Селезнев Д.А., Иващенков Н.А. Перспективы развития эндоваскулярных нейроинтерфейсов// Международный журнал информационных технологий и энергоэффективности.– 2026. –Т. 11 № 6(68) Ч. 1 с. 79–86

Международный журнал информационных технологий и энергоэффективности

Сайт журнала:
http://www.openaccessscience.ru/index.php/ijcse/



УДК 004.94:004.8

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ЭНДОВАСКУЛЯРНЫХ НЕЙРОИНТЕРФЕЙСОВ

[1]Селезнев Д.А., **[2]Иващенков Н.А.**
ФГАОУ ВО "САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ "ЛЭТИ" ИМ. В.И. УЛЬЯНОВА (ЛЕНИНА)", Санкт-Петербург, Россия (197022, город Санкт-Петербург, ул Профессора Попова, д. 5 литера Ф), e-mail: seleznev_d_a_2001@mail.ru
[2]ФГБОУ ВО "ТАМБОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Г.Р. ДЕРЖАВИНА", Тамбов, Россия (392000, Тамбовская область, город Тамбов, Интернациональная ул., д. 33)

Эндоваскулярные нейроинтерфейсы (EV-BCI) - перспективный класс БКИ, позволяющий записывать и передавать нейронные сигналы через венозную систему мозга без краниотомии. Технология основана на установке стент-мониторов с электродами (например, «Stentrode») в поверхностные мозговые сосуды (обычно верхний сагиттальный синус). Предварительные исследования на животных и первые клинические испытания в парализованных пациентах демонстрируют устойчивую запись и достаточное качество сигналов (сравнимое с субдуральной ЭЭГ) при отсутствии серьёзных осложнений[1][2]. Основные вызовы — риск тромбозов, долговременная стабильность электродов и анатомические вариации сосудов[3]. Современные разработки (например, микропроволочные электродные элементы ~300 мкм с лазерной сваркой[4][5]) направлены на миниатюризацию и повышение биосовместимости устройств. Этические аспекты включают обеспечение безопасности пациента и конфиденциальности мыслей. В целом, EV-BCI открывают новый путь к масштабному применению имплантируемых НИИ для пациентов с нейродегенерацией и травмами спинного мозга, однако требуют дальнейших исследований по оптимизации материалов, алгоритмов обработки сигналов и долгосрочной надежности[6][7].

Ключевые слова: Эндоваскулярный нейроинтерфейс, Stentrode, кровеносные сосуды мозга, биосовместимость, неврологический интерфейс, BCI.

PROSPECTS FOR THE DEVELOPMENT OF ENDOVASCULAR NEUROINTERFACES

[1]Seleznev D.A., **[2]Ivaschenkov N.A**.
[1]ST. PETERSBURG STATE ELECTROTECHNICAL UNIVERSITY "LETI". V.I. ULYANOVA (LENINA), St. Petersburg, Russia (197022, St. Petersburg, Professora Popova str., 5 letter F), e-mail: seleznev_d_a_2001@mail.ru
[2]DERZHAVIN TAMBOV STATE UNIVERSITY, Tambov, Russia (392000, Tambov, Internatsionalnaya str., 33)

Endovascular brain–computer interfaces (BCIs) are an emerging technology enabling neural signal recording and transmission via the cerebral venous system, avoiding craniotomy. A self-expanding stent-electrode array (e.g. “Stentrode”) is delivered through the jugular vein into the superior sagittal sinus adjacent to sensorimotor cortex. Preclinical and early human studies have demonstrated stable long-term recording of motor-related signals, with signal quality comparable to subdural electrocorticography and minimal serious adverse events[1][2]. Key challenges include thrombosis risk, device stability, and anatomical variability[3]. Innovations such as 300 µm laser-welded micro-wire electrodes improve miniaturization[4][5]. Ethical considerations involve patient safety and privacy of neural data. Endovascular BCI holds promise for assisting paralyzed patients, but further work is needed to optimize materials, signal processing, and long-term biocompatibility[6][7].

