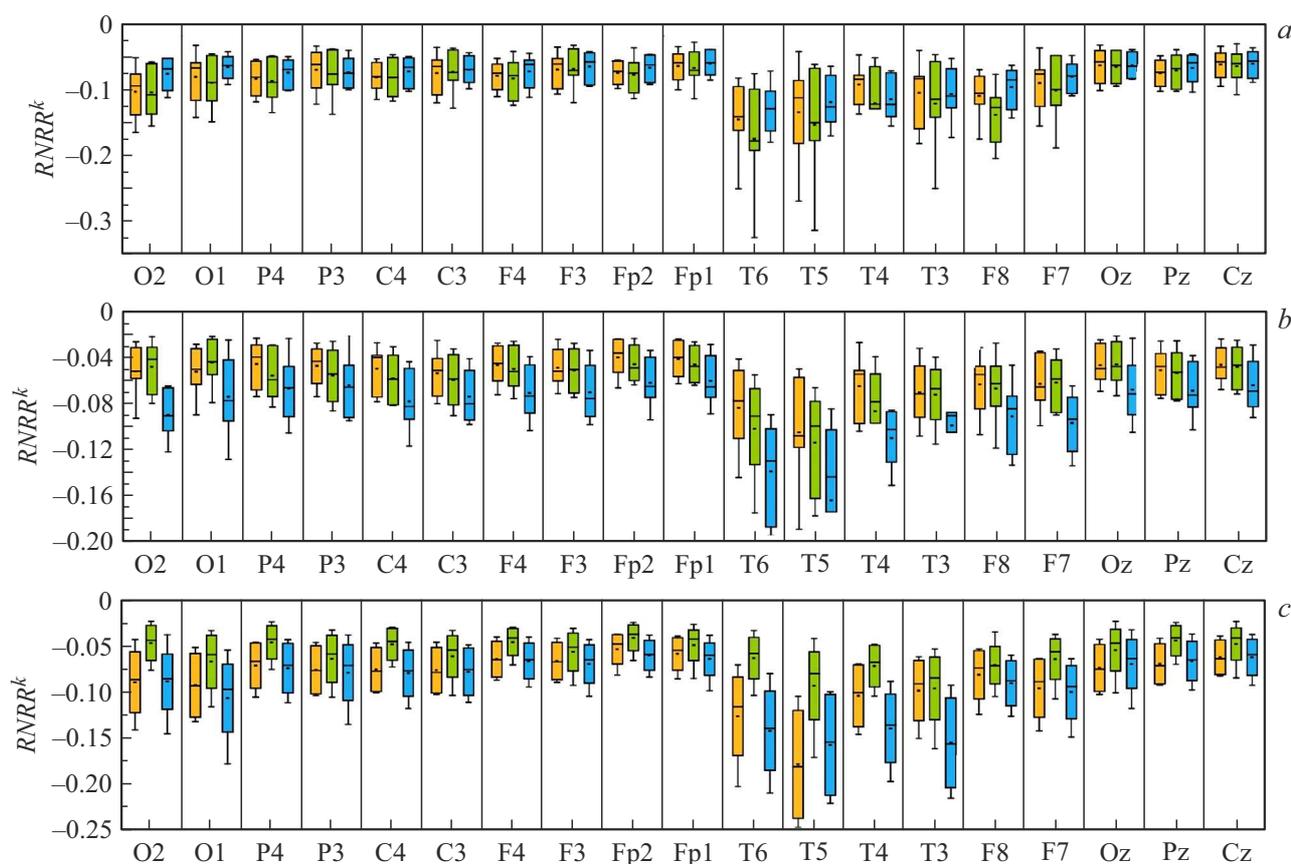
$$RR^k = \frac{1}{(t_k^f - t_k^s)^2} \sum_{i=t_k^s}^{t_k^f} \sum_{j=t_k^s}^{t_k^f} R_{ij}. \quad (3)$$

Для каждой записи каждого пациента в зависимости от продолжительности эксперимента была выбрана своя длина окна. Она не совпадает для разных пациентов и может различаться от теста к тесту, однако этот недостаток нивелируется нормировкой на длину ряда при расчете рекуррентного показателя. Это позволяет оценить то, как рекуррентный показатель изменялся с течением времени и какие значения соответствуют различным когнитивным тестам или периодам покоя.

