



УДК 616.892

EDN ABRDAE

<https://doi.org/10.33910/2687-1270-2025-6-1-66-74>

О связи сверхмедленных частот электроэнцефалограммы и вариабельности сердечного ритма при сосудистой патологии

О. Е. Дик ^{✉1}

¹ Институт физиологии им. И. П. Павлова РАН, 199034, Россия, г. Санкт-Петербург, наб. Макарова, д. 6

Сведения об авторе

Ольга Евгеньевна Дик, SPIN-код: 5302-5278, Scopus AuthorID: 6602069990, ResearcherID: AAC-8840-2022, ORCID: 0000-0001-5056-1779, e-mail: dick@infran.ru

Для цитирования: Дик, О. Е. (2025) О связи сверхмедленных частот электроэнцефалограммы и вариабельности сердечного ритма при сосудистой патологии. *Интегративная физиология*, т. 6, № 1, с. 66–74. <https://doi.org/10.33910/2687-1270-2025-6-1-66-74> EDN ABRDAE

Получена 16 января 2025; прошла рецензирование 13 февраля 2025; принята 14 февраля 2025.

Финансирование: Работа выполнена за счет средств федерального бюджета в рамках государственного задания ФГБУН Институт физиологии им. И. П. Павлова РАН (№ 1021062411784-3-3.1.8).

Права: © О. Е. Дик (2025). Опубликовано Российским государственным педагогическим университетом им. А. И. Герцена. Открытый доступ на условиях лицензии CC BY-NC 4.0.

Аннотация. Статья посвящена выявлению динамики соотношения частот сверхмедленных колебаний электроэнцефалограмм и вариабельности сердечного ритма человека в норме и при патологии. Для решения поставленной задачи проанализированы биоэлектрическая активность мозга и сердца в контрольной группе здоровых испытуемых и лиц с различной степенью сосудистой патологии, связанной с вегето-сосудистой дистонией и с вертебрально-базилярной недостаточностью. Применен метод синхросжатого вейвлет-преобразования, преимущество которого состоит в высоком качестве нахождения мгновенных частот в зашумленных экспериментальных данных. Анализ соотношения мгновенных частот сверхмедленных колебаний электроэнцефалограмм и вариабельности сердечного ритма обусловлен тем, что именно эти колебания, в отличие от более высокочастотных составляющих компонентов электроэнцефалограмм, связаны с регуляцией сердечного ритма. Установлено, что основные отличия во взаимоотношениях частот анализируемых сигналов характеризуются различными временами возникновения синхронизации между мгновенными частотами. В экспериментальных данных лиц с вертебрально-базилярной недостаточностью выявлено меньшее время возникновения синхронизации между частотами сверхмедленных колебаний электроэнцефалограмм и вариабельностью сердечного ритма, чем в данных, полученных для лиц с вегето-сосудистой дистонией.

Ключевые слова: сосудистая патология, электроэнцефалограмма, электрокардиограмма, динамика частот, вейвлетное преобразование

On the relationship between ultraslow electroencephalogram oscillations and heart rate variability in vascular pathology

О. Е. Дик ✉¹¹ Pavlov Institute of Physiology, Russian Academy of Sciences, 6 Makarova Emb., Saint Petersburg 199034, Russia

Author

Olga E. Dick, SPIN: 5302-5278, Scopus AuthorID: 6602069990, ResearcherID: AAC-8840-2022, ORCID: 0000-0001-5056-1779, e-mail: dick@infran.ru

For citation: Dick, O. E. (2025) On the relationship between ultraslow electroencephalogram oscillations and heart rate variability in vascular pathology. *Integrative Physiology*, vol. 6, no. 1, pp. 66–74. <https://doi.org/10.33910/2687-1270-2025-6-1-66-74> EDN ABRDAE

Received 16 January 2025; reviewed 13 February 2025; accepted 14 February 2025.

Funding: The work was carried out at the expense of the federal budget within the framework of the state assignment of the Pavlov Institute of Physiology RAS (No. 1021062411784-3-3.1.8).

Copyright: © O. E. Dick (2025). Published by Herzen State Pedagogical University of Russia. Open access under CC BY-NC License 4.0.

Abstract. This study investigates the dynamic relationship between ultraslow electroencephalogram (EEG) oscillations and heart rate variability (HRV) in healthy individuals and patients with vascular pathologies, including vegetative-vascular dystonia and vertebrobasilar insufficiency. Using synchrosqueezed wavelet transform analysis — a method particularly effective for extracting instantaneous frequencies from noisy physiological data — we compared bioelectrical activity patterns between control subjects and clinical groups. The focus on ultraslow oscillations (<0.5 Hz) stems from their established role in cardiovascular regulation, unlike higher EEG frequencies. Key findings demonstrate pathological variations in synchronization dynamics: patients with vertebrobasilar insufficiency exhibited significantly shorter synchronization latencies between EEG and HRV frequencies compared to vegetative-vascular dystonia cases.

Keywords: vascular pathology, electroencephalogram, electrocardiogram, frequency dynamics, wavelet transform

Введение

Актуальность исследования взаимоотношения частот биоэлектрической активности мозга и сердечного ритма связана с важностью поиска регуляции ритмов различных физиологических систем при сосудистой патологии, обуславливающей нарушения функционального состояния мозга (Hestad et al. 2020; Iadecola, Gottesman 2019; Mills 2016; Tadic et al. 2016; Ungvari et al. 2021; Walker et al. 2019).

