

ISSN 2077-8333 (print)
ISSN 2311-4088 (online)

ЭПИЛЕПСИЯ и пароксизмальные состояния

2025 Том 17 №2



EPILEPSY AND PAROXYSMAL CONDITIONS

2025 Vol. 17 №2

<https://epilepsia.su>

Данная интернет-версия статьи была скачана с сайта <http://www.epilepsia.su>. Не предназначено для использования в коммерческих целях.
Информацию о репринтах можно получить в редакции. Тел.: +7 (495) 649-54-95; эл. почта: info@irbis-1.ru.



Микросостояния ABCD: новое слово в математическом анализе ЭЭГ

А.А. Иванов

Общество с ограниченной ответственностью «Нейрософт» (ул. Воронина, д. 5, Иваново 153032, Россия)

Для контактов: Алексей Алексеевич Иванов, e-mail: iva@neurosoft.com

РЕЗЮМЕ

Электроэнцефалография (ЭЭГ) – эффективный метод изучения электрофизиологии мозга с высоким временным разрешением. С появлением компьютерных электроэнцефалографов начали активно развиваться и математические методы обработки ЭЭГ. Некоторые из них нашли применение в современной клинической практике, часть используется в системах «мозг – компьютер», отдельные алгоритмы подходят только для научных исследований, другие вовсе не показали свою эффективность и сейчас не востребованы. В данном материале представлен обзор довольно нового подхода к математической обработке ЭЭГ-сигналов, который позволяет не только проводить диагностику функционального состояния головного мозга, но и прогнозировать исходы лечения пациентов в критическом состоянии в отделениях реанимации и интенсивной терапии. Речь пойдет о микросостояниях ABCD.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

микросостояния ABCD, электроэнцефалография, количественная электроэнцефалография, математический анализ, программное обеспечение

Для цитирования

Иванов А.А. Микросостояния ABCD: новое слово в математическом анализе ЭЭГ. *Эпилепсия и пароксизмальные состояния*. 2025; 17 (2): 243–250. <https://doi.org/10.17749/2077-8333/epi.par.con.2025.212>.

ABCD microstates: a new word in EEG mathematical analysis

A.A. Ivanov

Neurosoft LLC (5 Voronin Str., Ivanovo 153032, Russia)

Corresponding author: Alexey A. Ivanov, e-mail: iva@neurosoft.com

ABSTRACT

With the advent of computer electroencephalographs, mathematical methods for EEG processing began to actively develop, some of which have found their application in current clinical practice, others – in brain-computer systems, some algorithms are used only in scientific research, whereas the remaining have shown inefficiency and become undemanded. Here, a fairly new approach to the mathematical processing of EEG signals is overviewed that allows not only to diagnose brain functional state, but also to predict the treatment outcomes in critically ill patients in intensive care units. Particularly, ABCD microstates will be discussed.

KEYWORDS

ABCD microstates, electroencephalography, quantitative electroencephalography, mathematical analysis, software

For citation

Ivanov A.A. ABCD microstates: a new word in EEG mathematical analysis. *Epilepsia i paroksizmal'nye sostoania / Epilepsy and Paroxysmal Conditions*. 2025; 17 (2): 243–250 (in Russ.). <https://doi.org/10.17749/2077-8333/epi.par.con.2025.212>.

ВВЕДЕНИЕ / INTRODUCTION

Электроэнцефалография (ЭЭГ) – эффективный метод изучения электрофизиологии мозга с высоким временным разрешением [1]. С появлением компьютерных электроэнцефалографов [2] начали активно развиваться и математические методы обработки ЭЭГ [3]. Некоторые из них нашли применение в современной клинической практике, часть используется в системах «мозг – компьютер», отдельные математические алгоритмы в настоящее время используются только в научных исследованиях и, если покажут свою эффективность, будут востребованы в клинической практике. В данном материале представлен обзор довольно нового подхода к математической обработке ЭЭГ-сигналов, который позволяет не только проводить диагностику функционального состояния головного мозга, но и прогнозировать исходы лечения пациентов в критическом состоянии в отделениях реанимации и интенсивной терапии (ОРИТ). Речь пойдет о микросостояниях ABCD [4–7].

Визуальный анализ ЭЭГ-сигналов на сегодняшний день остается «золотым стандартом» в оценке ЭЭГ и диагностике функционального состояния головного мозга человека. Однако в ряде случаев провести визуальный просмотр длительных ЭЭГ-обследований не представляется возможным из-за сжатых сроков или в условиях дефицита кадров. В таких случаях на помощь врачу могут прийти математические методы обработки ЭЭГ-сигналов. Просмотр длительных обследований требует много времени, а с применением математической обработки несколько часов ЭЭГ-записи можно представить на одном экране компьютера, тем самым ускорив анализ данных.

Одним из таких полезных инструментов является тренд амплитудно-интегрированной ЭЭГ [8], который активно применяется не только в неонатологических палатах интенсивной терапии, но и во взрослых ОРИТ (рис. 1). На данном тренде отображается несколько часов записи. Можно быстро оценить минимальную и максимальную амплитуды во время обследования, отследить динамику состояния пациента.