Поскольку в состоянии покоя человек максимально расслаблен, что соответствует в большей степени естественному состоянию пациента, имеет смысл нормировать рекуррентные показатели для когнитивных тестов на значение рекуррентного показателя в состоянии покоя. Таким образом, окончательная формула расчета нормированных рекуррентных показателей примет вид

$$RNRR^k = RR^{ek} - \frac{RR^{r1} + RR^{r2}}{2}. \quad (4)$$

На рис. 2 построены показатели  $RNRR^k$  для всех 19 каналов ЭЭГ (для каждого канала показатель рассчиты-



**Рис. 2.** Характеристики распределения рекуррентных показателей пациентов в первом (*a*), втором (*b*) и третьем (*c*) экспериментах в зависимости от канала ЭЭГ и группы пациентов. Данные для первой группы (брекет-системы) показаны оранжевым цветом слева, для второй группы (элайнеры на четыре зуба) — зеленым цветом по центру, для третьей группы (элайнеры на три зуба) — синим цветом справа. Цветной вариант рисунка представлен в электронной версии статьи.

вается отдельно) для трех групп испытуемых: 1) те, кому устанавливали брекет-систему; 2) те, кому устанавливали элайнеры на четыре зуба; 3) те, кому устанавливали элайнеры на три зуба. Разные группы помечены цветами и различаются расположением. Рис. 2, *a* соответствует первому эксперименту (до коррекции), рис. 2, *b* — второму (сразу после коррекции), рис. 2, *c* — третьему эксперименту (спустя две недели после ортодонтической коррекции).

Группы пациентов набирались из добровольцев без неврологических нарушений и признаков снижения когнитивных функций. Критерии исключения были следующими: возраст до 18 и старше 25 лет, значение HADS  $\geq 10$ , значение индекса массы тела  $\geq 25$ , хронические боли в течение более шести месяцев, в анамнезе серьезные неврологические расстройства, психические расстройства. Из-за редкости пациентов с ортодонтическими коррекциями группы 1 и 2 включали по три пациента (средний возраст 20.7 и 21.1 соответственно), а группа 3 только два пациента (средний возраст 20.3). Суммарно группы включали трех женщин и пять мужчин.

Из рис. 2 видно, что рекуррентные показатели тестов в среднем ниже рекуррентных показателей стадии покоя. Особенно сильно наблюдаются различия в височных долях — каналы T3, T4, T5, T6. Для первого эксперимента, когда когнитивные тесты проводятся до коррекции, различий между группами почти не наблюдается. Сразу после коррекции (рис. 2, *b*) заметна следующая тенденция: для пациентов с элайнерами рекуррентный показатель снижается относительно состояния покоя заметнее, чем для пациентов с установленными брекет-системами.

После двух недель наиболее близким к состоянию покоя оказывается рекуррентный показатель когнитивных тестов для второй группы пациентов (установка элайнеров на четыре зуба). Рекуррентные показатели пациентов с элайнерами на три зуба и брекет-системами при этом демонстрируют схожее поведение.

Таким образом, на основе анализа рекуррентных показателей записей ЭЭГ во время прохождения когнитивных тестов после ортодонтических коррекций выявлены заметные различия между группами пациентов. В некотором роде полученные результаты коррелируют с работой [14], где, однако, сходные результаты были

продемонстрированы с применением существенно более сложных методов, включая анализ отдельных частотных диапазонов с помощью вейвлетного преобразования. В настоящей работе показано, что наибольшие различия между пациентами с элайнерами на три зуба и брекет-системами проявляются сразу после ортодонтического вмешательства. А разница между пациентами с элайнерами на четыре зуба и брекет-системами заметнее спустя две недели после вмешательства. В дальнейшем для более точной оценки влияния коррекции на когнитивные функции планируется использовать оценки болевых ощущений и стресса, включая уровень стресс-индуцированного бруксизма. Такой анализ позволит оценить уровень стресса, испытываемого пациентом спустя длительное время после ортодонтической коррекции, и при необходимости изменить лечение.