Известно, что частота сердечных сокращений модулируется нервной системой, а, с другой стороны, паттерны нейрональной активности считаются респираторно-модулированными (Dick et al. 2014; Limberg et al. 2013). Поэтому исследование динамических коррелят биоэлектрической активности мозга и биоэлектрической активности сердца в условиях форсированного дыхания (гипервентиляции) может привести к выявлению функциональных маркеров сосудистой патологии мозга.

Известно, что ритмы сердечно-сосудистой и нервной систем существенно вариабельны.

Вариабельность этих ритмов означает изменчивость длительности временных интервалов между локальными максимумами нейрональной активности и сердечными сокращениями, соответственно (Dick, Lyubashina 2024). Считается, что это связано не со стохастичной природой нерегулярности сердечного ритма или нейрональной активности, а с низкоразмерной хаотической динамикой соответствующих процессов (Pikovsky et al. 2011).

Анализ взаимосвязей нестационарных сигналов связан, прежде всего, с определением их мгновенных частот. Одним из вариантов нахождения этих частот является метод синхросжатого вейвлет-преобразования (Daubechies et al. 2011), преимущество которого состоит в высоком качестве определения мгновенных частот в зашумленных экспериментальных данных, к которым относится биоэлектрическая активность мозга, регистрируемая с поверхности головы в виде электроэнцефалограммы (ЭЭГ). Этот метод применим для оценки динамики взаимосвязи дыхательного и сердечного ритмов (Wu et al. 2014; 2016), для анализа различий

в ответах мозга в виде паттернов электроэнцефалограмм на ритмическую фотостимуляцию при наличии и отсутствии умеренных когнитивных нарушений (Dick, Glazov 2021; Dik, Glazov 2021).

При этом отмечается важность изучения сверхмедленных компонентов биоэлектрической активности мозга, связанных с регуляцией ритмов дыхания и сердца (Кнузев 2012).

Целью данной работы является оценка связи сверхмедленных частот электроэнцефалограммы и вариабельности сердечного ритма при различной степени сосудистой патологии.

Методы

Одновременно зарегистрированные записи ЭЭГ и ЭКГ для трех групп испытуемых с последующим удалением артефактов предоставлены Санкт-Петербургской неврологической клиникой Института мозга человека им. Н. П. Бехтеревой РАН.

Десять записей соответствовали контрольной группе здоровых лиц женского пола, 8 и 7 записей соответствовали группе лиц с вегето-сосудистой дистонией (группа А) и с вертебрально-базилярной недостаточностью (группа Б) тоже женского пола.

Зарегистрированные записи включали состояние покоя и состояние, связанное с гипервентиляционной нагрузкой. Частота дискретизации была равна 512 Гц. Для анализа сверхмедленных компонентов ЭЭГ были использованы наименее зашумленные в затылочных отведениях.

Для исследования динамики сердечного ритма сначала были вычислены последовательности временных интервалов между R пиками QRS комплексов ЭКГ. Эти последовательности были реализованы в результате вейвлетной реконструкции паттернов ЭКГ с помощью вейвлета sum4 , по форме напоминающего QRS комплекс.

Примеры коротких сегментов экспериментальных данных ЭЭГ и ЭКГ для пациентки из группы А представлены на рисунке 1 а, б. Рисунок 1 с иллюстрирует результат вейвлетной реконструкции паттерна ЭКГ (черная кривая соответствует исходным паттернам ЭКГ, а голубая кривая — восстановленным после вейвлетного разложения паттернам).

На рисунке 2 а показаны последовательные максимумы (R пики) в паттернах ЭКГ, а на рисунке 2 б изображена вычисленная эквидистантная последовательность последовательных временных интервалов RR_i и RR_{i+1} между

