



Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика. 2025. Т. 25, вып. 4. С. 474–484

Izvestiya of Saratov University. Physics, 2025, vol. 25, iss. 4, pp. 474–484

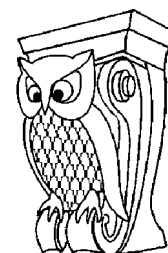
<https://fizika.sgu.ru>

<https://doi.org/10.18500/1817-3020-2025-25-4-474-484>, EDN: WXXHKE

Научная статья

УДК 530.182

Оценка времени стационарности сверхмедленных колебаний потенциалов головного мозга по сигналам электроэнцефалограмм



Е. И. Боровкова^{1,2}, Д. В. Васильева², А. С. Караваев¹✉, Ю. М. Ишбулатов¹, В. И. Пономаренко¹, Б. П. Безручко¹, М. Д. Прохоров¹

¹Саратовский филиал Института радиотехники и электроники имени В. А. Котельникова РАН, Россия, 410019, г. Саратов, ул. Зеленая, д. 38

²Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, Россия, 410012, г. Саратов, ул. Астраханская, д. 83

Боровкова Екатерина Игоревна, кандидат физико-математических наук, ¹научный сотрудник, ²доцент кафедры динамического моделирования и биомедицинской инженерии, rubane@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9621-039X>, AuthorID: 682183

Васильева Дарья Владимировна, студент 2-го курса магистратуры Института физики, darenka.www@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0006-4784-187X>

Караваев Анатолий Сергеевич, доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории моделирования в нелинейной динамике, karavaevas@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-4678-3648>, AuthorID: 128455

Ишбулатов Юрий Михайлович, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник лаборатории моделирования в нелинейной динамике, ishbulatov95@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2871-5465>, AuthorID: 829775

Пономаренко Владимир Иванович, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории моделирования в нелинейной динамике, ponomarenkovi@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-1579-6465>, AuthorID: 39986

Безручко Борис Петрович, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории моделирования в нелинейной динамике, bezruchkobp@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-6691-8653>, AuthorID: 484

Прохоров Михаил Дмитриевич, доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией моделирования в нелинейной динамике, mdprokhorov@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4069-9410>, AuthorID: 39985

Аннотация. Сверхмедленные колебания потенциалов головного мозга, имеющие частоту менее 0.5 Гц, отражают активность центров вегетативной регуляции и являются маркерами психофизиологического состояния человека. Для таких колебаний характерна нестационарная динамика, которая затрудняет их экспериментальное исследование. Нами предложен метод оценки характерного времени стационарности сверхмедленных колебаний головного мозга, основанный на анализе экспериментальных временных рядов электроэнцефалограмм. Метод включает этапы разбиения временного ряда на сегменты, построение аппроксимирующих полиномов для каждого сегмента, расчет матрицы евклидовых расстояний между коэффициентами полиномов, кластеризацию сегментов для определения участков квазистационарной динамики и анализ длительностей объединенных сегментов для получения статистических характеристик. Предложенный метод может быть применен для оценки времени стационарности других ритмов электроэнцефалограмм, а также частотных составляющих последовательности RR-интервалов. С его помощью проведен анализ сигналов электроэнцефалограмм и RR-интервалов 50 здоровых добровольцев, находящихся в состоянии покоя. Показано, что колебания в различных частотных диапазонах исследуемых сигналов имеют разную длительность квазистационарного поведения. В диапазонах частот 0.05–0.15 Гц и 0.15–0.50 Гц, отражающих активность симпатической и парасимпатической ветвей регуляции соответственно, время стационарности сверхмедленных колебаний в сигналах электроэнцефалограмм составило 30 и 36 с соответственно. Показано, что длительности квазистационарных участков сверхмедленных колебаний в электроэнцефалограммах хорошо соответствуют длительностям участков квазистационарной динамики последовательности RR-интервалов в частотных диапазонах, ассоциируемых с процессами симпатической и парасимпатической регуляции ритма сердца.

Ключевые слова: временные ряды, нестационарность, электроэнцефалограммы, RR-интервалы, вегетативная регуляция, сверхмедленные колебания потенциалов головного мозга

Благодарности: Работа выполнена в рамках государственного задания Саратовского филиала Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН (проект FFWZ-2025-0016).

Для цитирования: Боровкова Е. И., Васильева Д. В., Караваев А. С., Ишбулатов Ю. М., Пономаренко В. И., Безручко Б. П., Прохоров М. Д. Оценка времени стационарности сверхмедленных колебаний потенциалов головного мозга по сигналам электроэнцефалограмм // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика. 2025. Т. 25, вып. 4. С. 474–484. <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2025-25-4-474-484>, EDN: WXXHKE

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0)



Article

Estimation of the stationarity time of infra-slow oscillations of brain potentials using electroencephalogram signals

E. I. Borovkova^{1,2}, D. V. Vasilieva², A. S. Karavaev¹ , Yu. M. Ishbulatov¹, V. I. Ponomarenko¹, B. P. Bezruchko¹, M. D. Prokhorov¹

¹Saratov Branch of Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of Russian Academy of Sciences, 38 Zelyonaya St., Saratov 410019, Russia

²Saratov State University, 83 Astrakhanskaya St., Saratov 410012, Russia

Ekaterina I. Borovkova, rubanei@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9621-039X>, AuthorID: 682183

Dariya V. Vasilieva, darenka.www@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0006-4784-187X>

Anatoly S. Karavaev, karavaevas@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-4678-3648>, AuthorID: 128455

Yuri M. Ishbulatov, ishbulatov95@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2871-5465>, AuthorID: 829775

Vladimir I. Ponomarenko, ponomarenkovi@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-1579-6465>, AuthorID: 39986

Boris P. Bezruchko, bezruchkobp@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-6691-8653>, AuthorID: 484

Mikhail D. Prokhorov, mdprokhorov@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4069-9410>, AuthorID: 39985

Abstract. Background and Objectives: Infra-slow oscillations of brain potentials with a frequency of less than 0.5 Hz, reflect the activity of the autonomic regulation centers and are markers of the psychophysiological state of a person. Such oscillations are characterized by non-stationary dynamics, which complicates their experimental study. **Materials and Methods:** We have proposed a method for estimating the characteristic time of stationarity of infra-slow oscillations of brain potentials based on the analysis of experimental time series of electroencephalograms. The method includes the stages of dividing the time series into segments, constructing approximating polynomials for each segment, calculating the matrix of Euclidean distances between the coefficients of the polynomials, clustering the segments to determine areas of quasi-stationary dynamics, and analyzing the durations of the combined segments to obtain statistical characteristics. The proposed method can be used to estimate the stationarity time of other electroencephalograms rhythms, as well as the frequency components of the sequence of RR-interval. The method was used to analyze electroencephalograms signals and RR-intervals of 50 healthy volunteers at rest. **Results:** It has been shown that oscillations in different frequency ranges of the studied signals have different durations of quasi-stationary behavior. In the frequency ranges of 0.05–0.15 Hz and 0.15–0.50 Hz, reflecting the activity of the sympathetic and parasympathetic branches of regulation, respectively, the stationarity time of infra-slow oscillations in electroencephalograms signals was 30 s and 36 s, respectively. **Conclusion:** The durations of quasi-stationary sections of infra-slow oscillations in electroencephalograms correspond well to the durations of sections of quasi-stationary dynamics of the sequence of RR-interval in the frequency ranges associated with the processes of sympathetic and parasympathetic regulation of the heart rhythm.