Относительно новый подход к математическому анализу ЭЭГ получил название «микросостояния ABCD» [4, 9].

ОПИСАНИЕ МЕТОДА / METHOD DESCRIPTION

Первые упоминания о методе оценки микросостояний ЭЭГ в литературе появились в 2014 г. [5]. Впоследствии он получил развитие и начал применяться в виде трендов, которые позволили быстро оценивать функциональное состояние головного мозга у критически больных пациентов в ОРИТ [5–7].

Такой анализ рассматривает многоканальную запись ЭЭГ как серию квазистабильных микросостояний, каждое из которых характеризуется уникальной топографией электрических потенциалов по всему массиву каналов. Поскольку этот метод одновременно учитывает сигналы, записанные со всех областей коры по системе «10–20%» [10, 11], он способен оценить функцию крупных сетей мозга, нарушение работы которых связано с рядом нервно-психических расстройств.

Изначально модель ABCD была создана для описания состояния центральной части таламуса по категориям:

– А, В – спокойное;



Рисунок 1. Пример тренда амплитудно-интегрированной электроэнцефалографии

Figure 1. Representative trend of amplitude-integrated electroencephalography

Практические и технические аспекты ЭЭГ / EEG practical and technical aspects

- С – вспышки;
- D – тонические импульсы.

На графиках спектра мощности ABCD-состояния можно разделить по доминирующим полосам частот и их суммарной мощности [9] (рис. 2).

В научных исследованиях предпринимались попытки использовать модель ABCD для диагностики таких расстройств, как аутизм, шизофрения, деменция, паническое расстройство, но свою эффективность она показала пока только в диагностике и прогнозировании состояния критически больных пациентов в ОРИТ. По доминантному микросостоянию можно понять состояние мозга больного [7] (рис. 3):

- А – вегетативное состояние / синдром невосприимчивого бодрствования;
- В – вегетативное состояние / синдром невосприимчивого бодрствования / состояние минимального сознания;

- С – состояние минимального сознания / нормальное состояние;
- D – нормальное состояние / здоров.

В психиатрии, например, анализируются не только доминирующие микросостояния ABCD, но и переходы из одного состояния в другое (рис. 4) [4].

КЛИНИЧЕСКИЕ ПРИМЕРЫ / CLINICAL EXAMPLES

Для лучшего понимания механизма работы данной модели ниже будут рассмотрены клинические примеры, иллюстрирующие различные состояния.

Пример 1 / Example 1

Здоровый обследуемый, на ЭЭГ преобладает альфа-ритм ~11 Гц в затылочной области, микросостояние D за-