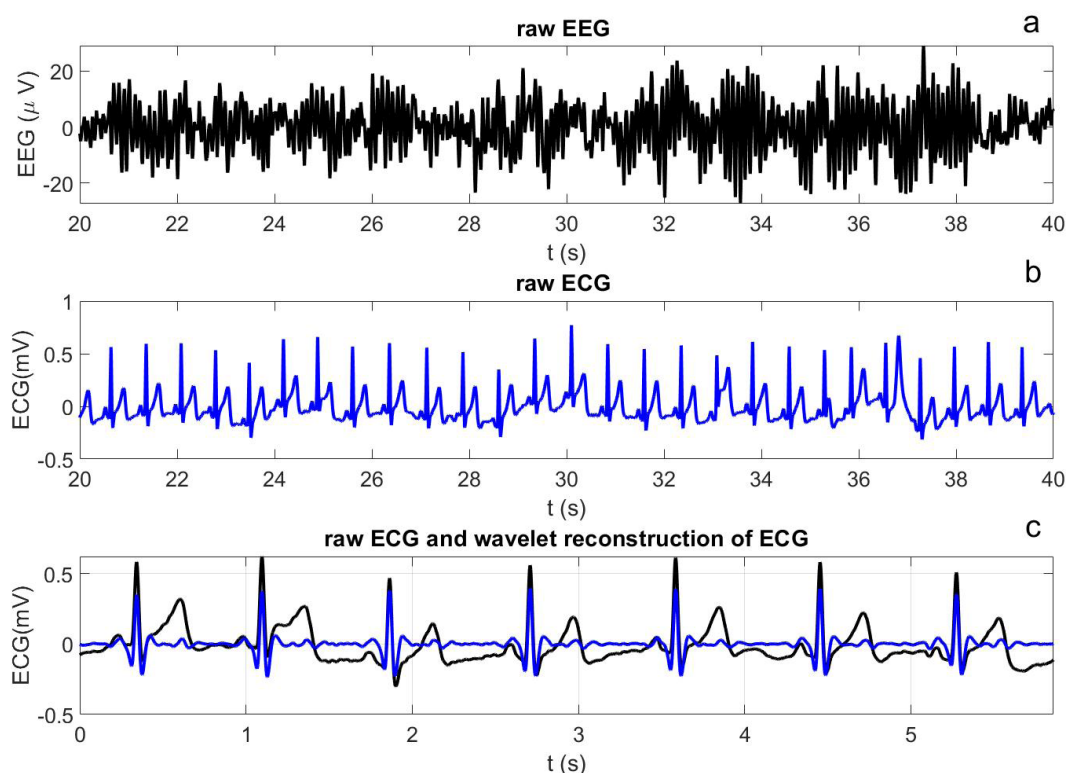


Рис. 1. Примеры зарегистрированных сегментов ЭЭГ и ЭКГ для пациента группы А (а, б) и результата вейвлетной реконструкции паттерна ЭКГ (с)

Fig. 1. Representative EEG and ECG recordings from a Group A patient (a, b) and the wavelet-reconstructed ECG signal (c)

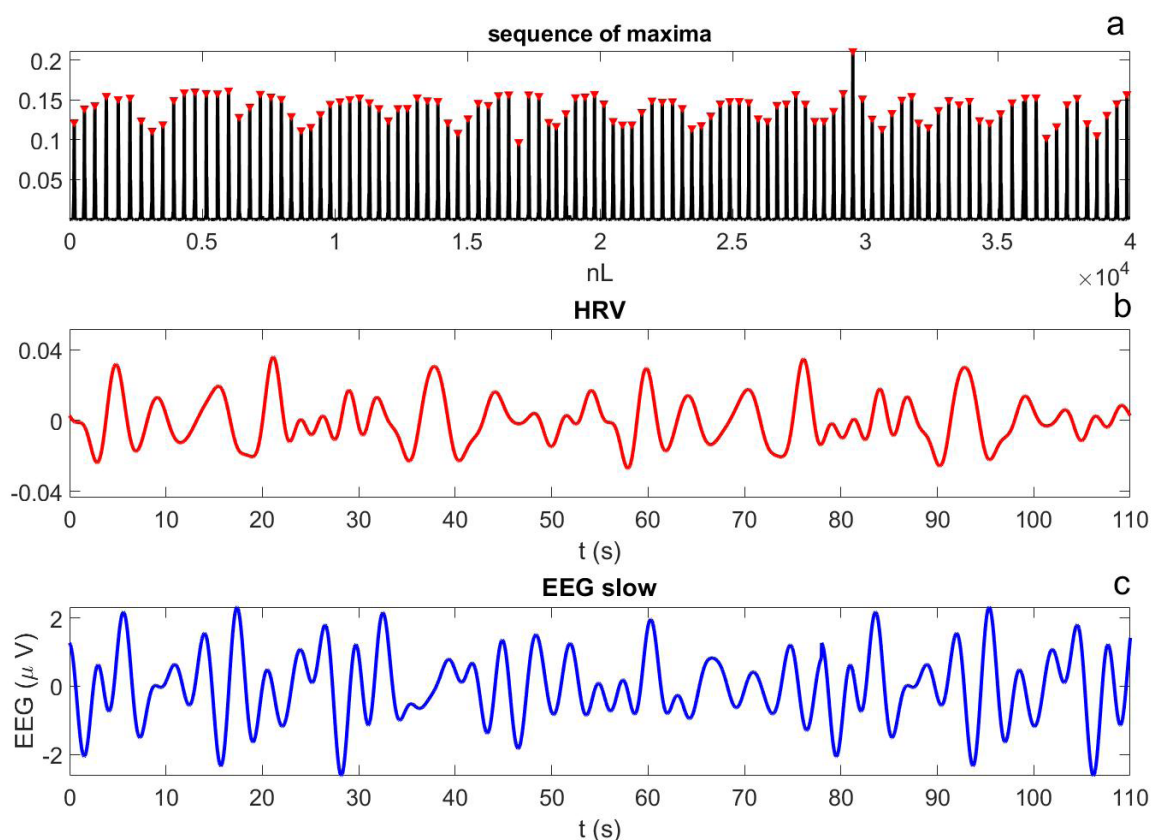


Рис. 2. Примеры последовательных R максимумов в паттернах ЭКГ (а), кривая вариальности сердечного ритма (HRV) (b), сверхмедленные колебания ЭЭГ (c)

Fig. 2. Examples of successive R maxima in ECG patterns (a), heart rate variability (HRV) curve (b), ultraslow EEG oscillations (c)

максимумами после удаления нелинейного тренда, то есть кривая вариальности сердечного ритма (HRV). Для получения сверхмедленных частот ЭЭГ проведена полосовая фильтрация в диапазоне [0,05–0,5] Гц. Пример сверхмедленных колебаний ЭЭГ представлен на рисунке 2 с.