Keywords: Endovascular neural interface, Stentrode, brain blood vessels, biocompatibility, neurological interface, BCI.

Введение

БКИ (brain–computer interfaces) открывают путь к управлению устройствами силой мысли, однако традиционные инвазивные методики требуют краниотомии и вживления электродов непосредственно в мозг[1]. *Эндоваскулярный БКИ* (EV-BCI) реализует нейронную запись через стенку кровеносного сосуда, что делает процедуру подобной установке стента и снижает травматичность. В частности, устройство «Stentrode» представляет собой тонкоплёночную сетку с электродами (обычно 16 каналов), вводимую через шейную вену и расправляемую в верхнем сагиттальном синусе перед мотонейро-корой[8][9]. На рис.1 показана схема полностью имплантируемой системы EV-BCI, где регистрирующее устройство устанавливается в сосуд и соединено гибким проводом с подшитым под кожу передатчиком[2].

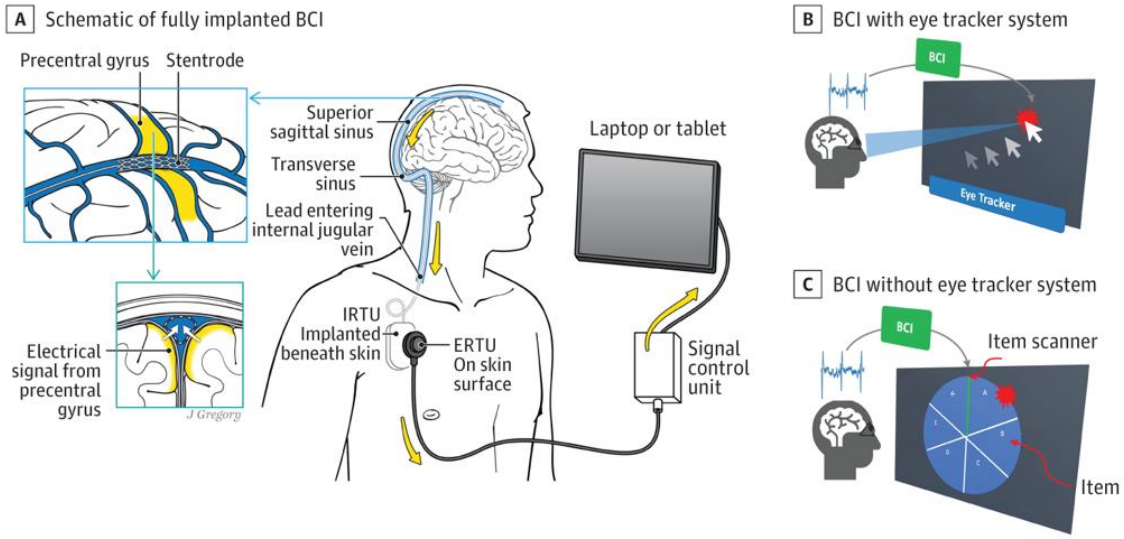


Рисунок 1 - Схематическое устройство эндоваскулярного БКИ: электроды на раскрывающемся стенте устанавливаются в полость кровеносного сосуда мозга, нейронный сигнал через катетер передаётся на подкожный блок, а далее — на внешнее устройство управления. (Иллюстрация по данным Mitchell et al. 2023[2].)

Исследования показывают, что эндоваскулярные БКИ позволяют фиксировать моторные потенциалы и другие корковые ритмы при снижении рисков, связанных с открытой операцией. Так, Ognard et al. (2025) провели систематический обзор 26 исследований EV-BCI и отметили, что «эндоваскулярные БКИ обеспечивают регистрацию через церебральные вены, избегая краниотомии»[1]. При этом в опытах на овцах и первых клинических испытаниях в качестве ALS-пациентов устройство Stentrode продемонстрировало устойчивую запись сигналов в течение месяцев без серьёзных осложнений[10][11]. Качество записи при этом оказалось соизмеримо с субдуральной ЭКоГ[11].