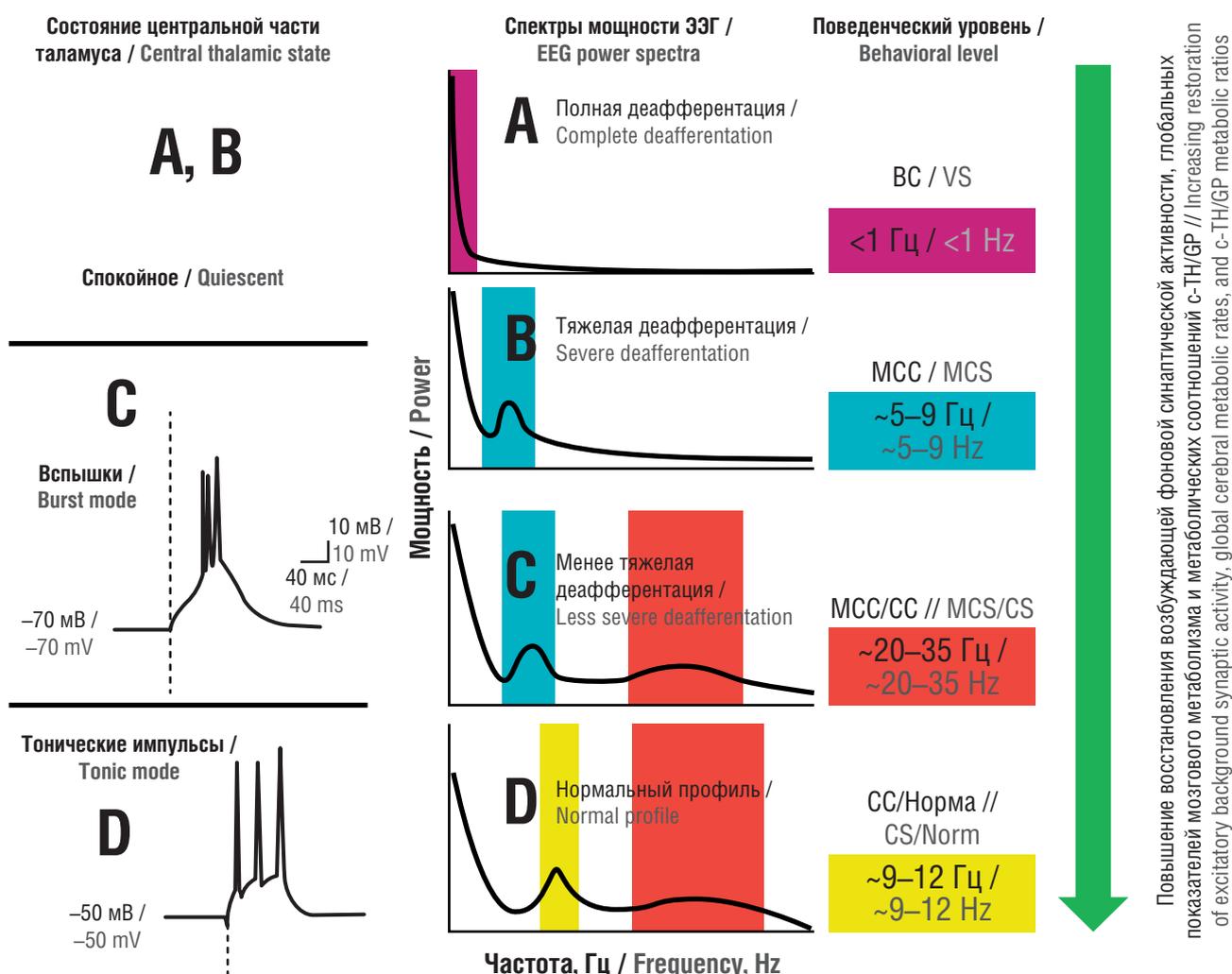


Рисунок 2. На графиках спектра мощности ABCD-состояния можно разделить по доминирующим полосам частот и их суммарной мощности (адаптировано из [9]).

ЭЭГ – электроэнцефалография; BC – вегетативное состояние; CC – сознательное состояние; MCC – минимально сознательное состояние; c-TN (англ. central thalamus) – центральная часть таламуса; GP (лат. *globus pallidus*) – бледный шар

Figure 2. Power spectrum plots showing dominant frequency band and total power-driven ABCD states distribution (adapted from [9]). EEG – electroencephalography; VS – vegetative state; CS – conscious state; MCS – minimally conscious state; c-TN – central thalamus; GP – *globus pallidus*

Категория / Category	Спектр мощности ЭЭГ* / EEG power spectrum*	Доминантная частота, Гц / Dominant frequency, Hz	Таламокортикальная связь / Thalamocortical connectivity	Центральная таламическая активность / Central thalamic activity	Неокортикальная активность / Neocortical activity	Поведенческий диагноз / Behavioural diagnoses
A		<1 (синий) / <1 (blue)	Полная деафферентация / Complete deafferentation	Спокойная / Quiescent	«Плитная» динамика / “Slab-like” dynamics	BC/СНБ // VS/UWS
B		~5–9 (бирюзовый) / ~5–9 (turquoise)	Тяжелая деафферентация / Severe deafferentation	Спокойная / Quiescent	Внутренние колебания / Intrinsic oscillations	BC/СНБ/СМС // VS/UWS/MCS
C		~5–9 (бирюзовый) / ~5–9 (turquoise); ~20–35 (оранжевый) / ~20–35 (orange)	Умеренная деафферентация / Moderate deafferentation	Вспышки / Bursting	Высокочастотная активность, вызванная таламическими импульсами / High-frequency activity driven by thalamic bursting	СМС/НС // MCS/CS
D		~8–13 (красный) / ~8–13 (red); ~20–35 (оранжевый) / ~20–35 (orange)	Здоров / Healthy	Тоническая / Tonic	Различные мотивы, вызванные деполяризацией определенных типов клеток неокортекса (например, быстрые ритмические вспышки) / Varying motifs elicited by depolarization of specific neocortical cell types (for example, fast rhythmic bursting)	НС/здоров // CS/healthy

Рисунок 3. По доминантному микросостоянию можно понять состояние мозга пациента в отделении реанимации и интенсивной терапии (адаптировано из [7]).

ЭЭГ – электроэнцефалография; ВС – вегетативное состояние; СНБ – синдром невосприимчивого бодрствования; СМС – состояние минимального сознания; НС – нормальное состояние. * Упрощенные иллюстрации потенциальной мощности

Figure 3. The dominant microstate reflects intensive care unit patient's brain state (adapted from [7]).

EEG – electroencephalography; VS – vegetative state; UWS – unresponsive wakefulness syndrome; MCS – minimally conscious state; CS – conscious state. * Simplified illustrations of potential power

метно доминирует на протяжении всей записи по тренду ABCD (розовый цвет) (рис. 5).

Пример 2 / Example 2

Пациент с подтвержденным диагнозом эпилепсии, на ЭЭГ преобладает альфа-ритм ~10,5 Гц в затылочной области, на некоторых участках записи доминирует микросостояние D по тренду ABCD (розовый цвет), но часто преобладает и микросостояние C (желтый цвет) с доминированием более низких частот тета- и дельта-диапазона (рис. 6).

Пример 3 / Example 3

Пациент в ОРИТ, на ЭЭГ регистрируется медленноволевая активность, есть низкоамплитудная бета-активность, альфа-ритм отсутствует, спутанность сознания. Микросостояние C доминирует в большей части записи согласно тренду (желтый цвет) (рис. 7).