Матрица $|W(f, t)|^2$ описывает локальный вейвлетный спектр, который характеризует распределение энергии анализируемого сигнала $y(t)$ по частотам f ,

$$W(f, t) = f \int_{t_1}^{t_2} y(t) \overline{\psi(f(t-b))} dt,$$

где b — временной сдвиг, $\overline{\psi(f(t-b))}$ — вейвлетная функция (Daubechies 1992).

$$E_{sw}(f) = f \int_{t_1}^{t_2} |T(f, t)|^2 dt$$

задает глобальный вейвлетный спектр, соответствующий усредненному распределению энергии по частотам, где

$$T(f, t) = \frac{1}{\Delta\omega} \sum_{f_k} W(f_k, t) f^{3/2} \Delta f_k$$

представляет собой матрицу, полученную после синхросжатого вейвлетного преобразования со следующими параметрами:

$$\Delta f_k = f_k - f_{k-1}, \Delta\omega = \omega_l - \omega_{l-1}, \omega_l = (l/n)F_s, \\ l = 1, \dots, n,$$

где n — число частот, используемых при построении вейвлетного спектра, F_s — частота дискретизации сигнала (Daubechies et al. 2011).

На основании вычисленного гребня $\omega_r(b) = \arg \max |T(\omega_l, b)|$ вычисляется мгновенная частота

$$f(b) = \omega_r(b) / 2\pi.$$

После нахождения мгновенных частот для двух анализируемых сигналов вычисляется соотношение мгновенных частот $f_X(b) / f_Y(b)$.

Для определения времени (Δt_{cor}) возникновения частотной синхронизации между ЭЭГ и HRV будем использовать интервал времени, в течение которого возможно возникновение соотношения между частотами в виде $0,95 \leq f_{\text{EEG}}/f_{\text{HRV}} \leq 1,05$.

Для сравнения средних времен возникновения частотной синхронизации, полученных для трех групп данных, применялся статистический однофакторный дисперсионный анализ.

Результаты и их обсуждение

На рисунке 3 представлены локальные (рис. 3 а, б) и глобальные (рис. 3 с, д) вейвлетные спектры для сверхмедленных колебаний ЭЭГ (рис. 3 а, с) и вариабельности сердечного ритма HRV (рис. 3 б, д) для пациентки из группы А в состоянии покоя.

Локальные вейвлетные спектры, определяющие мгновенные распределения энергии сигналов ЭЭГ (рис. 3 а) и HRV (рис. 3 б) по частотам содержат практически несовпадающие полосы частот. Максимумы глобальных вейвлетных

спектров $E_{\text{SW}}(f)$ ЭЭГ (рис. 3 с) и HRV (рис. 3 д) соответствуют частотам 0,35 Гц и 0,18 Гц. Соотношение мгновенных частот в данном примере не удовлетворяет условию $0,95 \leq f_{\text{EEG}}/f_{\text{HRV}} \leq 1,05$ (рис. 3 е).

В отличие от этого, для данных, представленных на рисунке 4, возникает частотная синхронизация между сверхмедленным компонентом ЭЭГ и вариабельностью сердечного ритма HRV для пациентки из группы А в состоянии форсированного дыхания.

Локальные (рис. 4 а, б) и глобальные (рис. 4 с, д) вейвлетные спектры демонстрируют наличие частот вблизи 0,3 Гц. Мгновенные частоты приближаются друг к другу через 48 секунд после начала форсированного дыхания, после чего устанавливается частотная синхронизация ($\Delta t_{\text{cor}} = 48$ с) (рис. 4 е).

Рисунок 5 показывает различия во времени Δt_{cor} возникновения частотной синхронизации между ЭЭГ и HRV в состоянии форсированного дыхания для здорового человека (рис. 5 а, б) и для пациентки с сосудистой патологией