История и первые исследования

Идея эндоваскулярной регистрации нейросигналов восходит к 1970-м годам. Впервые Penn et al. (1973) продемонстрировали запись ЭЭГ кролика с помощью эндоваскулярного электрода, введенного в сосуд[12]. В последующие годы Nakase и др. применили внутриартериальные электроды для мониторинга корковых сигналов у человека[12]. Развитие

методики сдерживала примитивность электродов и риск тромбоза. Ситуация изменилась с появлением самораскрывающихся стентов как основы для электродной решетки. В 2020–2021 гг. группа Окслея (Synchron) сообщила о первых успешных имплантациях Stentrode у людей с БАС (публикация в Lancet Neurol 2021), продемонстрировав работоспособность системы для управления компьютерным интерфейсом.

Технологии и конструирование

Ключевым элементом EV-BCI является *стент-электрод* - тонкий металлический каркас (обычно из нитинола) с прикреплёнными на нём микроэлектродами. При распространении стент фиксируется в просвете сосуда, прижимая электроды к стенке. Аппаратная часть включает пульпостью управления (блок импульсного питания) и беспроводной передатчик. Система Synchron (Stentrode) предусматривает имплантацию блока с радиопередатчиком в подкожную область над грудью, соединенного проводом со стентом. После включения сигнал с электродов по оптике или радиоканалу поступает к внешнему устройству.

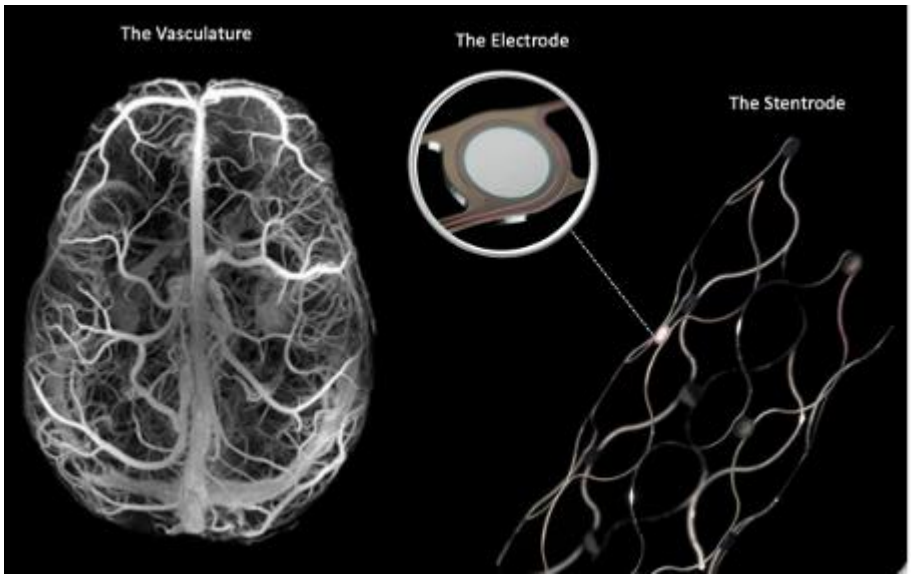


Рисунок 2 - Фотография стент-монитора «Stentrode» с прилегающими электродами (модель от компании Synchron)[8]. Устройство имеет тонкостенный самораскрывающийся каркас с микролитиевыми электродами для эндоваскулярной регистрации биоэлектрических сигналов.

Для повышения компактности разрабатываются новые конструкции. Wen et al. (2023) применили **лазерную сварку** для изготовления микропроводов диаметром ~300 мкм с дисковыми электродами, что уменьшило общий диаметр узла до возможности введения через катетер 0.6–0.8 мм[4][5]. Это обеспечивает низкое импедансное сопротивление и стабильное ионный ток на электродах. Другой подход — гибкие полимерные электродные нити (EP-01) для внутрисосудистой ЭЭГ. Masuda et al. (2025) разработали тонкий (платиновый провод в полимерной оболочке) электрод, способный входить через стандартный микрокатетер. В первом же клиническом опыте EP-01 успешно регистрировал внутрисосудистую ЭЭГ в нескольких синусах мозга у пациента с эпилепсией; амплитуда эндоваскулярной ЭЭГ в 3–4 раза превышала таковую скальповой ЭЭГ[13][14].