### Финансирование работы

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 23-72-01021).

### Соблюдение этических стандартов

Все процедуры, выполненные в исследовании с участием людей, соответствуют этическим стандартам институционального и/или национального комитета по исследовательской этике и Хельсинкской декларации 1964 г. и ее последующим изменениям или сопоставимым нормам этики. Все клинические данные и дизайн клинического исследования были одобрены комитетом по этике исследований Саратовского государственного университета им. Н.Г. Чернышевского. Все испытуемые добровольно участвовали в эксперименте на бесплатной основе, 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.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### Список литературы

- [1] O.C. Bulut, F. Wallner, D. Oladokun, C. Kayser, M. Plath, E. Schulz, P.K. Plinkert, I. Baumann, *Qual. Life Res.*, **27** (4), 987 (2018). DOI: 10.1007/s11136-017-1761-8
- [2] C.M. de Araujo, A.G.D. Schroder, B.M.M. de Araujo, B.L. Cavalcante-Leão, J. Stechman-Neto, B.S. Zeigelboim, R.S. Santos, O. Guariza-Filho, *Eur. J. Orthodont.*, **42** (3), 281 (2020). DOI: 10.1093/ejo/cjz093
- [3] M. Zhuravlev, M. Novikov, R. Parsamyan, A. Selskii, A. Runnova, *Neurosci. Bull.*, **39** (7), 1105 (2023). DOI: 10.1007/s12264-023-01035-8
- [4] V.C. Parro, L. Valdo, *Chaos*, **28** (8), 085706 (2018). DOI: 10.1063/1.5024692
- [5] Y.X. Yang, Z.K. Gao, X.M. Wang, Y.L. Li, J.W. Han, N. Marwan, J. Kurths, *Chaos*, **28** (8), 085724 (2018). DOI: 10.1063/1.5023857
- [6] E.E. Chou, M. Khine, T. Lockhart, R. Soangra, *Sensors*, **21** (18), 6286 (2021). DOI: 10.3390/s21186286
- [7] P.I. Terrill, S.J. Wilson, S. Suresh, D.M. Cooper, C. Dakin, *Comput. Biol. Med.*, **43** (4), 231 (2013). DOI: 10.1016/j.combiomed.2013.01.005
- [8] B.N. Jenkins, J.F. Hunter, M.J. Richardson, T.S. Conner, S.D. Pressman, *Emotion*, **20** (3), 391 (2020). DOI: 10.1037/emo0000556
- [9] V.V. Makarov, M.O. Zhuravlev, A.E. Runnova, P. Protasov, V.A. Maksimenko, N.S. Frolov, A.N. Pisarchik, A.E. Hramov, *Phys. Rev. E*, **98** (6), 062413 (2018). DOI: 10.1103/PhysRevE.98.062413
- [10] V.A. Maksimenko, A.E. Runnova, M.O. Zhuravlev, P. Protasov, R. Kulanin, M.V. Khramova, A.N. Pisarchik, A.E. Hramov, *PloS one*, **13** (9), e0197642 (2018). DOI: 10.1371/journal.pone.0197642
- [11] G.M. Rojas, C. Alvarez, C.E. Montoya, M. de la Iglesia-Vayá, J.E. Cisternas, M. Gálvez, *Front. Neurosci.*, **12**, 235 (2018). DOI: 10.3389/fnins.2018.00235
- [12] U.R. Acharya, S.V. Sree, S. Chattopadhyay, W. Yu, P.C. Ang, *Int. J. Neural Syst.*, **21** (3), 199 (2011). DOI: 10.1142/S0129065711002808
- [13] J.-P. Eckmann, S.O. Kamphorst, D. Ruelle, *Europhys. Lett.*, **4** (9), 973 (1987). DOI: 10.1209/0295-5075/4/9/004.
- [14] M. Zhuravlev, D. Suetenkova, R. Parsamyan, A. Runnova, M. Simonyan, R. Nasrullaev, A. Kiselev, D. Suetenkov, *Eur. Phys. J. Spec. Top.* (2023). DOI: 10.1140/epjs/s11734-023-01064-4