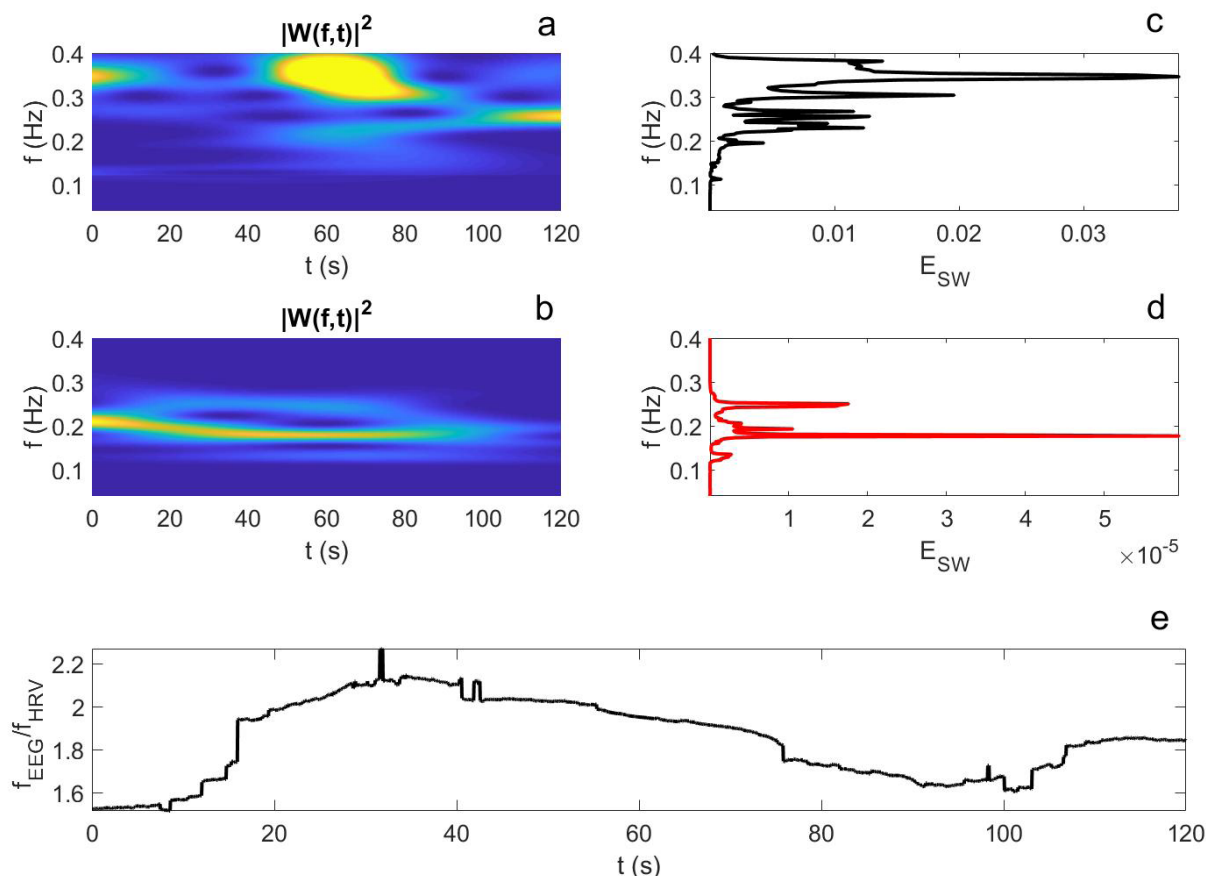


Рис. 3. Локальные (а, б) и глобальные (с, д) вейвлетные спектры для ЭЭГ (а, с) и HRV (б, д) для пациентки из группы А в состоянии покоя. Отношение мгновенных частот анализируемых сигналов (е)

Fig. 3. The local (a, b) and global (c, d) wavelet spectra for EEG (a, c) and HRV (b, d) for a Group A patient at rest. Instantaneous frequency ratio between EEG and HRV oscillations (e)

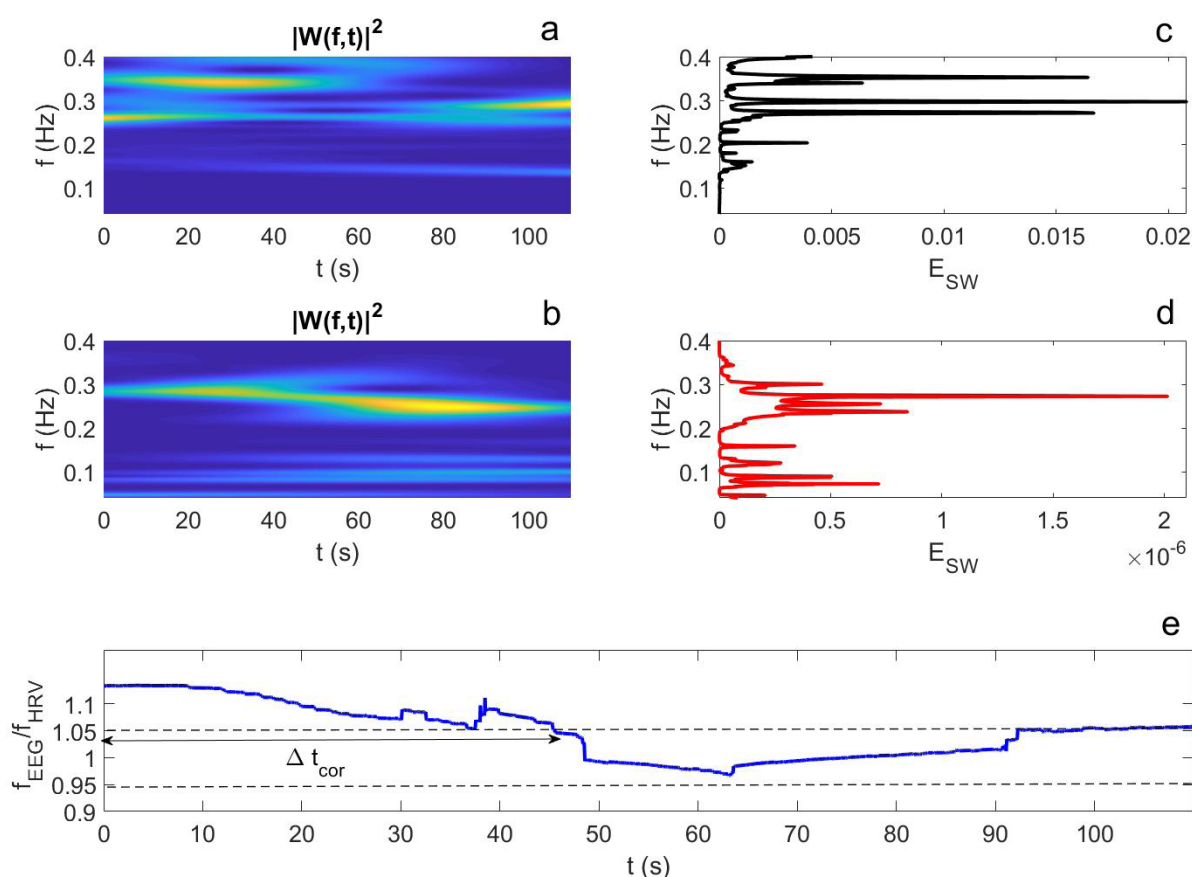


Рис. 4. Локальные (a, b) и глобальные (c, d) вейвлетные спектры для ЭЭГ (a, c) и HRV (b, d) для пациентки из группы А в состоянии форсированного дыхания. Отношение мгновенных частот анализируемых сигналов (e)

Fig. 4. The local (a, b) and global (c, d) wavelet spectra of EEG (a, c) and HRV (b, d) for a Group A patient during forced breathing. Instantaneous frequency ratio between EEG and HRV oscillations (e)

из группы А (рис. 5 с, d). Для здорового человека характерно то, что отношение мгновенных частот, удовлетворяющее условию $0,95 \leq f_{EEG}/f_{HRV} \leq 1,05$, происходит спустя 72 секунды после начала гипервентиляции (рис. 5 а). В то же время для пациентки с сосудистой патологией из группы А время Δt_{cor} возникновения частотной синхронизации между анализируемыми сигналами уменьшается ($\Delta t_{cor} = 51$ с) (рис. 5 с, d).

Рисунок 6 демонстрирует статистически значимые различия в усредненных значениях времен возникновения частотной синхронизации для трех групп данных.

Статистика по F-критерию Фишера $F = 35,2$, превышает критическое значение $F_{crit} = F_{2,18} = 3,5$. Значения 2 и 18 соответствуют числу $k = 3$ тестируемых групп, числу 7 усредняемых значений в каждой группе и общему числу наблюдений $N = 7 \cdot 3 = 21$, поэтому $k - 1 = 2$, $N - k = 18$. Это свидетельствует о статистически достоверных различиях между временами возникновения корреляции Δt_{cor} для трех тестируемых групп.

Среднее время возникновения частотной синхронизации оказалось максимальным для контрольной группы здоровых лиц ($\Delta t_{cor} = 73 \pm 7$ с), и минимальным ($\Delta t_{cor} = 32 \pm 5$ с) для группы Б с вертебрально-базиллярной недостаточностью. Для группы А с вегето-сосудистой дистонией среднее время возникновения частотной синхронизации составляет промежуточный вариант ($\Delta t_{cor} = 53 \pm 6$ с).

Таким образом, полученные результаты изучения связи сверхмедленных частот электроэнцефалограммы и вариабельности сердечного ритма показывают, что уменьшение среднего времени возникновения частотной синхронизации в состоянии форсированного дыхания зависит от степени сосудистой патологии. В случае более выраженной патологии наблюдается более быстрое возникновение синхронизации между анализируемыми частотами ЭЭГ и сердечного ритма. Это в некоторой степени согласуется с результатами работ, подтверждающих гипотезу о сложном динамическом

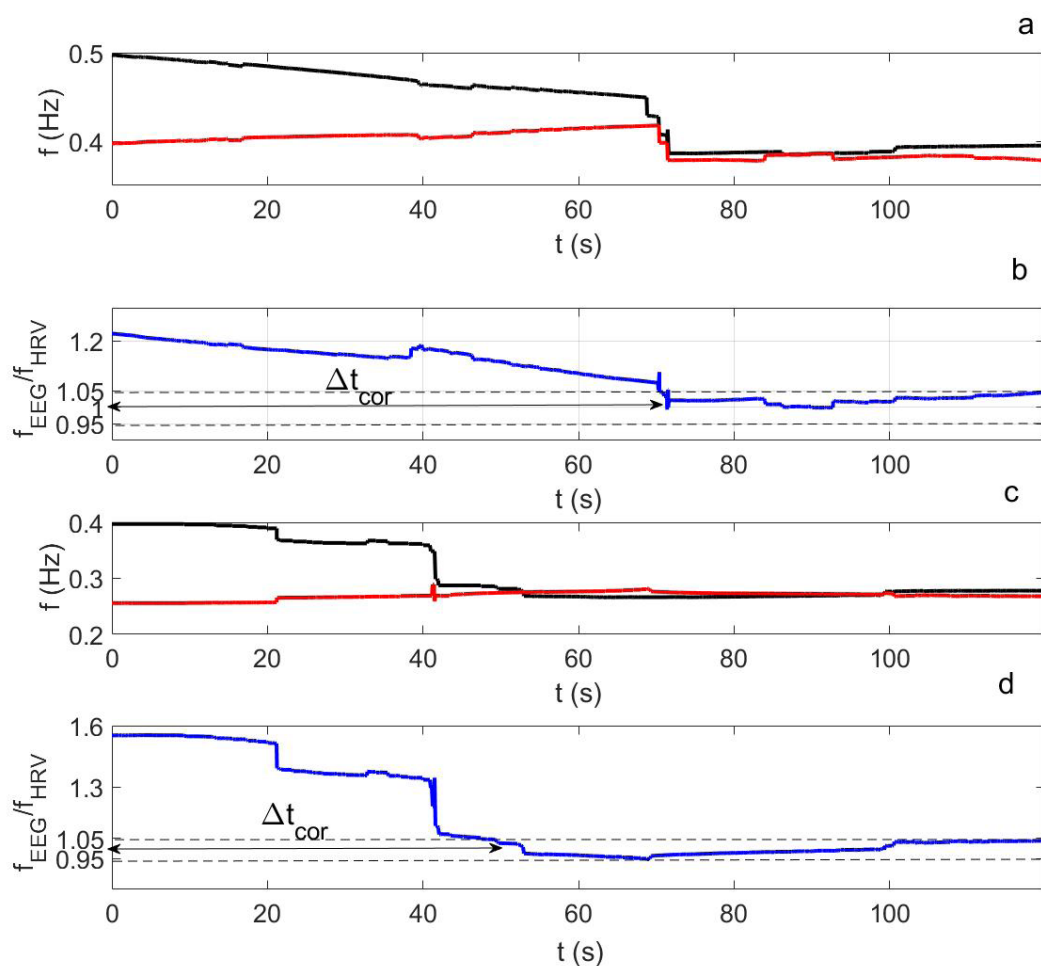


Рис. 5. Выделенные частоты сверхмедленных колебаний ЭЭГ и HRV (a, c) и отношения мгновенных частот (b, d) в состоянии форсированного дыхания для здоровой испытуемой (a, b) и для пациентки из группы А (c, d)

Fig. 5. Selected frequencies of EEG and HRV infraslow oscillations (a, c) and instantaneous frequency ratios (b, d) during forced breathing for a healthy subject (a, b) and a Group A patient (c, d)

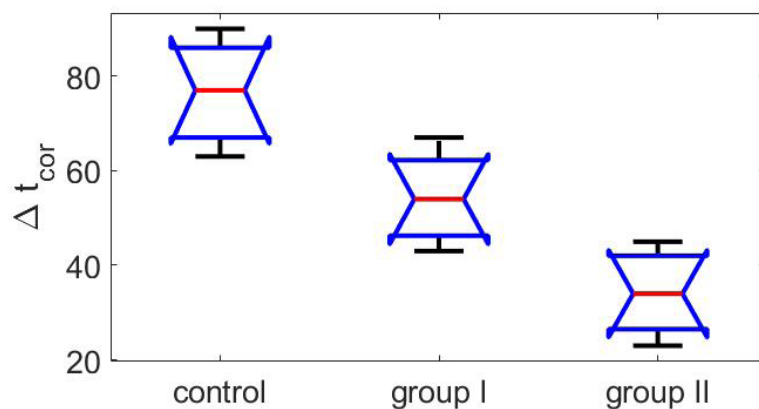


Рис. 6. Различия в усредненных временах возникновения частотной синхронизации между ЭЭГ и HRV

Fig. 6. Differences in averaged times of frequency synchronization occurrence between EEG and HRV

взаимодействии variability сердечного ритма и сверхмедленными ритмами электрической активности головного мозга (Dick, Glazov 2023; Knyazev 2012).

Заключение

Применение высокоэффективного метода синхросжатого вейвлет-преобразования для оценки отношения мгновенных частот зашумленных экспериментальных данных электрической активности мозга и variability сердечного ритма продемонстрировало получение статистически значимых различий во времени возникновения синхронизации между анализируемыми мгновенными частотами для здоровых лиц и пациентов с сосудистой патологией.

Для данных из группы с большей степенью сосудистой патологии, связанной с вертебрально-базилярной недостаточностью, среднее время возникновения частотной синхронизации между сверхмедленными компонентами ЭЭГ и variability сердечного ритма оказалось наименьшим, по сравнению с данными для группы с меньшей степенью патологии, ассоциированной с вегето-сосудистой дистонией.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии потенциального или явного конфликта интересов, связанного с публикацией данной статьи.

Conflict of Interest

The author declares that there is no conflict of interest, either existing or potential.

Соответствие принципам этики

Регистрация электроэнцефаллограмм соответствовала этическим стандартам, утвержденным правовыми актами РФ. Исследование одобрено Комитетом по этике Института мозга человека им. Н. П. Бехтерева РАН (протокол от 18 апреля 2018 г.).

Ethics Approval

The electroencephalographic recordings were conducted in full compliance with the ethical standards and regulatory requirements of the Russian Federation. The study protocol received formal approval from the Institutional Ethics Committee of the N. P. Bekhtereva Institute of the Human Brain, Russian Academy of Sciences (Protocol dated 18 April 2018).

References

- Daubechies, I. (1992) *Ten lectures on wavelets*. Philadelphia: SIAM Publ., 357 p. (CMBS-NSF Regional conference series in applied mathematics. No. 61). <https://doi.org/10.1137/1.9781611970104> (In English)
- Daubechies, I., Lu, J., Wu, H.-T. (2011) Synchrosqueezed wavelet transforms: An empirical mode decomposition-like tool. *Applied and Computational Harmonic Analysis*, vol. 30, no. 2, pp. 243–261. <https://doi.org/10.1016/j.acha.2010.08.002> (In English)
- Dick, O. E., Glazov, A. L. (2021) Estimation of the synchronization between intermittent photic stimulation and brain response in hypertension disease by the recurrence and synchrosqueezed wavelet transform. *Neurocomputing*, vol. 455, pp. 163–177. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2021.05.038> (In English)
- Dick, O. E., Glazov, A. L. (2023) Revealing the coupling directionality and synchronization between time series from physiological data by analysis of joint recurrences. *Chaos, Solitons & Fractals*, vol. 173, article 113768. <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2023.113768> (In English)
- Dick, O. E., Lyubashina, O. A. (2024) Comparative pairwise analysis of the relationships between physiological rhythms using synchrosqueezed wavelet transform, phase dynamics modelling and recurrence. *Nonlinear Dynamics*, vol. 112, no. 22, pp. 19825–19848. <https://doi.org/10.1007/s11071-024-10089-w> (In English)
- Dick, T. E., Hsieh, Y.-H., Dhingra, R. R. et al. (2014) Cardiorespiratory coupling: Common rhythms in cardiac, sympathetic, and respiratory activities. *Progress in Brain Research*, vol. 209, pp. 191–205. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63274-6.00010-2> (In English)
- Dik, O. E., Glazov, A. L. (2021) Parametry fazovoj sinkhronizatsii v elektroentsefalograficheskikh patternakh kak markery kognitivnykh narushenij [Parameters of phase synchronization in electroencephalographic patterns as markers of cognitive impairment]. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki — Technical Physics*, vol. 66, no. 4, pp. 560–570. <https://doi.org/10.1134/S1063784221040058> (In English)
- Iadecola, C., Gottesman, R. F. (2019) Neurovascular and cognitive dysfunction in hypertension: Epidemiology, pathobiology, and treatment. *Circulation Research*, vol. 124, no. 7, pp. 1025–1044. <https://doi.org/10.1161/CIRCRESAHA.118.313260> (In English)

- Hestad, K., Engedal, K., Schirmer, H., Strand, B. H. (2020) The effect of blood pressure on cognitive performance. An 8-year follow-up of the Tromsø study, comprising people aged 45–74 years. *Frontiers in Psychology*, vol. 11, article 607. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2020.00607> (In English)
- Knyazev, G. G. (2012) EEG delta oscillations as a correlate of basic homeostatic and motivational processes. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, vol. 36, no. 1, pp. 677–695. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2011.10.002> (In English)
- Limberg, J. K., Morgan, B. J., Schrage, W. G., Dempsey, J. A. (2013) Respiratory influences on muscle sympathetic nerve activity and vascular conductance in the steady state. *American Journal of Physiology — Heart and Circulatory Physiology*, vol. 304, no. 12, pp. H1615–H1623. <https://doi.org/10.1152/ajpheart.00112.2013> (In English)
- Mills, K. T. (2016) Global disparities of hypertension prevalence and control: A systematic analysis of population-based studies from 90 countries. *Circulation*, vol. 134, no. 6, pp. 441–450. <https://doi.org/10.1161/CIRCULATIONAHA.115.018912> (In English)
- Pikovsky, A. S., Rosenblum, M. G., Kurths, J. (2011) *Synchronization: A universal concept in nonlinear sciences*. Cambridge: Cambridge University Press, 411 p. (In English)
- Tadic, M., Cuspidi, C., Hering, D. (2016) Hypertension and cognitive dysfunction in elderly: Blood pressure management for this global burden. *BMC Cardiovascular Disorders*, vol. 16, no. 1, article 208. <https://doi.org/10.1186/s12872-016-0386-0> (In English)
- Ungvari, Z., Toth, P., Tarantini, S. et al. (2021) Hypertension-induced cognitive impairment: From pathophysiology to public health. *Nature Reviews Nephrology*, vol. 17, no. 10, pp. 639–654. <https://doi.org/10.1038/s41581-021-00430-6> (In English)
- Walker, K. A., Sharrett, A. R., Wu, A. et al. (2019) Association of midlife to late-life blood pressure patterns with incident dementia. *Journal of the American Medical Association*, vol. 322, no. 6, pp. 535–545. <https://doi.org/10.1001/jama.2019.10575> (In English)
- Wu, H.-T., Chan, Y.-H., Lin, Y.-T. et al. (2014) Using synchrosqueezing transform to discover breathing dynamics from ECG signals. *Applied and Computational Harmonic Analysis*, vol. 36, no. 2, pp. 354–359. <https://doi.org/10.1016/j.acha.2013.07.003> (In English)
- Wu, H.-T., Lewis, G. F., Davila, M. I. et al. (2016) Optimizing estimates of instantaneous heart rate from pulse wave signals with the synchrosqueezing transform. *Methods of Information in Medicine*, vol. 55, no. 5, pp. 463–472. <https://doi.org/10.3414/ME16-01-0026> (In English)