Клинические испытания и результаты

Первоначальные клинические испытания EV-BCI проходили в Австралии и США. Ключевым этапом стало исследование SWITCH (Stentrode With Thought-Controlled switch) под руководством Mitchell et al. (2023). В этой серии из 5 пациентов (4 с БАС, 1 с первичной боковой склерозой) стент-электрод был установлен в верхнем сагиттальном синусе и подключен к БКИ-системе. В ходе годового наблюдения *не было зафиксировано ни одного серьёзного осложнения, связанного с устройство*м (тромбозы, кровотечения или неврологические дефициты)[2]. Пациенты смогли эффективно управлять курсором и выполнять задачи набора текста силой мысли: средняя точность «кликов» составляла ~92–93 %, скорость набора до ~13–20 символов в минуту[9][2]. Это свидетельствует о высокой функциональной пригодности системы: ключевые параметры (амплитуда, спектральные характеристики β-ритма во время моторной активности) были стабильны в течение всего года[2], а качество сигнала сравнимо с субдуральными матрицами[15].

Подтверждая безопасность, исследование SWITCH показало, что запись через кровеносный сосуд возможна и эффективна: «Обнаружено, что возможно регистрировать нейронные сигналы из кровеносного сосуда мозга, и благоприятный профиль безопасности этого подхода может способствовать более широкому внедрению БКИ для парализованных пациентов»[7]. Эти результаты согласуются с выводами систематического обзора: EV-BCI *минимизирует инвазивность и имеет эффективность, сравнимую с традиционными методами,* но требует дальнейшего накопления клинических данных[3][6].

Перспективы и новые направления

Перспективы EV-нейроинтерфейсов связаны с расширением клинических приложений и развитием технологии. В качестве регистрационного БКИ они могут быть применены не только при боковом амиотрофическом склерозе, но и у пациентов со спинальной травмой, инсультом или другими двигательными нарушениями. В других исследованиях предлагается использовать эндоваскулярные электроды для *глубокой стимуляции мозга* при неврологических заболеваниях. Например, Opie et al. (2018) показали в овцах, что стимуляция моторной коры через стент-электрод вызывает управляемые мышечные ответы, сопоставимые с прямыми электродами[16]. Это открывает путь к малоинвазивному вмешательству при эпилепсии, болезни Паркинсона и депрессии, хотя прямых клинических испытаний ещё не проводилось.

Технологически важно уменьшать размер электродов, улучшать адгезию к стенке сосуда и разрабатывать биоразлагаемые элементы. Также ведутся работы над закрытыми *имплантируемыми системами* с беспроводной передачей, индуктивным питанием и встроенной обработкой сигналов. Анализ данных с EV-BCI может использовать современные методы машинного обучения, адаптивные алгоритмы декодирования и фильтрацию артефактов.

Проблемы и этические аспекты

Несмотря на успехи, EV-нейроинтерфейсы сталкиваются с серьёзными вызовами. Основной медицинский риск - образование тромбов вокруг импланта, приводящих к окклюзии сосуда. Действительно, один из ключевых выводов обзора: «Ключевые проблемы включают риск тромбоза, долгосрочную стабильность электродов и анатомическую вариабельность»[3].

Для снижения этих рисков требуется тщательный подбор антикоагулянтной терапии, а также оптимизация поверхности электродов (например, покрытие антиплазменным полимером). Долгосрочная надежность - ещё одна проблема: физическая миграция стента или дезактивация электродов могут ухудшить работу интерфейса со временем[3].