Пример 4 / Example 4

Пациент длительное время находится в ОРИТ, вегетативное состояние, на протяжении всего периода наблюдения преобладает замедленная дельта-активность. Микросостояние A доминирует на всем протяжении записи (фиолетовый цвет) (рис. 8).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ / CONCLUSION

Визуальный анализ ЭЭГ остается самым надежным методом оценки электрической активности головного мозга и диагностики его функционального состояния. Но в условиях ограниченного времени на помощь могут прийти современные математические инструменты, такие как анализ микросостояний ABCD, который позволяет не только оценить текущее состояние центральной нервной системы пациента, но и отследить его динамику и вовремя скорректировать исход лечения.

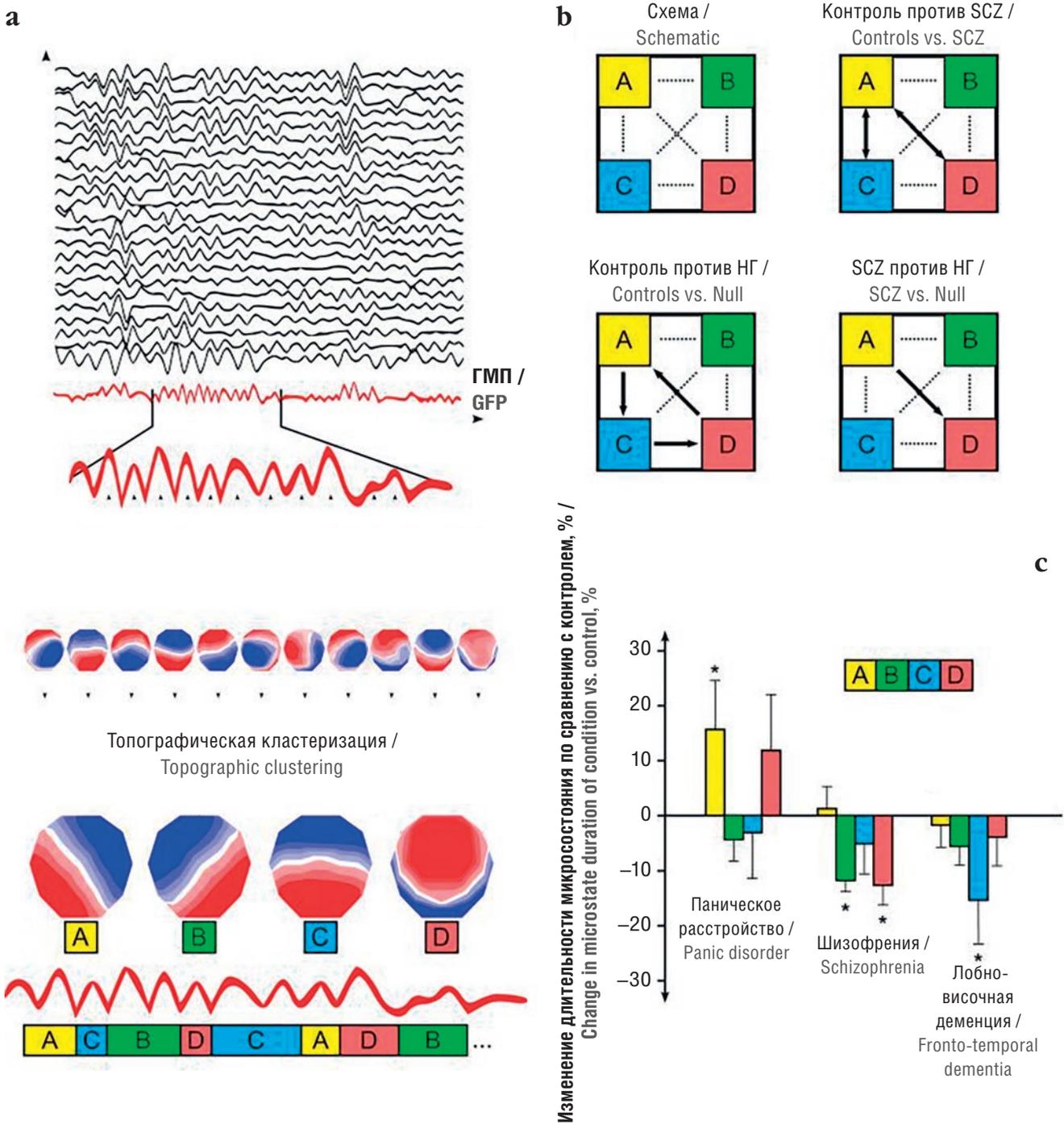


Рисунок 4. В психиатрии анализируются не только доминирующие ABCD-состояния, но и переходы из одного состояния в другое. Например, в исследовании [4] приводится результат сравнения переходов из разных микросостояний в состоянии бодрствования у здоровых лиц и пациентов с диагнозом шизофрении:

а – обработка электроэнцефалограммы, спектральный анализ, топографическая кластеризация и подсчет переходов из одного микросостояния в другое; **б** – сравнение количества переходов из одного микросостояния в другое у пациентов с шизофренией и здоровых лиц; **в** – сравнение количества переходов из одного микросостояния в другое у пациентов с паническими расстройствами, шизофренией и деменцией.

ГМП – глобальная мощность поля; SCZ (англ. schizophrenia) – группа шизофрении; НГ – нулевая гипотеза. * $p < 0,05$

Figure 4. Dominant as well as inter-ABCD state transitions are analyzed in psychiatry. For example, the study [4] compared waking-related transitions from different microstates in healthy individuals and patients diagnosed with schizophrenia:

a – electroencephalogram processing, spectral analysis, topographic clustering and inter-microstate transitions quantitation; **b** – inter-microstate transitions quantitation compared in patients with schizophrenia and healthy individuals; **c** – inter-microstate transitions quantitation compared in patients with panic disorders, schizophrenia and dementia.

GFP – global field power; SCZ – schizophrenia group; Null – null hypothesis. * $p < 0,05$

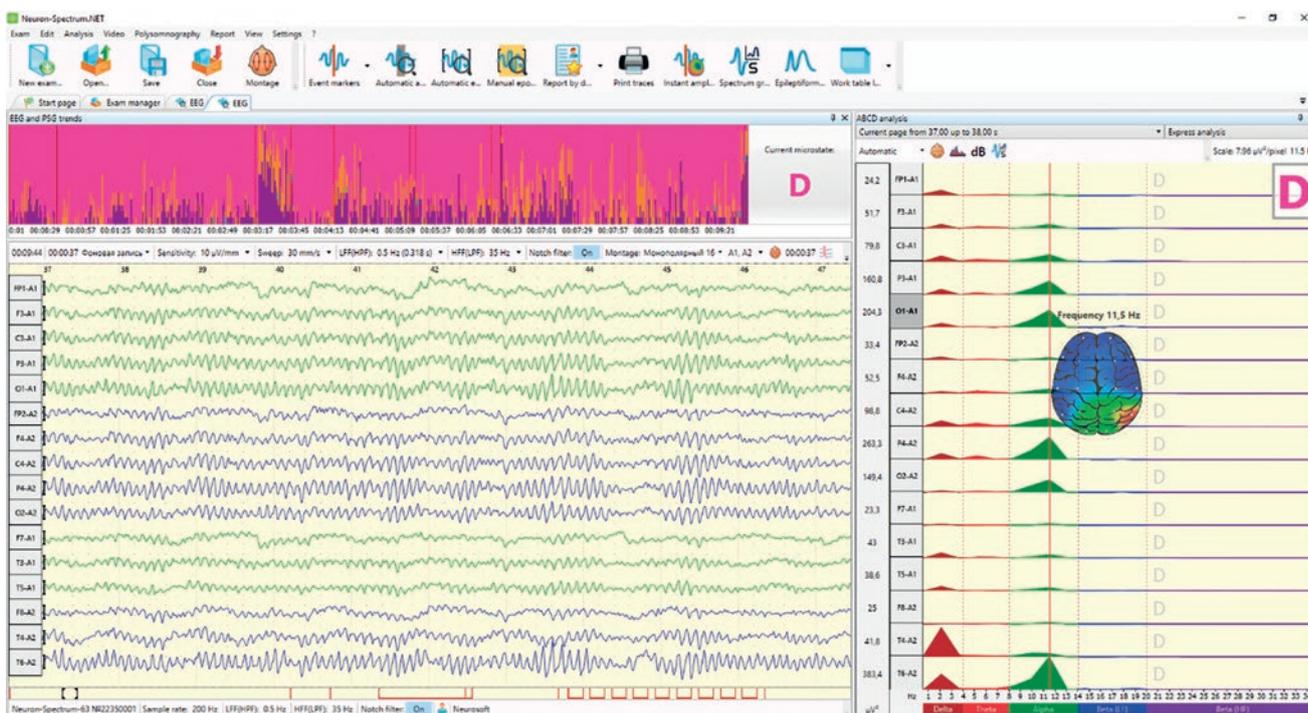


Рисунок 5. Здоровый пациент. Микросостояние D доминирует на протяжении всей записи (розовый цвет)

Figure 5. Healthy individual. Microstate D dominates throughout recording procedure (pink color)

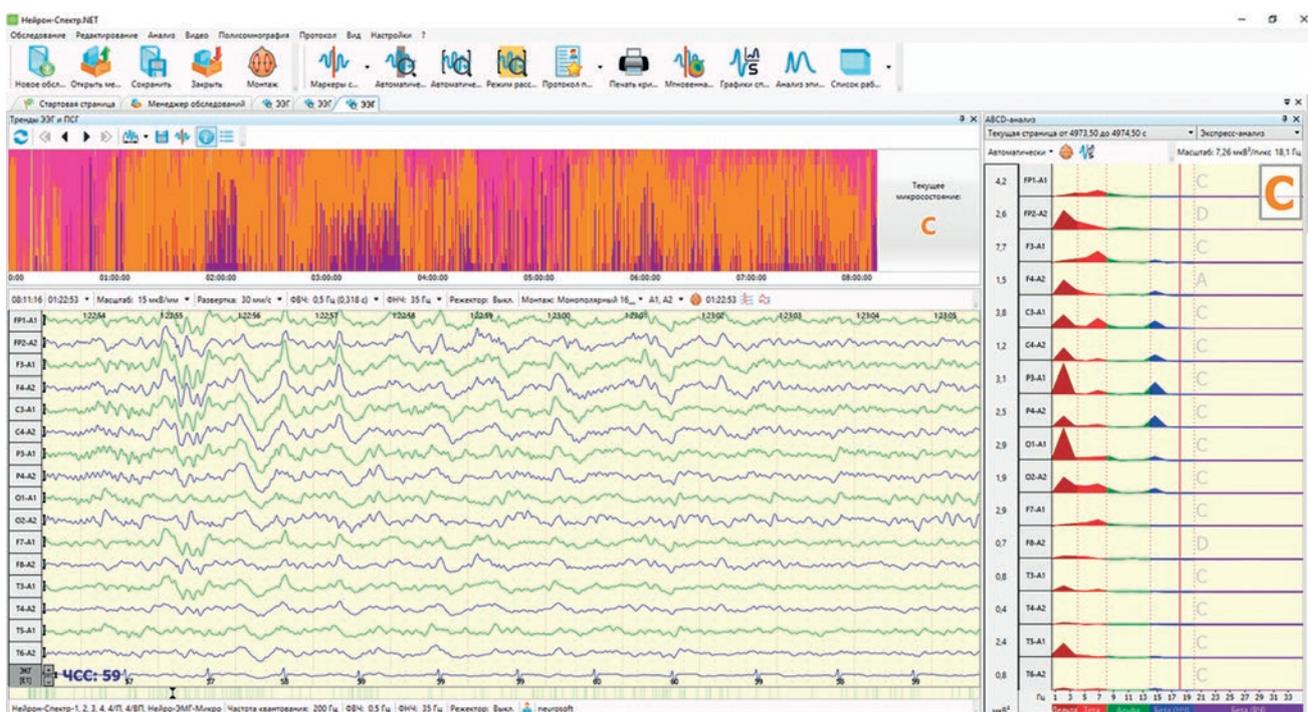


Рисунок 6. Пациент с подтвержденным диагнозом эпилепсии. Наряду с микросостоянием D (розовый цвет) на большей части записи можно видеть доминирование микросостояния C (желтый цвет)

Figure 6. Patient with verified epilepsy. Along with microstate D (pink color), microstate C (yellow color) dominance may be observed throughout most of recording procedure

Практические и технические аспекты ЭЭГ / EEG practical and technical aspects

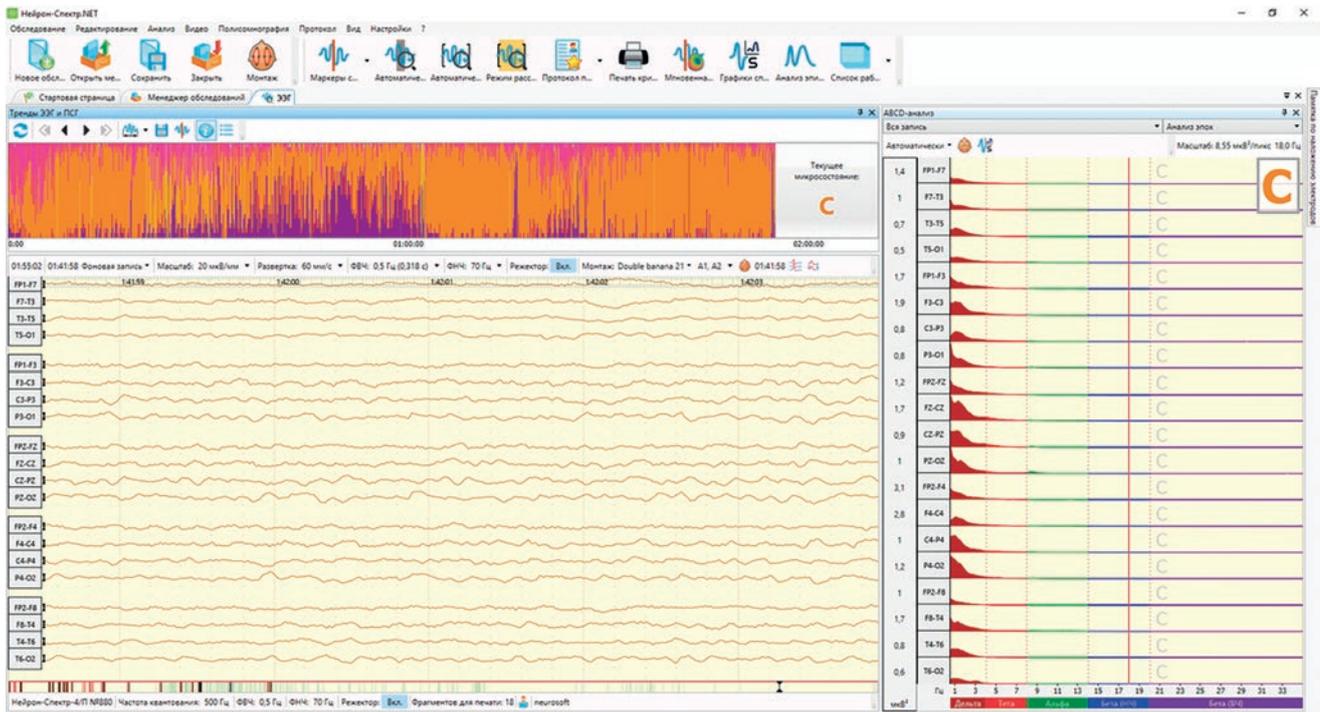


Рисунок 7. Пациент в отделении реанимации и интенсивной терапии. Микросостояние С доминирует в большей части записи согласно тренду (желтый цвет)

Figure 7. Patient in intensive care unit. Trend-based microstate C dominance during most of recording procedure (yellow color)

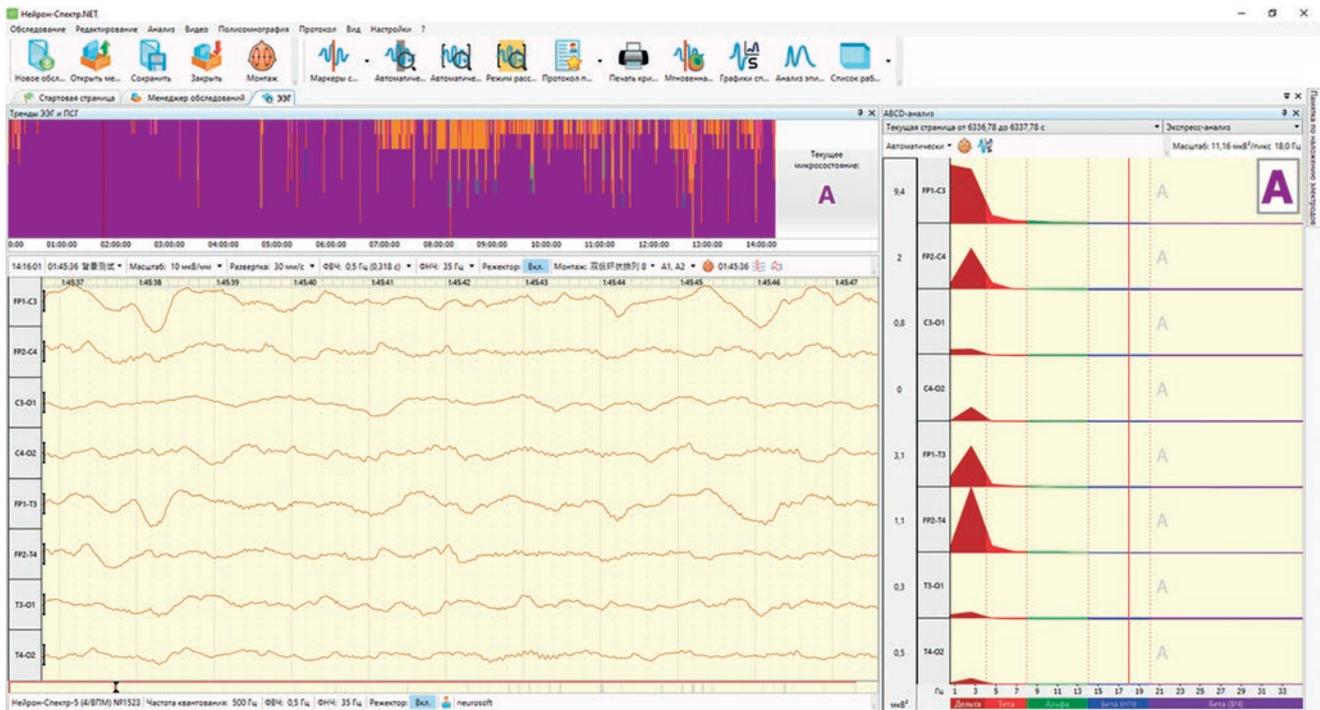


Рисунок 8. Пациент длительное время находится в отделении реанимации и интенсивной терапии, вегетативное состояние. Микросостояние А доминирует при записи по всему тренду (фиолетовый цвет)

Figure 8. Patient long-stayed in intensive care unit, vegetative state. Microstate A dominates recording procedure throughout entire trend period (purple color)

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ	ARTICLE INFORMATION
Поступила: 30.09.2024 В доработанном виде: 10.03.2025 Принята к печати: 21.05.2025 Опубликована: 30.06.2025	Received: 30.09.2024 Revision received: 10.03.2025 Accepted: 21.05.2025 Published: 30.06.2025
Конфликт интересов	Conflict of interests
А.А. Иванов является штатным сотрудником компании «Нейрософт» – российского производителя ЭЭГ-оборудования	A.A. Ivanov is an employee of the Neurosoft company – a Russian manufacturer of EEG equipment
Финансирование	Funding
Автор заявляет об отсутствии финансовой поддержки	The author declares no funding
Этические аспекты	Ethics declarations
Неприменимо	Not applicable
Комментарий издателя	Publisher's note
Содержащиеся в этой публикации утверждения, мнения и данные были созданы ее авторами, а не издательством ИРБИС (ООО «ИРБИС»). Издательство снимает с себя ответственность за любой ущерб, нанесенный людям или имуществу в результате использования любых идей, методов, инструкций или препаратов, упомянутых в публикации	The statements, opinions, and data contained in this publication were generated by the authors and not by IRBIS Publishing (IRBIS LLC). IRBIS LLC disclaims any responsibility for any injury to people or property resulting from any ideas, methods, instructions, or products referred in the content
Права и полномочия	Rights and permissions
© 2025 А.А. Иванов; ООО «ИРБИС» Статья в открытом доступе по лицензии CC BY-NC-SA (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)	© 2025 A.A. Ivanov. Publishing services by IRBIS LLC This is an open access article under CC BY-NC-SA license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Рекомендации экспертного совета по нейрофизиологии Российской Противозпилептической Лиги по проведению рутинной ЭЭГ. *Эпилепсия и пароксизмальные состояния*. 2016; 8 (4): 99–108. Guidelines for carrying out of routine EEG of Neurophysiology Expert Board of Russian League Against Epilepsy. *Epilepsia i paroksizmal'nye sostoania / Epilepsy and Paroxysmal Conditions*. 2016; 8 (4): 99–108 (in Russ.).
2. Иванов А.А. Устройство современного электроэнцефалографа. *Эпилепсия и пароксизмальные состояния*. 2022; 14 (4): 362–78. <https://doi.org/10.17749/2077-8333/epi.par.con.2022.138>. Ivanov A.A. The structure of modern EEG recorder. *Epilepsia i paroksizmal'nye sostoania / Epilepsy and Paroxysmal Conditions*. 2022; 14 (4): 362–78 (in Russ.). <https://doi.org/10.17749/2077-8333/epi.par.con.2022.138>.
3. Иванов А.А. Обзор возможностей современного программного обеспечения для регистрации и анализа ЭЭГ. *Эпилепсия и пароксизмальные состояния*. 2023; 15 (1): 53–69. <https://doi.org/10.17749/2077-8333/epi.par.con.2023.144>. Ivanov A.A. Overview of current software capabilities for EEG recording and analyzing. *Epilepsia i paroksizmal'nye sostoania / Epilepsy and Paroxysmal Conditions*. 2023; 15 (1): 53–69 (in Russ.). <https://doi.org/10.17749/2077-8333/epi.par.con.2023.144>.
4. Khanna A., Pascual-Leone A., Michel C.M., Farzan F. Microstates in resting-state EEG: current status and future directions. *Neurosci Biobehav Rev*. 2015; 49: 105–13. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2014.12.010>.
5. Antonova E., Holding M., Suen H.C. EEG microstates: Functional significance and short-term test-retest reliability. *Neuroimage Rep*. 2022; 2 (2): 100089. <https://doi.org/10.1016/j.jnirp.2022.100089>.
6. D'Croze-Baron D.F., Baker M., Michel C.M. EEG microstates analysis in young adults with autism spectrum disorder during resting-state. *Front Hum Neurosci*. 2019; 13: 173. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2019.00173>.
7. Edlow B.L., Claassen J., Schiff N.D., Greer D.M. Recovery from disorders of consciousness: mechanisms, prognosis and emerging therapies. *Nat Rev Neurol*. 2021; 17 (3): 135–56. <https://doi.org/10.1038/s41582-020-00428-x>.
8. Володин Н.Н. (ред.) Амплитудно-интегрированная электроэнцефалография в оценке функционального состояния центральной нервной системы у новорожденных различного гестационного возраста. Клинические рекомендации. 2015. URL: <https://raspm.ru/files/elektro-encfalografija.pdf> (дата обращения 15.08.2024). Volodin N.N. (Ed.) Amplitude-integrated electroencephalography in the assessment of functional state of central nervous system in newborns of various gestational ages. Clinical guidelines. 2015. Available at: <https://raspm.ru/files/elektro-encfalografija.pdf> (in Russ.) (accessed 15.08.2024).
9. Comanducci A., Boly M., Claassen J., et al. Clinical and advanced neurophysiology in the prognostic and diagnostic evaluation of disorders of consciousness: review of an IFCN-endorsed expert group. *Clin Neurophysiol*. 2020; 131 (11): 2736–65. <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2020.07.015>.
10. Jasper H.H. The ten-twenty electrode system of the International Federation. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol Suppl*. 1958; 10: 371–5.
11. Seeck M., Koessler L., Bast T., et al. The standardized EEG electrode array of the IFCN. *Clin Neurophysiol*. 2017; 128 (10): 2070–7. <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2017.06.254>.

Сведения об авторе / About the author

Иванов Алексей Алексеевич / Alexey A. Ivanov – ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2605-6830>. E-mail: iva@neurosoft.com.