Keywords: time series, non-stationarity, electroencephalograms, RR-intervals, autonomic regulation, infra-slow oscillations of brain potentials

Acknowledgments: The work was carried out within the framework of the State assignment of the Saratov Branch of Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of Russian Academy of Sciences (project No. FFWZ-2025-0016).

For citation: Borovkova E. I., Vasilieva D. V., Karavaev A. S., Ishbulatov Yu. M., Ponomarenko V. I., Bezruchko B. P., Prokhorov M. D. Estimation of the stationarity time of infra-slow oscillations of brain potentials using electroencephalogram signals. *Izvestiya of Saratov University. Physics*, 2025, vol. 25, iss. 4, pp. 474–484 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2025-25-4-474-484>, EDN: WXXHKE

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

Введение

Анализ электроэнцефалограмм (ЭЭГ) нашел широкое применение в медицине [1–3], нейробиологии [4, 5], психологии [6–9], биофизических [10, 11], физиологических [12, 13] и инженерных [14, 15] исследованиях. Традиционно ЭЭГ анализируют в нескольких полосах частот, которые ассоциируются с проявлением активности различных физиологических процессов. Обычно наиболее активно исследуются составляющие ЭЭГ с частотами 4–100 Гц: тета-, альфа-, бета-, мю- и гамма-ритмы. Более низкочастотный дельта-ритм (0.5–4 Гц), связываемый в норме с процессами сна, остается менее изученным. Отчасти это обусловлено объективными техническими сложностями, связанными с необходимостью регистрировать при анализе дельта-ритма более длительные за-

писи ЭЭГ в связи с относительно длительным характерным периодом этого ритма.

Долгое время считалось, что составляющие ЭЭГ с частотами ниже дельта-диапазона не имеют физиологической интерпретации и имеют стохастическую природу. Однако Аладжалова в экспериментах на животных показала, что составляющие ЭЭГ с частотами менее 0.5 Гц отражают активность центров вегетативной регуляции [16], что было подтверждено в более поздних исследованиях [17, 18]. Для обозначения таких низкочастотных составляющих Аладжаловой был предложен и позже закрепился в научном сообществе термин «сверхмедленные колебания потенциалов» (СМКП) головного мозга [16].

В наших исследованиях было показано, что эти составляющие сигнала ЭЭГ представляют значительный интерес для понимания биофизи-



ческих механизмов регуляции органов и систем организма [19] и являются маркерами, в частности, психофизиологического состояния человека [20–24].

Существенной проблемой при анализе биосигналов является их нестационарность, характеризующаяся изменением свойств сигналов в связи с изменением во времени параметров систем, порождающих их [25–28]. Это явление существенно затрудняет обработку и интерпретацию результатов анализа временных рядов таких сигналов. Для учета и уменьшения влияния этого явления на результаты исследования необходимо оценивать характерное время стационарности – время, на котором изменениями параметров системы, вызывающей сигналы, можно пренебречь. Подобные исследования проводились, в частности, в работе [29], в которой был предложен метод оценки времени стационарности сигналов внутричерепных ЭЭГ пациентов, страдающих эпилепсией. Однако, в силу специфики рассматриваемых в указанной работе патологий, оценки времени стационарности осуществлялись лишь в полосе частот 1–70 Гц.

Информация об изменении свойств динамики сигналов во времени, количестве и длительности квазистационарных сегментов в сигналах ЭЭГ и сигналах системы кровообращения являются важными аспектами анализа этих сигналов. Так, оценка времени квазистационарного поведения дает дополнительную информацию о свойствах сигналов ЭЭГ и последовательности RR-интервалов, что может способствовать более точной настройке методов их анализа и интерпретации полученных результатов. При математическом моделировании систем вегетативной регуляции информация об их времени стационарности позволяет создавать более точные модели, учитывающие, в частности, временные задержки и переходные процессы. В экспериментальных исследованиях наличие оценок характерной длительности квазистационарных сегментов сигналов ЭЭГ и последовательности RR-интервалов помогает выбрать длительность временных окон, в которых анализируются сигналы. Это, в свою очередь, может повысить точность анализа, зафиксировать важные изменения в динамике исследуемых систем, упростить интерпретацию результатов.

Целью данного исследования является анализ времени стационарности СМКП головного мозга по ЭЭГ здоровых добровольцев в состоянии

покоя, а также его сопоставление со свойствами колебаний, наблюдаемых в той же частотной области в последовательности RR-интервалов и интерпретируемых в литературе [16–18, 30, 31], как проявление активности контуров вегетативной регуляции.

1. Методы анализа

1.1. Дизайн исследования и экспериментальные данные

Мы проанализировали записи ЭЭГ и электрокардиограмм (ЭКГ) 50 здоровых мужчин в возрасте 21 ± 3 года (среднее значение \pm стандартное отклонение), имеющих средний уровень физической активности. Для каждого добровольца проводился эксперимент длительностью 6 мин. Во время эксперимента добровольцы находились в состоянии покоя, сидели с открытыми глазами в комфортном кресле, при этом их просили расслабиться. Дыхание добровольцев было произвольным. Регистрация сигналов проводилась в утренние часы через 2 ч после еды.

В процессе эксперимента регистрировались сигналы отведения F3 ЭЭГ по системе наложения электродов 8–3 и сигнал ЭКГ в I стандартном отведении по Эйнтховену методом трехэлектродной регистрации. Все сигналы регистрировались стандартным сертифицированным цифровым полиграфическим устройством – электрокардиографом-анализатором Encefalan_EEGP-19/26 (Медиком МТД, Таганрог, Россия) [32] с частотой дискретизации 250 Гц. Полоса пропускания по всем каналам составляла 0.016–70 Гц.

1.2. Предварительная обработка и анализ данных

Фильтрация. Из ЭКГ мы выделяли последовательность RR-интервалов. Затем последовательность RR-интервалов была линейно интерполирована и перевыбрана до частоты дискретизации 250 Гц для получения эквидистантной последовательности, в соответствии с рекомендациями [30, 31]. Сигнал эквидистантной последовательности RR-интервалов анализировался нами в частотных диапазонах: LF (0.05–0.15 Гц), который связывают с процессами симпатической регуляции ритма сердца, и HF (0.15–0.50 Гц), который ассоциируют с процессами парасимпатической регуляции ритма сердца и респираторными влияниями [33, 34].

Сигналы отведений ЭЭГ анализировались в δ_1 (0.05–0.15 Гц) и δ_2 (0.15–0.50 Гц) частотных диапазонах, которые связывают преимущественно с активностью центров автономной



регуляции [16–18]. Дополнительно анализ ЭЭГ проводился в традиционно используемых диапазонах: δ (0.5–4.0 Гц), θ (4.0–8.0 Гц), α (8.0–13.0 Гц). Частотные составляющие в исследуемых диапазонах выделялись прямоугольным полосовым фильтром. В табл. 1 представлены исследуемые диапазоны частот, их границы и длительности характерных периодов в секундах.