Этические вопросы включают информированное согласие пациентов (особенно тяжёлых), конфиденциальность нейроданных и потенциальные психические эффекты (например, изменение ощущений). Требуется сбалансированная оценка «польза/риск», особенно учитывая пожизненный характер имплантации (как «пейсмейкер для мозга»). Развитие регулирующих стандартов также отстаёт от темпа технологий, что вызывает дискуссии об ответственности за возможные сбои БКИ.

Заключение

Эндоваскулярные нейроинтерфейсы представляют собой многообещающее направление нейроинженерии. Их преимущество - минимальная инвазивность при сохранении высокого качества сигналов[1][11]. Полевые испытания показали возможность восстановления коммуникации для парализованных пациентов без серьёзных осложнений[2]. Тем не менее технология находится на ранних этапах: необходимы дополнительные клинические исследования, оптимизация материалов и тщательный мониторинг безопасности[6][7]. В ближайшие годы ожидается расширение числа испытаний (например, многоцентровые и длинносрочные исследования) и внедрение новых технических решений (еще более тонкие и гибкие электроды, автоматические системы контроля). Таким образом, эндоваскулярные нейроинтерфейсы имеют потенциал сделать БКИ более доступными и безопасными, открывая путь к их широкому применению в неврологической реабилитации и нейромедицины.

Список литературы

1. Огнард Дж. и др. Достижения в области эндоваскулярного интерфейса мозг-компьютер: систематический обзор и будущие перспективы // Журнал нейробиологических методов. – 2025. – Т. 420. – С. 110471.
2. Митчелл П. и др. Оценка безопасности полностью имплантированного эндоваскулярного интерфейса мозг-компьютер для лечения тяжелого паралича у 4 пациентов: исследование стентрода с цифровым переключателем, управляемым мыслью (SWITCH) // JAMA неврология. – 2023. – Т. 80. – №. 3. – С. 270-278.
3. Дубинин И. и др. Нейронно-компьютерные интерфейсы: теория, практика, перспективы // Прикладные науки. – 2025. – Т. 15. – №. 16. – С. 8900.
4. Вэнь Б., Шен Л., Кан Х. Лазерная сварка микропроволочного стент-электрода как минимально инвазивный эндоваскулярный нейронный интерфейс //Микромашины. – 2024. – Т. 16. – №. 1. – С. 21.
5. Араки К. и др. Выявление межприступных эпилептиформных разрядов с помощью множественных двусторонних вставок недавно разработанного микрокатетер-совместимого эндоваскулярного электрода электроэнцефалограммы: клиническое исследование осуществимости //Epilepsia Open. – 2025.
6. Солдози С. и др. Систематический обзор эндоваскулярных стент-электродных массивов, минимально инвазивный подход к интерфейсам мозг-машина //Нейрохирургический фокус. – 2020. – Т. 49. – №. 1. – С. E3.

7. Оксли Т. Дж. и др. Моторный нейропротез, имплантированный с помощью нейроинтервенционной хирургии, улучшает способность к выполнению повседневных задач при тяжелом параличе: первый опыт применения у человека //Журнал нейроинтервенционной хирургии. – 2021. – Т. 13. – №. 2. – С. 102-108.
8. Мусси М. Г., Адамс К. Д. Гибридные интерфейсы мозг-компьютер на основе ЭЭГ: обзор с применением существующей таксономии гибридных интерфейсов мозг-компьютер и соображения для педиатрических применений //Frontiers in human neuroscience. – 2022. – Т. 16. – С. 1007136.
9. Лебедев М. А., Николелис М. А. Л. Интерфейсы мозг-машина: прошлое, настоящее и будущее //TRENDS in Neurosciences. – 2006. – Т. 29. – №. 9. – С. 536-546.
10. Аджибойе А. Б. и др. Восстановление движений захвата и хватания посредством стимуляции мышц, управляемой мозгом, у человека с тетраплегией: демонстрация концепции //The Lancet. – 2017. – Т. 389. – №. 10081. – С. 1821-1830.
11. Пандаринатх С. и др. Высокоэффективная коммуникация людей с параличом с использованием внутрикортикального интерфейса мозг-компьютер //elife. – 2017. – Т. 6. – С. e18554.
12. Хохберг Л. Р. и др. Достижение и захват предметов людьми с тетраплегией с помощью роботизированной руки с нейронным управлением //Nature. – 2012. – Т. 485. – №. 7398. – С. 372-375.
13. Коллинджер Дж.Л. и др. Высокоэффективное управление нейропротезом человека с тетраплегией //The Lancet. – 2013. – Т. 381. – №. 9866. – С. 557-564.
14. Хохберг Л.Р. и др. Нейронный ансамблевый контрольпротезных устройств человека с тетраплегией //Природа. – 2006. – Т. 442. – №. 7099. – С. 164-171.
15. Лебедев М., Оприс И. Интерфейсы мозг-машина: от макро- до микросхем //Последние достижения в области модульной организации коры головного мозга [Интернет]. Дордрехт: Springer Нидерланды. – 2015. – С. 407-28.
16. Орбан М. и др. Обзор мозговой активности и ЭЭГ-основанных интерфейсов мозг-компьютера для реабилитационных приложений // Биоинженерия. – 2022. – Т. 9. – № 12. – С. 768.
17. Чари А. и др. Интерфейсы мозг-машина: роль нейрохирурга // Мировая нейрохирургия. – 2021. – Т. 146. – С. 140-147.
18. Филлипс В. От нейронов к сетям: этические аспекты нейронных интерфейсов с использованием ИИ // ИИ и этика. – 2025. – Т. 5. – № 4. – С. 3531-3536.
19. Чжу Х. Ю. и др. Человекоцентричная метавселенная, обеспечиваемая интерфейсом мозг-компьютер: обзор // IEEE Communications Surveys & Tutorials. – 2024. – Т. 26. – № 3. – С. 2120-2145.
20. Цзян Л., Фунг Ч. Ч. С., Ченг Ч. П. В. Достижения в исследованиях по нейронавигированной локализации цели для повторяющейся транскраниальной магнитной стимуляции при депрессии: от стандартизации к индивидуализированной нейромодуляции //Frontiers in Neuroimaging. – 2025. – Т. 4. – С. 1703198.

References

1. Ognard J. et al. Advances in endovascular brain computer interface: Systematic review and future implications //Journal of Neuroscience Methods. – 2025. – Т. 420. – pp. 110471.

2. Mitchell P. et al. Assessment of safety of a fully implanted endovascular brain-computer interface for severe paralysis in 4 patients: the stentrode with thought-controlled digital switch (SWITCH) study //JAMA neurology. – 2023. – Т. 80. – №. 3. – pp. 270-278.
3. Dubynin I. et al. Neural–Computer Interfaces: Theory, Practice, Perspectives //Applied Sciences. – 2025. – Т. 15. – №. 16. – pp. 8900.
4. Wen B., Shen L., Kang X. Laser Welding of Micro-Wire Stent Electrode as a Minimally Invasive Endovascular Neural Interface //Micromachines. – 2024. – Т. 16. – №. 1. – pp. 21.
5. Araki K. et al. Detection of interictal epileptiform discharges using multiple bilateral insertions of a newly developed microcatheter-compatible endovascular electroencephalogram electrode: A clinical feasibility trial //Epilepsia Open. – 2025.
6. Soldozy S. et al. A systematic review of endovascular stent-electrode arrays, a minimally invasive approach to brain-machine interfaces //Neurosurgical Focus. – 2020. – Т. 49. – №. 1. – С. E3.
7. Oxley T. J. et al. Motor neuroprosthesis implanted with neurointerventional surgery improves capacity for activities of daily living tasks in severe paralysis: first in-human experience //Journal of neurointerventional surgery. – 2021. – Т. 13. – №. 2. – pp. 102-108.
8. Mussi M. G., Adams K. D. EEG hybrid brain-computer interfaces: A scoping review applying an existing hybrid-BCI taxonomy and considerations for pediatric applications //Frontiers in human neuroscience. – 2022. – Т. 16. – pp. 1007136.
9. Lebedev M. A., Nicolelis M. A. L. