

14

Синхронизация физиологических сигналов пациентов после ортодонтической коррекции

© А.О. Сельский¹, Е.Е. Дрождева^{1,2}, Е.П. Емельянова^{1,2}, Д.Е. Суетенков³

¹ Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского, Саратов, Россия

² Саратовский государственный медицинский университет им. В.И. Разумовского, Саратов, Россия

³ Российский государственный социальный университет, Москва, Россия

E-mail: selskii@yandex.ru

Поступило в Редакцию 27 декабря 2024 г.

В окончательной редакции 21 февраля 2025 г.

Принято к публикации 24 февраля 2025 г.

Рассматривается изменение синхронизации физиологических сигналов, таких как данные ЭКГ, ФПГ, ритм дыхания, после проведения ортодонтической коррекции. Синхронизация сигналов определялась с помощью расчета кросс-рекуррентных и совместных рекуррентных показателей. Оценивались записи, полученные до ортодонтической коррекции, сразу после, спустя две недели после коррекции. Показано, что оба параметра синхронизации (кросс-рекуррентный и совместный рекуррентный показатели) уменьшаются после проведения ортодонтической коррекции. Кроме того, для совместного рекуррентного показателя после ортодонтической коррекции несколько меняются статистические закономерности.

Ключевые слова: физиологические сигналы, рекуррентный анализ, живые системы, инклюзия.

DOI: 10.61011/PJTF.2025.11.60480.20241

Одной из актуальных задач современной практической медицины является решение проблем инклюзии при длительных видах лечения [1]. Если лечение приносит болезненные ощущения или стресс либо связано с длительным постельным режимом, состояние пациента может напрямую влиять на качество такого лечения. Одним из примеров длительного лечения, когда могут возникнуть проблемы такого рода, является ортодонтическая коррекция с помощью брекет-систем или элайнеров [2]. Данный вид лечения в практической стоматологии требует разработки неких объективных методов, позволяющих оценить болезненные ощущения и стрессовое воздействие на пациента при ортодонтической коррекции, для оптимальной и персонализированной траектории лечения. Одним из перспективных направлений для создания такой методики может стать оценка динамики связанности системы кровообращения и дыхания в ходе лечения, так как длительное ортодонтическое воздействие может существенно влиять на степень синхронизации между физиологическими сигналами, которые данные системы порождают [3].

С целью исследования вопроса особенностей синхронизации системы кровообращения и дыхания в ходе ортодонтического воздействия в рамках настоящей работы была проведена серия экспериментов по одновременной регистрации физиологических сигналов: электрокардиограммы (ЭКГ/ECG), фотоплетизмограммы (ФПГ/PPG) и ритма дыхания (РД/RR). При этом запись физиологических сигналов у пациентов выполнялась трижды во время прохождения когнитивных тестов: до ортодонтической коррекции, на следующий день после проведения операции по установке ортодонтического аппарата, че-

рез две недели после коррекции. Всего в эксперименте участвовало восемь пациентов, у которых выполнялась ортодонтическая коррекция: возраст от 19 до 39 лет, средний возраст 25.1 лет, гендерное соотношение 5/3. Для исключения возможности появления статистических аномалий в группе пациентов с ортодонтической коррекцией была набрана контрольная группа из восьми человек без фиксированных проблем со здоровьем, для которых однократно выполнялась аналогичная регистрация физиологических сигналов во время когнитивного тестирования: возраст от 22 до 31 года, средний возраст 24.7 лет, гендерное соотношение 4/4. Критерии исключения участия в проводимых исследованиях: возраст младше 15 или старше 45 лет; выявленные челюстно-лицевые аномалии, требующие дополнительного хирургического лечения; необходимость предварительного удаления зубов до ортодонтического лечения; депрессия (шкала Бека (BDI-II ≤ 8)); тяжелые когнитивные нарушения (результат по шкале Mini-Mental State Examination < 24 баллов); сопутствующие заболевания (хроническая обструктивная болезнь легких, злокачественная патология, нарушения функции щитовидной железы и др.); заболевания центральной нервной системы.

Для определения степени синхронизации между физиологическими сигналами применялся рекуррентный анализ — метод, хорошо подходящий для работы со сложными сигналами, так как сам метод прост в реализации и не требует большого числа сложных вычислений [4]. Данный метод может свободно применяться к любому типу физиологических сигналов, что особенно ценно [5], так как в работе сравниваются три разных типа сигналов. Кроме того, рекуррентные показатели

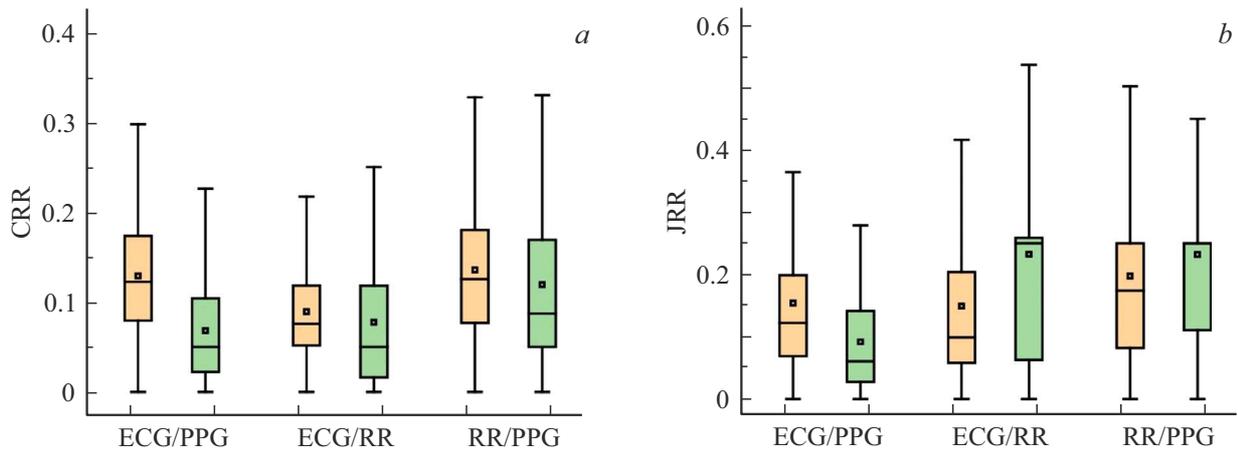


Рис. 1. Разбросы кросс-рекуррентных (а) и совместных рекуррентных (б) показателей для контрольной группы (прямоугольник слева) и пациентов до ортодонтической коррекции (прямоугольник справа) для трех пар каналов. Прямоугольник показывает разброс в выборке от 25 до 75%. Линии показывают остальные значения до минимального и максимального значения. Горизонтальная линия в прямоугольнике — медиана, квадрат — среднее значение.

устойчивы в статистическом смысле [6], что позволяет работать даже с малыми статистическими выборками.

И кросс-рекуррентный, и совместный рекуррентный показатели являются важными метриками рекуррентного анализа, который нашел применение в широком диапазоне задач обработки сложных сигналов различной природы [7]. Сам алгоритм расчета отличается простотой [8], что делает его перспективным для работы с большими данными и обработки сигналов в реальном времени. Далее проиллюстрирован алгоритм расчета данных показателей для сигналов $x(t)$ и $y(t)$, значения которых известны в одни и те же моменты времени t_i , где $i = 1, \dots, n$. Тогда кросс-рекуррентный показатель можно найти по формуле

$$\text{CRR} = \frac{1}{N^2} \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^N \theta(\varepsilon - \|y(t_i) - x(t_j)\|). \quad (1)$$

Формула для нахождения совместного рекуррентного показателя немного отличается

$$\begin{aligned} \text{JRR} = & \frac{1}{N^2} \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^N \theta(\varepsilon - \|x(t_i) - x(t_j)\|) \\ & \times \theta(\varepsilon - \|y(t_i) - y(t_j)\|). \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь $\varepsilon = 0.02$ — эмпирически определенное пороговое значение, обеспечивающее необходимую точность метода. Оно подбирается заранее исходя из плотности заполнения рекуррентных диаграмм рассматриваемых сигналов [9]. В обеих формулах $\theta(\dots)$ — функция Хевисайда.

У кросс-рекуррентных и совместных диаграмм принципиально разный смысл. Так, значение кросс-рекуррентного показателя увеличивается, если в моменты времени t_i и t_j значения двух сигналов оказываются

в одной ε -окрестности. Для роста значения совместного рекуррентного показателя необходимо, чтобы были близки (в пределах ε -окрестности) пары значений сигнала $(x(t_i), x(t_j))$ и $(y(t_i), y(t_j))$. При этом значения сигналов $x(t_i)$ и $y(t_i)$ могут сильно различаться между собой.

В рамках работы были использованы оба показателя, чтобы сравнить динамику физиологических сигналов у пациентов после ортодонтической коррекции. Ожидается, что кросс-рекуррентный показатель будет отражать степень полной синхронизации сигналов, когда их значения с учетом нормировок совпадают. От применения совместного рекуррентного показателя ожидается обнаружение более глубокой связи между сигналами, когда в обоих сигналах происходит одновременно смена динамики.

Для оценки рекуррентных показателей в настоящей работе рассматривался диапазон частот от 0.01 до 1 Hz. Такой выбор был обусловлен тем, что в ряде работ [10,11] показано, что наибольшее влияние на синхронизацию сигналов кардиоваскулярной системы при заболеваниях сердечно-сосудистой системы оказывает диапазон вблизи 0.1 Hz. Однако, так как в настоящей работе кроме ЭКГ и ФПГ рассматривается еще и РД, было решено расширить диапазон, включив в него весь низкочастотный и высокочастотный диапазоны дыхательных волн [12]. Для использования рекуррентного анализа была проведена предварительная статистическая обработка данных по удалению тренда и приведению среднего значения сигнала к нулевому. Кроме того, все сигналы были затем отнормированы на диапазон [-1;1] для корректного применения кросс-рекуррентного анализа.

На рис. 1 показано сравнение разброса рекуррентных показателей для контрольной группы и для пациентов до того, как им провели операцию по установке орто-

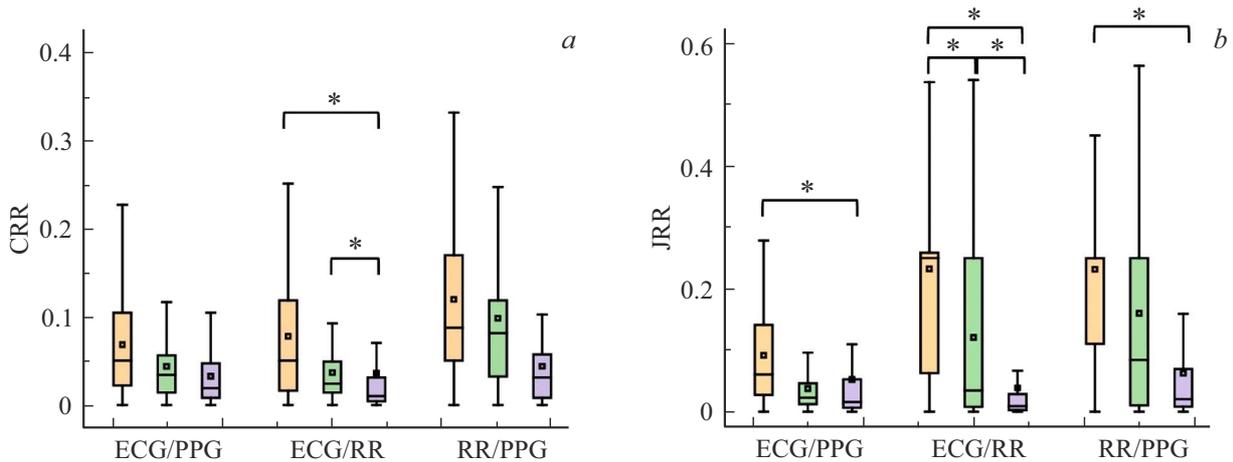


Рис. 2. Разбросы кросс-рекуррентных (а) и совместных рекуррентных (b) показателей для пациентов до ортодонтической коррекции (прямоугольник слева), на следующий день после коррекции (центральный прямоугольник), через две недели после коррекции (прямоугольник справа) для трех пар каналов. Прямоугольник показывает разброс в выборке от 25 до 75%. Линии показывают остальные значения до минимального и максимального значения. Горизонтальная линия в прямоугольнике — медиана, квадрат — среднее значение. Звездочками с полочками показаны пары выборок рекуррентных показателей, которые статистически различаются по *U*-критерию Манна–Уитни, $P < 0.05$.

донтического аппарата. *U*-критерий Манна–Уитни для этих данных не выделил строгого разделения между выборками, $P < 0.05$.

Можно видеть, что в основном показатели почти не различаются для этих двух групп в статистическом смысле. Таким образом, группа пациентов изначально не имела каких-либо статистически значимых отклонений по сравнению с контрольной группой, и последующее сравнение показателей после ортодонтической коррекции является корректным.

Для пациентов из основной группы когнитивный тест проводился три раза. На рис. 2 для кросс-рекуррентных и совместных рекуррентных показателей приведен разброс значений по трем экспериментам для трех пар каналов. Для кросс-рекуррентных показателей видно, что изменяется в основном разброс значений. Положение медианы и среднего относительно друг друга, а также минимального и максимального значений почти не изменяется от эксперимента к эксперименту для всех пар каналов. Зато весьма заметно меняется разница между максимальным и минимальным значениями. Следовательно, степень синхронизации между каналами во втором эксперименте уменьшается по сравнению с таковой при первом прохождении когнитивных тестов, а затем в третьем эксперименте уменьшается еще сильнее.

Для совместных рекуррентных показателей в целом заметна тенденция к тому, что среднее значение приближается к максимальному (относительно медианы). Для третьего эксперимента это становится особенно заметным. В отличие от последовательного уменьшения разброса для кросс-рекуррентных показателей в случае совместных показателей для пары ЭКГ/ФПГ первый эксперимент сильно отличается от второго и третьего.

А для пар ЭКГ/РД и ФПГ/РД третий эксперимент сильно отличается от первого и второго. Использование *U*-критерия Манна–Уитни показало, какие из выборок можно надежно разделить статистически, $P < 0.05$.

Таким образом, на основе анализа кросс-рекуррентных и совместных рекуррентных показателей физиологических сигналов во время прохождения когнитивных тестов после ортодонтических коррекций выявлены заметные различия между состояниями пациентов. Статистические закономерности показателей перед коррекцией не отличаются существенно от аналогичных закономерностей у контрольной группы здоровых людей. Записи когнитивных тестов сразу после ортодонтического вмешательства и через продолжительное время после него при ношении ортодонтического аппарата имеют отличные от первого эксперимента статистические закономерности. Полученные результаты показывают, что при ортодонтическом лечении синхронизация между физиологическими сигналами заметно снижается как при оценке кросс-рекуррентных показателей, так и при оценке совместных рекуррентных показателей. Предполагается, что по анализу рекуррентных показателей в дальнейшем можно будет разработать методологию определения уровня допустимого воздействия для корректировки ортодонтического лечения. Особенно многообещающим в этом отношении выглядит применение совместного рекуррентного анализа или использование обоих методов для сравнения электрокардиограммы и ритма дыхания.

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 по записи физиологических сигналов одобрены Комитетом по этике исследований Саратовского государственного университета им. Н.Г. Чернышевского. Все испытуемые добровольно участвовали в эксперименте на бесплатной основе, подписали информированное добровольное 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, D. Suetenkova, R. Parsamyan, A. Runnova, M. Simonyan, R. Nasrullaev, A. Kiselev, D. Suetenko, *Eur. Phys. J. Spec. Top.*, **233**, 505 (2024). DOI: 10.1140/epjs/s11734-023-01064-4
- [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] B.N. Jenkins, J.F. Hunter, M.J. Richardson, T.S. Conner, S.D. Pressman, *Emotion*, **20** (3), 391 (2020). DOI: 10.1037/emo0000556
- [7] U.R. Acharya, S.V. Sree, S. Chattopadhyay, W. Yu, P.C. Ang, *Int. J. Neural Systems*, **21** (3), 199 (2011). DOI: 10.1142/S0129065711002808
- [8] J.-P. Eckmann, S.O. Kamphorst, D. Ruelle, *Europhys. Lett.*, **4** (9), 973 (1987). DOI: 10.1209/0295-5075/4/9/004
- [9] N. Marwan, M.C. Romano, M. Thiel, J. Kurths, *Phys. Rep.*, **438**, 237 (2007). DOI: 10.1016/j.physrep.2006.11.001
- [10] A.R. Kiselev, V.I. Gridnev, A.S. Karavaev, O.M. Posnenkova, M.D. Prokhorov, V.I. Ponomarenko, B.P. Bezruchko, *Appl. Med. Inform.*, **28** (1), 1 (2011). <https://ami.info.umfeluj.ro/index.php/AMI/article/view/57>
- [11] A.S. Karavaev, M.D. Prokhorov, V.I. Ponomarenko, A.R. Kiselev, V.I. Gridnev, E.I. Ruban, B.P. Bezruchko, *Chaos*, **19** (3), 033112 (2009). DOI: 10.1063/1.3187794
- [12] Р.М. Баевский, Г.Г. Иванов, А.П. Гаврилушкин, П.Я. Довгалевский, Ю.А. Кукушкин, Т.Ф. Миронова, Д.А. Прилуцкий, А.В. Семенов, В.Ф. Федоров, А.Н. Флейшман, М.М. Медведев, Л.В. Чирейкин, *Вестн. аритмологии*, № 24, 65 (2001).