Расчет матрицы расстояний. Для анализа времени стационарности исследуемых колебаний в сигналах ЭЭГ и последовательности RR-интервалов, а также для оценки количества и длительности квазистационарных сегментов нами предложен следующий метод. Наблюдаемый временной ряд $X = \{x_n\}_{n=0}^{N-1}$ переменной $x(t)$, где n – номер точки ряда, а N – длина временного ряда, разбивался на M неперекрывающихся сегментов $X_m = \{x_n\}_{n=mT}^{mT+T-1}$ длиной T ; m – номер сегмента, который изменялся от 0 до $M = \lfloor N/T \rfloor$ (квадратные скобки обозначают округление в меньшую сторону до ближайшего целого числа). Значение T было выбрано равным трем характерным периодам колебаний, указанным в табл. 1 для анализируемых диапазонов частот.

На каждом сегменте X_m фрагмент временного ряда переменной $x(t)$ аппроксимировался полиномом 5-й степени: $f_m(t) = \sum_{p=0}^5 a_{pm}t^p$, где a_{pm} – коэффициенты полинома, которые находились с помощью метода наименьших квадратов. Для каждой пары сегментов X_m с номерами $m = i$ и $m = j$ вычислялось евклидово расстояние $d_{ij} = \sum_{p=0}^5 (a_{pi} - a_{pj})^2$ между коэффициентами аппроксимирующих полиномов $f_i(t)$ и $f_j(t)$. Величина d_{ij} служит количественной мерой отличия исследуемых колебаний на двух сегментах временного ряда. Чем сильнее различаются коэффициенты двух полиномов, тем выше значение d_{ij} . Рассчитанные между всеми парами сегментов временного ряда значения d_{ij} формируют матрицу расстояний.

Кластеризация квазистационарных сегментов. Границы квазистационарных сегментов временного ряда определялись через поэтапное объединение в кластеры соседних по времени сегментов. Сначала мы задавали число кластеров k , равное количеству сегментов M , то есть первоначально каждый кластер соответствовал одному набору коэффициентов полинома $f_m(t)$. Затем число кластеров последовательно уменьшалось на единицу за счет объединения двух соседних сегментов, имеющих минимальное значение d_{ij} ,

где $j = i - 1$ или $j = i + 1$. В предельном случае все сегменты оказываются объединены в один кластер.

Для определения оптимального числа кластеров k^* использовался метод силуэта [35]. На каждой итерации объединения сегментов временного ряда (то есть для разных k) мы рассчитывали среднее расстояние b между сегментом X_m и всеми остальными сегментами, входящими в тот же кластер, что и X_m , а также среднее расстояние c между сегментом X_m и сегментами ближайшего соседнего кластера. После этого вычислялись коэффициент силуэта $S_m = (c - b) / \max(b, c)$ для сегмента X_m и средний для всех сегментов коэффициент силуэта \bar{S} . Оптимальное число кластеров соответствует $k = k^*$, при котором наблюдается максимум зависимости $\bar{S}(k)$.

Сегменты, оказавшиеся в одном кластере, считаются далее одним квазистационарным участком временного ряда, то есть коэффициенты полиномов, аппроксимирующих временной ряд на этих сегментах, наиболее близки друг другу в смысле используемого метода кластеризации. Расчет матриц расстояний d_{ij} между сегментами и процедура кластеризации проводились для всех рассматриваемых диапазонов частот сигналов ЭЭГ и RR-интервалов. Для каждого частотного диапазона проводился статистический анализ длительностей τ полученных квазистационарных участков.

Модель для тестирования метода. Для проверки работоспособности метода мы провели численный эксперимент на синтетическом сигнале. Для генерации δ_2 -компоненты ЭЭГ с собственной частотой 0.25 Гц использован генератор Ван дер Поля со стохастическим воздействием. Модель описывается следующей системой уравнений:

$$\ddot{x}(t) - \mu(t)(1 - x^2(t))\dot{x}(t) + \omega_0^2 x(t) + D_\xi \xi(t) = 0, \quad (1)$$

$$y(t) = A(t)x(t) + D_\zeta \zeta(t). \quad (2)$$

Здесь $x(t)$ – динамическая переменная, описывающая автоколебательные составляющие в δ_2 -диапазоне; $y(t)$ – сигнал, моделирующий составляющие ЭЭГ в δ_2 -диапазоне; $\mu(t)$ – управляющий параметр, значение которого перестраивалось для моделирования нестационарности; $\omega_0 = 2\pi f$ где f – собственная частота колебаний, равная 0.25 Гц; $\xi(t)$ – динамический розовый шум ($1/f$); $D_\xi = 0.5$ – дисперсия динамического шума; $A(t)$ – параметр нормировки для учета модуляции амплитуды экспериментального сигнала физиологическими процессами; $\zeta(t)$ – измерительный



Границы исследуемых диапазонов частот сигналов ЭЭГ и RR-интервалов и соответствующие им длительности характерных периодов колебаний

Boundaries of the studied frequency ranges of EEG signals and RR intervals and the corresponding durations of characteristic oscillation periods

Сигнал/Signal	Диапазон/ Range	Границы, Гц/Boundaries, Hz	Характерный период, с/Characteristic period, s
ЭЭГ/EEG	δ_1	0.05–0.15	10
	δ_2	0.15–0.50	4
	δ	0.5–4.0	0.5
	θ	4.0–8.0	0.2
	α	8.0–13.0	0.1
RR	LF	0.05–0.15	10
	HF	0.15–0.50	4

белый гауссовский шум с нулевым средним; $D_\zeta = 0.15A(t)$ – дисперсия измерительного шума.

Численное интегрирование проводилось методом Эйлера с шагом 0.004 с. В ходе численного интегрирования отбрасывался переходной процесс длительностью 30 с. Далее генерировался нестационарный временной ряд длительностью 1200 с. Для моделирования эффекта нестационарности параметры $\mu(t)$ и $A(t)$ скачкообразно изменялись каждые 120 с (30 характерных периодов) между двумя наборами параметров: $\mu = 0.05$, $A = 1.1$ и $\mu = 0.15$, $A = 1.0$.

2. Полученные результаты

2.1. Результаты тестирования метода на модели

Предложенный метод был применен к сигналу модели, описываемой уравнениями (1) и (2). Расчет матрицы расстояний и последующая кластеризация позволили идентифицировать все квазистационарные участки. Длительность диагностированных участков квазистационарности составила 114 (96;144) с (медиана (первый квартиль; третий квартиль)), что хорошо соответствует априори заданному времени стационарности, равному 120 с. Тем самым, был сделан вывод о работоспособности предложенного подхода.

2.2. Результаты анализа экспериментальных данных

На рис. 1, а приведен 6-минутный временной ряд колебаний в частотном диапазоне δ_2 сигнала ЭЭГ для добровольца #1. Временной ряд разделен на 30 сегментов длительностью по 12 с. Границы сегментов показаны вертикальными пунктирными линиями. На рис. 1, б представлена в графическом виде матрица расстояний d_{ij} между коэффициентами полиномов $f_i(t)$

и $f_j(t)$, аппроксимирующих временной ряд на сегментах X_i и X_j . Черный цвет соответствует малым значениям d_{ij} , а белый цвет – большим значениям d_{ij} .

Из рис. 1, б видно, что некоторые соседние по времени сегменты временного ряда имеют близкие значения d_{ij} , образуя участки квазистационарной динамики. Такие участки чередуются с участками, на которых значения d_{ij} существенно отличаются, что говорит о наличии нестационарной динамики исследуемых колебаний.

Рис. 2 иллюстрирует метод определения оптимального числа кластеров для описания квазистационарной динамики колебаний, показанных на рис. 1, а. На рис. 2, а построена зависимость $\tilde{S}(k)$, которая имеет максимум при $k = k^* = 10$ (показан стрелкой). На рис. 2, б представлена матрица расстояний d_{ij} , иллюстрирующая результат кластеризации. Сегменты временного ряда, имеющие близкие значения коэффициентов аппроксимирующих полиномов, объединены в кластеры. Границы квазистационарных участков показаны на рис. 2, в вертикальными пунктирными линиями. Длительность самого продолжительного участка квазистационарной динамики на рис. 2, в составляет 144 с.

Результаты анализа статистики длительностей участков квазистационарной динамики исследуемых колебаний представлены на рис. 3, а в секундах, а на рис. 3, б – в характерных периодах колебаний для соответствующего частотного диапазона. Наибольшую абсолютную длительность квазистационарных участков в сигналах ЭЭГ, как ожидалось, демонстрируют колебания в самых низкочастотных диапазонах δ_1 и δ_2 , рис. 3, а. Однако в единицах характерного периода колебаний наибольшую длительность квазистационарной динамики демонстрируют колебаний в δ -диапазоне ЭЭГ (см. рис. 3, б). Отме-

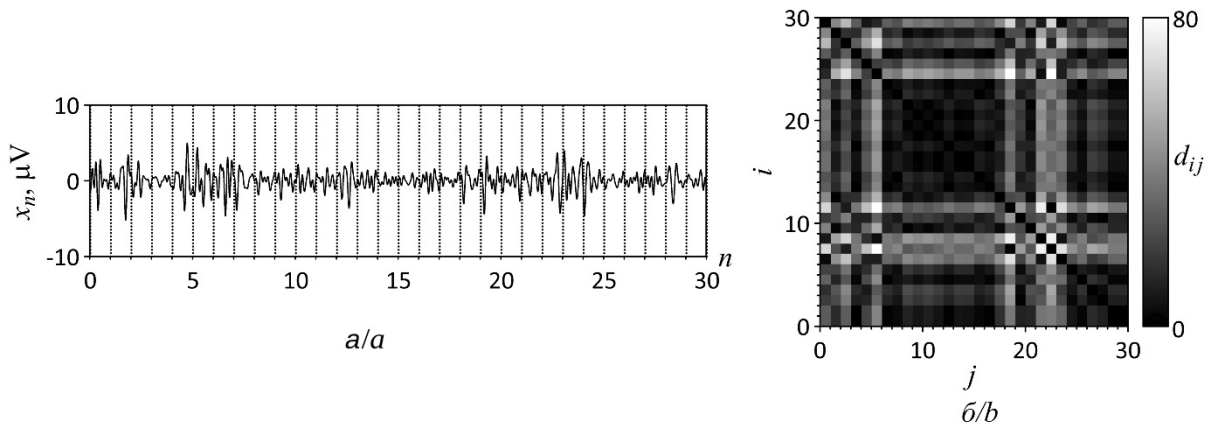


Рис. 1. Временной ряд δ_2 -ритма сигнала ЭЭГ (а); матрица расстояний d_{ij} между сегментами временного ряда (б)
Fig. 1. Time series of the δ_2 -rhythm of the EEG signal (a), matrix of distances d_{ij} between the segments of the time series (b)

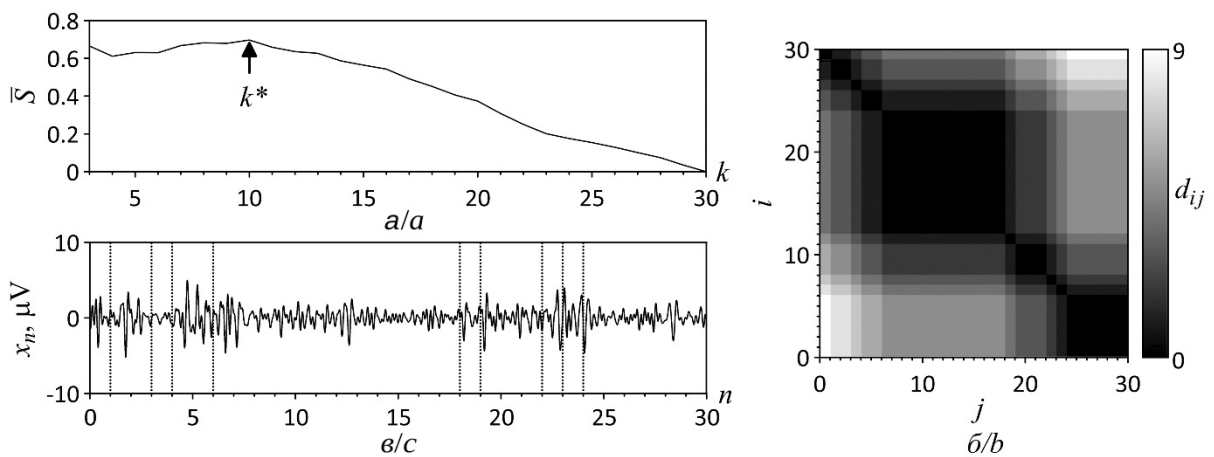


Рис. 2. Зависимость среднего коэффициента силуэта \bar{S} от числа кластеров k (а); матрица расстояний d_{ij} , на которой сегменты с квазистационарной динамикой объединены в кластеры (б); временной ряд δ_2 -ритма сигнала ЭЭГ, на котором границы квазистационарных участков показаны вертикальными пунктирными линиями (в)
Fig. 2. Dependence of the average silhouette coefficient \bar{S} on the number of clusters k (a), distance matrix d_{ij} , in which segments with quasi-stationary dynamics are combined into clusters (b), time series of the δ_2 -rhythm of the EEG signal, in which the boundaries of quasi-stationary sections are shown by vertical dotted lines (c)

тим, что колебания в δ_1 -диапазоне сигнала ЭЭГ и колебания в LF-диапазоне последовательно RR-интервалов имеют практически одинаковое время стационарности. Аналогично близкие значения длительности квазистационарной динамики демонстрируют колебания в δ_2 -диапазоне сигнала ЭЭГ и колебания в HF-диапазоне последовательности RR-интервалов.

3. Обсуждение результатов

В ходе нашего исследования были проведены оценки длительности квазистационарных участков в сигналах ЭЭГ и RR-интервалов. Для СМКП головного мозга и последовательности RR-интервалов такие исследования проведены впервые. Результаты оценки времени стационарности коле-

баний в более высокочастотных диапазонах ЭЭГ соответствуют по порядку величины результатам других работ [29, 36]. Показано, что характерные длительности квазистационарных участков в сигнале ЭЭГ отличаются для разных ритмов (см. рис. 3), что подтверждает существующие представления о различиях в физиологических механизмах, отвечающих за формирование колебаний в этих частотных диапазонах. При этом характерные времена стационарности СМКП головного мозга и соответствующих им частотных составляющих RR-интервалов оказываются близки друг к другу, что является аргументом в пользу проявления близких биофизических механизмов в различных сигналах (ЭЭГ и RR-интервалах) и косвенно служит подтверждением выводов, сделанных в работах [16–19]. Полученные резуль-

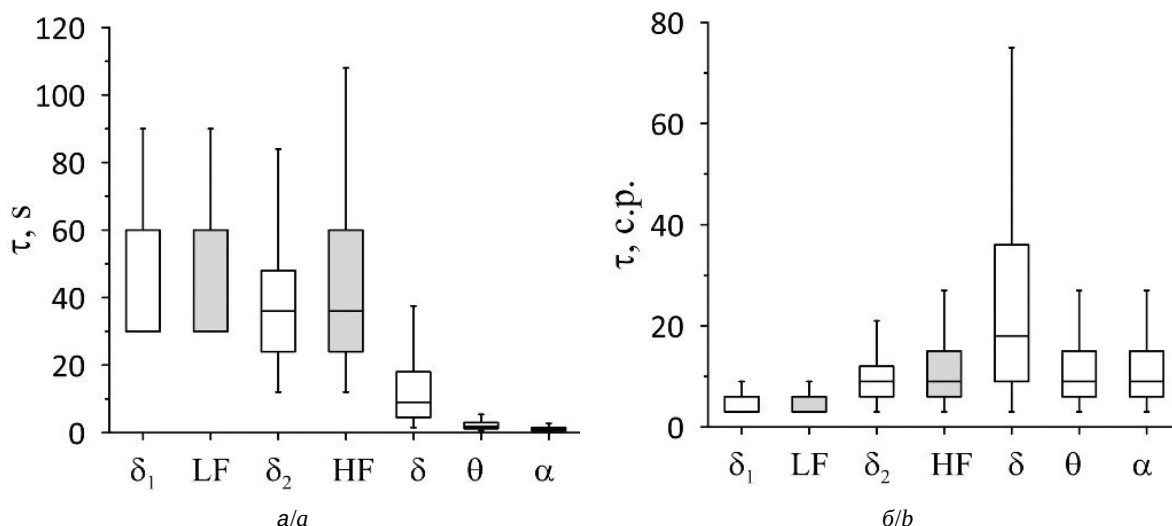


Рис. 3. Длительность участков квазистационарной динамики δ_1 , δ_2 , δ , θ и α -ритмов сигналов ЭЭГ и LF- и HF-составляющих последовательности RR-интервалов, выраженная в секундах (а) и в характерных периодах колебаний (с.п.) в соответствующем частотном диапазоне (б). Границы прямоугольников соответствуют первому и третьему квартилю распределений, а горизонтальная линия внутри прямоугольников – медиане их распределений. Вертикальными линиями отмечены минимальное и максимальное по выборке значения

Fig. 3. Duration of sections of quasi-stationary dynamics of δ_1 , δ_2 , δ , θ , and α -rhythms of EEG signals and LF and HF components of the sequence of RR-interval, expressed in seconds (a) and in characteristic periods of oscillations (c.p.) in the corresponding frequency range (b). The boundaries of the rectangles correspond to the first and third quartiles of the distributions, and the horizontal line inside the rectangles corresponds to the median of their distributions. The vertical lines mark the minimum and maximum values for the sample

таты вносят вклад в фундаментальные теоретические представления о биофизических закономерностях, лежащих в основе формирования СМКП головного мозга и их связи с составляющими последовательности RR-интервалов.

Найденные оценки абсолютных значений длительности квазистационарных участков в исследуемых сигналах относятся к прикладным результатам данной работы. Наличие таких данных, на наш взгляд, позволит настраивать некоторые параметры методов анализа рассматриваемых сигналов из априорных соображений, в частности, выбирать длительность окон для анализа во временной области. Это может повысить точность различных методов анализа и упростит интерпретацию результатов.

Данное исследование оставляет открытым вопрос о потенциальной возможности изменения характерных времен стационарности как при развитии некоторых патологий, так и при изменении психофизиологического состояния человека (например, при выполнении умственных заданий или физической нагрузке). Этот важный вопрос требует проведения отдельных исследований, которые планируются нами в перспективе в развитие данной работы.

К техническому ограничению использования метода можно также отнести зависимость результатов анализа от начальных фаз сегментов временного ряда. При анализе непериодических сигналов на интервалах одной и той же длительности укладывается неравное количество периодов колебаний. Это приводит к смещению начальных фаз сегментов друг относительно друга, что в свою очередь оказывает влияние на значения коэффициентов аппроксимирующих полиномов. Выбор целого числа характерных периодов колебаний в качестве длительности сегмента уменьшает влияние этого эффекта на результаты анализа, хотя и не компенсирует его полностью. Поэтому в общем случае, эффект влияния расстройки начальных фаз сегментов на квазистационарных участках может снижать чувствительность анализа. Решением может являться использование в качестве базиса тригонометрических полиномов (вместо степенных), для которых возможна компенсация начальной фазы. Этот нюанс является предметом отдельного исследования в будущем.

Заключение

В работе предложен метод оценки характерного времени стационарности колебаний раз-



личных частотных составляющих сигналов ЭЭГ и последовательности RR-интервалов, основанный на анализе временных рядов. Метод включает этапы разбиения временного ряда на сегменты, построение аппроксимирующих полиномов для каждого сегмента, расчет матрицы евклидовых расстояний между коэффициентами полиномов, кластеризацию сегментов для определения участков квазистационарной динамики и анализ длительностей объединенных сегментов для получения статистических характеристик.

Значительной новизной исследования является оценка характерных времен квазистационарной динамики сверхмедленных колебаний потенциала головного мозга с частотой ниже 0.5 Гц и соответствующих частотных составляющих последовательности RR-интервалов.

В ходе анализа временных реализаций сигналов ЭЭГ и последовательности RR-интервалов 50 здоровых добровольцев выявлено, что длительности квазистационарных участков варьируются в зависимости от частоты исследуемых колебаний. Наибольшие абсолютные значения времени стационарности (медиана, первый квартиль, третий квартиль) получены для сверхмедленных колебаний в сигналах ЭЭГ с частотами 0.05–0.15 Гц и 0.15–0.50 Гц: 45, 30, 60 с и 36, 24, 48 с соответственно. Более высокочастотные колебания в сигналах ЭЭГ показали значительно и. меньшие абсолютные времена стационарности: 9; 4.5; 18 с; 1.8; 1.2; 3.0 с и 0.9; 0.6; 1.5 с для диапазонов δ , θ и α соответственно. Обнаружено, что длительности квазистационарных участков сверхмедленных колебаний в ЭЭГ хорошо соответствуют длительностям участков квазистационарной динамики последовательности RR-интервалов в частотных диапазонах, ассоциируемых с процессами симпатической и парасимпатической регуляции ритма сердца.

Список литературы

1. Зенков Л. Р. Клиническая электроэнцефалография (с элементами эпилептологии). Руководство для врачей. М. : МЕДпресс-информ, 2023. 360 с.
2. Александров М. В., Иванов Л. Б., Лытаев С. А., Черный В. С., Александрова Т. В., Чухловин А. А., Костенко И. А., Повалюхина Е. С. Электроэнцефалография: руководство. СПб. : СпецЛит, 2020. 224 с.
3. Ситникова Е. Ю., Короновский А. А., Храмов А. Е. Анализ электрической активности головного мозга при абсанс-эпилепсии: прикладные аспекты нелинейной динамики // Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2011. Т. 19, № 6. С. 173–182. <https://doi.org/10.18500/0869-6632-2011-19-6-173-182>
4. Zhang H., Zhou Q., Qi C., Chen H., Hu X., Li W., Bai Y., Han J., Wang Y., Liang Z., Chen D., Cong F., Yan J., Li X. The applied principles of EEG analysis methods in neuroscience and clinical neurology // Military Medical Research, 2023. Vol. 10. Art. 67. <https://doi.org/10.1186/s40779-023-00502-7>
5. Симонов А. Ю., Казанцев В. Б. Модель возникновения лавинообразных биоэлектрических разрядов в нейронных сетях мозга // Письма в ЖЭТФ. 2011. Т. 93, вып. 8. С. 516–521. EDN: NTPSLN
6. Thornton J., D'Souza R., Tandon R. Artificial intelligence and psychiatry research and practice // Asian J. Psychiatr. 2023. Vol. 81. Art. 103509. <https://doi.org/10.1016/j.ajp.2023.103509>
7. Maksimenko V. A., Runnova A. E., Zhuravlev M. O., Protasov P., Kulanin R., Pisarchik A. N., Hramov A. E., Khramova M. V. Human personality reflects spatio-temporal and time-frequency EEG structure // PLoS ONE. 2018. Vol. 13, № 9. Art. e0197642. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0197642>
8. Гуляев С. А. Электроэнцефалография и исследования функциональной активности головного мозга // Русский журнал детской неврологии. 2021. Т. 16, № 4. С. 59–68. <https://doi.org/10.17650/2073-8803-2021-16-4-59-68>
9. Мельникова Т. С., Лапин И. А., Саркисян В. В. Обзор использования когерентного анализа ЭЭГ в психиатрии // Социальная и клиническая психиатрия. 2009. Т. 19, № 1. С. 90–94. EDN: KDYEXZ
10. Nunez P. L., Srinivasan R. Electric fields of the brain: The neurophysics of EEG. Oxford : Oxford University Press, 2006. 611 p. <https://doi.org/10.1093/acprof:oso/9780195050387.001.0001>
11. Kuc A., Korchagin S., Maksimenko V. A., Shusharina N., Hramov A. E. Combining statistical analysis and machine learning for EEG scalp topograms classification // Front. Syst. Neurosci. 2021. Vol. 15. Art. 716897. <https://doi.org/10.3389/fnsys.2021.716897>
12. Steriade M. Grouping of brain rhythms in corticothalamic systems // Neuroscience. 2006. Vol. 137, № 4. P. 1087–1106. <https://doi.org/10.1016/j.neuroscience.2005.10.029>
13. Павлов А. Н., Храмов А. Е., Короновский А. А., Ситникова Е. Ю., Макаров В. А., Овчинников А. А. Вейвлет-анализ в нейродинамике // Успехи физических наук. 2012. Т. 182, № 9. С. 905–939. <https://doi.org/10.3367/UFGN.0182.201209a.0905>
14. Гордлеева С. Ю., Лобов С. А., Миронов В. И., Ка-стальский И. А., Лукьянов М. В., Крылова Н. П., Мухина И. В., Каплан А. Я., Казанцев В. Б. Разработка аппаратно-программного комплекса по управлению роботизированными устройствами посредством био-электрических сигналов мозга и мышц // Наука и инновации в медицине. 2016. Т. 1, № 3. С. 77–82. <https://doi.org/10.35693/2500-1388-2016-0-3-77-82>
15. Gordleeva S. Y., Lobov S. A., Mironov V. I., Kastal'skiy I. A., Lukoyanov M. V., Krylova N. P., Mukhina I. V., Kaplan A. Ya., Kazantsev V. B. Real-time EEG–EMG human–machine interface-based control system for a lower-limb exoskeleton // IEEE Access. 2020. Vol. 8. P. 84070–84081. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2991812>



16. Aladjalova N. A. Infra-slow rhythmic oscillations of the steady potential of the cerebral cortex // *Nature*. 1957. Vol. 179, iss. 4567. P. 957–959. <https://doi.org/10.1038/179957a0>
17. Knyazev G. G. EEG delta oscillations as a correlate of basic homeostatic and motivational processes // *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*. 2012. Vol. 36, iss. 1. P. 677–695. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2011.10.002>
18. Lőrincz M. L., Geall F., Bao Y., Crunelli V., Hughes S. W. ATP-dependent infra-slow (<0.1 Hz) oscillations in thalamic networks // *PLoS ONE*. 2009. Vol. 4, iss. 2. Art. e4447. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0004447>
19. Karavaev A. S., Kiselev A. R., Runnova A. E., Zhuravlev M. O., Borovkova E. I., Prokhorov M. D., Hramov A. E. Synchronization of infra-slow oscillations of brain potentials with respiration // *Chaos*. 2018. Vol. 28, iss. 8. Art. 081102. <https://doi.org/10.1063/1.5046758>
20. Borovkova E. I., Prokhorov M. D., Kiselev A. R., Hramkov A. N., Mironov S. A., Penzel T. Directional couplings between the respiration and parasympathetic control of the heart rate during sleep and wakefulness in healthy subjects at different ages // *Frontiers in Network Physiology*. 2022. Vol. 2. Art. 942700. <https://doi.org/10.3389/fnetp.2022.942700>
21. Ponomarenko V. I., Karavaev A. S., Borovkova E. I., Hramkov A. N., Penzel T. Decrease of coherence between the respiration and parasympathetic control of the heart rate with aging // *Chaos*. 2021. Vol. 31, iss. 7. Art. 073105. <https://doi.org/10.1063/5.0056624>
22. Karavaev A. S., Skazkina V. V., Borovkova E. I., Prokhorov M. D., Penzel T. Synchronization of the processes of autonomic control of blood circulation in humans is different in the awake state and in sleep stages // *Frontiers in Neuroscience*. 2022. Vol. 15. Art. 791510. <https://doi.org/10.3389/fnins.2021.791510>
23. Prokhorov M. D., Borovkova E. I., Hramkov A. N., Karavaev A. S. Changes in the power and coupling of infra-slow oscillations in the signals of EEG leads during stress-inducing cognitive tasks // *Applied Sciences*. 2023. Vol. 13, iss. 14. Art. 8390. <https://doi.org/10.3390/app13148390>
24. Borovkova E. I., Hramkov A. N., Dubinkina E. S., Prokhorov M. D. Biomarkers of the psychophysiological state during cognitive tasks estimated from the signals of the brain, cardiovascular and respiratory systems // *Eur. Phys. J. Spec. Top.* 2023. Vol. 232, № 5. P. 625–633. <https://doi.org/10.1140/epjs/s11734-022-00734-z>
25. Paluš M. Nonlinearity in normal human EEG: Cycles, temporal asymmetry, nonstationarity and randomness, not chaos // *Biological Cybernetics*. 1996. Vol. 75, № 5. P. 389–396. <https://doi.org/10.1007/s004220050304>
26. Gribkov D., Gribkova V. Learning dynamics from nonstationary time series: Analysis of electroencephalograms // *Phys. Rev. E*. 2000. Vol. 61, № 6. P. 6538–6545. <https://doi.org/10.1103/physreve.61.6538>
27. Каплан А. Я. Нестационарность ЭЭГ: методологический и экспериментальный анализ // *Успехи физиологических наук*. 1998. Т. 29, № 3. С. 50–55. PMID: 9749456
28. Kohlmorgen J., Müller K.-R., Pawelzik K., Rittweger J. Identification of nonstationary dynamics in physiological recordings // *Biological Cybernetics*. 2000. Vol. 83, № 1. P. 73–84. <https://doi.org/10.1007/s004220000144>
29. Dikanov T., Smirnov D., Wennberg R., Velazquez J. L. P., Bezruchko B. EEG nonstationarity during intracranially recorded seizures: Statistical and dynamical analysis // *Clinical Neurophysiology*. 2005. Vol. 116, iss. 8. P. 1796–1807. <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2005.04.013>
30. Task Force of the European Society of Cardiology and the North American Society of Pacing and Electrophysiology. Heart rate variability: Standards of measurement, physiological interpretation, and clinical use // *Circulation*. 1996. Vol. 93, iss. 5. P. 1043–1065. <https://doi.org/10.1161/01.CIR.93.5.1043>
31. Баевский Р. М., Иванов Г. Г., Чирейкин Л. В., Гаврилушкин А. П., Довгалецкий П. Я., Кукушкин Ю. А., Миронова Т. Ф., Прилуцкий Д. А., Семенов А. В., Федоров В. Ф., Флейшман А. Н., Медведев М. М., Чирейкин Л. В. Анализ вариабельности сердечного ритма при использовании различных электрокардиографических систем (часть 1) // *Вестник аритмологии*. 2002. № 24. С. 65–86.
32. Медимком МТД. Электроэнцефалограф-регистратор. URL: <http://medicom-mtd.com/htm/Products/eegr-main.html> (дата обращения: 14.10.2025).
33. Ishbulatov Y. M., Karavaev A. S., Kiselev A. R., Simonyan M. A., Prokhorov M. D., Ponomarenko V. I., Mironov S. A., Gridnev V. I., Bezruchko B. P., Shvartz V. A. Mathematical modeling of cardiovascular autonomic control in healthy subjects during a passive head-up tilt test // *Scientific Reports*. 2020. Vol. 10, iss. 1. Art. 16550. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-71532-7>
34. Prokhorov M. D., Karavaev A. S., Ishbulatov Y. M., Ponomarenko V. I., Kiselev A. R., Kurths J. Interbeat interval variability versus frequency modulation of heart rate // *Phys. Rev. E*. 2021. Vol. 103, № 4. Art. 042404. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.103.042404>
35. Rousseeuw P. J. Silhouettes: A graphical aid to the interpretation and validation of cluster analysis // *Journal of Computational and Applied Mathematics*. 1987. Vol. 20. P. 53–65. [https://doi.org/10.1016/0377-0427\(87\)90125-7](https://doi.org/10.1016/0377-0427(87)90125-7)
36. Blanco S., Garcia H., Quiroga R. Q., Romanelli L., Rosso O. A. Stationarity of the EEG series // *IEEE Engineering in Medicine and Biology Magazine*. 1995. Vol. 14, iss. 4. P. 395–399. <https://doi.org/10.1109/51.395321>

References

1. Zenkov L. R. *Klinicheskaya elektroencefalografiya (s elementami epileptologii). Rukovodstvo dlya vrachey [Clinical Electroencephalography (with Elements of Epileptology). Guide for Physicians]*. Moscow, MEDpress-inform Publ., 2023. 360 p. (in Russian).
2. Aleksandrov M. V., Ivanov L. B., Lytayev S. A., Cherny V. S., Aleksandrova T. V., Chukhlovina A. A., Kostenko I. A., Povalukhina E. S. *Elektroencefalografiya: rukovodstvo [Electroencephalography: A guide]*. Saint Petersburg, SpetsLit Publ., 2020. 224 p. (in Russian).



3. Sitnikova E. Yu., Koronovskii A. A., Hramov A. E. Analysis of epileptic activity of brain in case of absence epilepsy: Applied aspects of nonlinear dynamics. *Izvestiya VUZ. Applied Nonlinear Dynamics*, 2011, vol. 19, no. 6, pp. 173–182. <https://doi.org/10.18500/0869-6632-2011-19-6-173-182> (in Russian).
4. Zhang H., Zhou Q., Qi C., Chen H., Hu X., Li W., Bai Y., Han J., Wang Y., Liang Z., Chen D., Cong F., Yan J., Li X. The applied principles of EEG analysis methods in neuroscience and clinical neurology. *Military Medical Research*, 2023, vol. 10, art. 67. <https://doi.org/10.1186/s40779-023-00502-7>
5. Simonov A. Y., Kazantsev V. B. Model of the appearance of avalanche bioelectric discharges in neural networks of the brain. *JETP Lett.*, 2011, vol. 93, pp. 470–475. <https://doi.org/10.1134/S0021364011080133>
6. Thornton J., D'Souza R., Tandon R. Artificial intelligence and psychiatry research and practice. *Asian J. Psychiatr.*, 2023, vol. 81, art. 103509. <https://doi.org/10.1016/j.ajp.2023.103509>
7. Maksimenko V. A., Runnova A. E., Zhuravlev M. O., Protasov P., Kulanin R., Pisarchik A. N., Hramov A. E., Khramova M. V. Human personality reflects spatio-temporal and time-frequency EEG structure. *PLoS ONE*, 2018, vol. 13, iss. 9, art. e0197642. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0197642>
8. Gulyaev S. A. Electroencephalography and analysis of functional brain activity. *Russ. J. Child Neurol.*, 2021, vol. 16, no. 4, pp. 59–68 (in Russian). <https://doi.org/10.17650/2073-8803-2021-16-4-59-68>
9. Melnikova T. S., Lapin I. A., Sarkisyan V. V. Use of coherent EEG analysis in psychiatry. *Soc. Clin. Psychiatry*, 2009, vol. 19, no. 1, pp. 90–94 (in Russian). EDN: KDYEXZ
10. Nunez P. L., Srinivasan R. *Electric Fields of the Brain: The Neurophysics of EEG*. Oxford, Oxford University Press, 2006. 611 p. <https://doi.org/10.1093/acprof:oso/9780195050387.001.0001>
11. Kuc A., Korchagin S., Maksimenko V. A., Shusharina N., Hramov A. E. Combining statistical analysis and machine learning for EEG scalp topograms classification. *Front. Syst. Neurosci.*, 2021, vol. 15, art. 716897. <https://doi.org/10.3389/fnsys.2021.716897>
12. Steriade M. Grouping of brain rhythms in corticothalamic systems. *Neuroscience*, 2006, vol. 137, iss. 4, pp. 1087–1106. <https://doi.org/10.1016/j.neuroscience.2005.10.029>
13. Pavlov A. N., Hramov A. E., Koronovskii A. A., Sitnikova E. Yu., Makarov V. A., Ovchinnikov A. A. Wavelet analysis in neurodynamics. *Phys. Usp.*, 2012, vol. 55, pp. 845–875. <https://doi.org/10.3367/UFNe.0182.201209a.0905>
14. Gordileeva S. Y., Lobov S. A., Mironov V. I., Kastalskiy I. A., Lukoyanov M. V., Krilova N. P., Mukhina I. V., Kaplan A. Y., Kazantsev V. B. Development of the hardware and software complex controlling robotic devices by means of bioelectric signals of the brain and muscles. *Nauka i Innovatsii v Meditsine [Science and Innovations in Medicine]*, 2016, vol. 1, no. 3, pp. 77–82 (in Russian). <https://doi.org/10.35693/2500-1388-2016-0-3-77-82>
15. Gordileeva S. Y., Lobov S. A., Mironov V. I., Kastalskiy I. A., Lukoyanov M. V., Krylova N. P., Mukhina I. V., Kaplan A. Ya., Kazantsev V. B. Real-time EEG–EMG human–machine interface-based control system for a lower-limb exoskeleton. *IEEE Access*, 2020, vol. 8, pp. 84070–84081. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2991812>
16. Aladjalova N. A. Infra-slow rhythmic oscillations of the steady potential of the cerebral cortex. *Nature*, 1957, vol. 179, iss. 4567, pp. 957–959. <https://doi.org/10.1038/179957a0>
17. Knyazev G. G. EEG delta oscillations as a correlate of basic homeostatic and motivational processes. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 2012, vol. 36, iss. 1, pp. 677–695. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2011.10.002>
18. Lörincz M. L., Geall F., Bao Y., Crunelli V., Hughes S. W. ATP-dependent infra-slow (<0.1 Hz) oscillations in thalamic networks. *PLoS ONE*, 2009, vol. 4, iss. 2, art. e4447. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0004447>
19. Karavaev A. S., Kiselev A. R., Runnova A. E., Zhuravlev M. O., Borovkova E. I., Prokhorov M. D., Hramov A. E. Synchronization of infra-slow oscillations of brain potentials with respiration. *Chaos*, 2018, vol. 28, iss. 8, art. 081102. <https://doi.org/10.1063/1.5046758>
20. Borovkova E. I., Prokhorov M. D., Kiselev A. R., Hramkov A. N., Mironov S. A., Penzel T. Directional couplings between the respiration and parasympathetic control of the heart rate during sleep and wakefulness in healthy subjects at different ages. *Frontiers in Network Physiology*, 2022, vol. 2, art. 942700. <https://doi.org/10.3389/fnetp.2022.942700>
21. Ponomarenko V. I., Karavaev A. S., Borovkova E. I., Hramkov A. N., Penzel T. Decrease of coherence between the respiration and parasympathetic control of the heart rate with aging. *Chaos*, 2021, vol. 31, iss. 7, art. 073105. <https://doi.org/10.1063/5.0056624>
22. Karavaev A. S., Skazkina V. V., Borovkova E. I., Prokhorov M. D., Penzel T. Synchronization of the processes of autonomic control of blood circulation in humans is different in the awake state and in sleep stages. *Frontiers in Neuroscience*, 2022, vol. 15, art. 791510. <https://doi.org/10.3389/fnins.2021.791510>
23. Prokhorov M. D., Borovkova E. I., Hramkov A. N., Karavaev A. S. Changes in the power and coupling of infra-slow oscillations in the signals of EEG leads during stress-inducing cognitive tasks. *Applied Sciences*, 2023, vol. 13, iss. 14, art. 8390. <https://doi.org/10.3390/app13148390>
24. Borovkova E. I., Hramkov A. N., Dubinkina E. S., Prokhorov M. D. Biomarkers of the psychophysiological state during cognitive tasks estimated from the signals of the brain, cardiovascular and respiratory systems. *Eur. Phys. J. Spec. Top.*, 2023, vol. 232, iss. 5, pp. 625–633. <https://doi.org/10.1140/epjs/s11734-022-00734-z>
25. Paluš M. Nonlinearity in normal human EEG: Cycles, temporal asymmetry, nonstationarity and randomness, not chaos. *Biological Cybernetics*, 1996, vol. 75, no. 5, pp. 389–396. <https://doi.org/10.1007/s004220050304>
26. Gribkov D., Gribkova V. Learning dynamics from nonstationary time series: Analysis of electroencephalograms.



- Phys. Rev. E*, 2000, vol. 61, no. 6, pp. 6538–6545. <https://doi.org/10.1103/physreve.61.6538>
27. Kaplan A. Ya. The nonstationary EEG: Methodological and experimental analysis // *Usp. Fiziol. Nauk*, 1998, vol. 29, no. 3, pp. 35–55 (in Russian). PMID: 9749456
28. Kohlmorgen J., Müller K.-R., Pawelzik K., Rittweger J. Identification of nonstationary dynamics in physiological recordings. *Biological Cybernetics*, 2000, vol. 83, no. 1, pp. 73–84. <https://doi.org/10.1007/s004220000144>
29. Dikanov T., Smirnov D., Wennberg R., Velazquez J. L. P., Bezruchko B. EEG nonstationarity during intracranially recorded seizures: Statistical and dynamical analysis. *Clinical Neurophysiology*, 2005, vol. 116, iss. 8, pp. 1796–1807. <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2005.04.013>
30. Task Force of the European Society of Cardiology and the North American Society of Pacing and Electrophysiology. Heart rate variability: Standards of measurement, physiological interpretation, and clinical use. *Circulation*, 1996, vol. 93, iss. 5, pp. 1043–1065. <https://doi.org/10.1161/01.CIR.93.5.1043>
31. Baevskiy R. M., Ivanov G. G., Chireykin L. V., Gavrilushkin A. P., Dovgalevsky P. Ya., Kukushkin Yu. A., Mironova T. F., Prilutsky D. A., Semenov A. V., Fedorov V. F., Fleishman A. N., Medvedev M. M., Chireikin L. V. Analysis of heart rate variability under using various electrocardiographic systems (Part 1). *Vestnik Aritmologii*, 2002, no. 24, pp. 65–86.
32. *Medicom MTD. Electroencephalograph-recorder*. Available at: <http://medicom-mtd.com/htm/Products/eeg-main.html> (accessed October 14, 2025).
33. Ishbulatov Y. M., Karavaev A. S., Kiselev A. R., Simonyan M. A., Prokhorov M. D., Ponomarenko V. I., Mironov S. A., Gridnev V. I., Bezruchko B. P., Shvartz V. A. Mathematical modeling of cardiovascular autonomic control in healthy subjects during a passive head-up tilt test. *Scientific Reports*, 2020, vol. 10, iss. 1, art. 16550. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-71532-7>
34. Prokhorov M. D., Karavaev A. S., Ishbulatov Y. M., Ponomarenko V. I., Kiselev A. R., Kurths J. Interbeat interval variability versus frequency modulation of heart rate. *Phys. Rev. E*, 2021, vol. 103, no. 4, art. 042404. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.103.042404>
35. Rousseeuw P. J. Silhouettes: A graphical aid to the interpretation and validation of cluster analysis. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 1987, vol. 20, pp. 53–65. [https://doi.org/10.1016/0377-0427\(87\)90125-7](https://doi.org/10.1016/0377-0427(87)90125-7)
36. Blanco S., Garcia H., Quiroga R. Q., Romanelli L., Rosso O. A. Stationarity of the EEG series. *IEEE Engineering in Medicine and Biology Magazine*, 1995, vol. 14, iss. 4, pp. 395–399. <https://doi.org/10.1109/51.395321>

Поступила в редакцию 01.07.2025; одобрена после рецензирования 24.08.2025;
принята к публикации 10.09.2025; опубликована 28.11.2025

The article was submitted 01.07.2025; approved after reviewing 24.08.2025;
accepted for publication 10.09.2025; published 28.11.2025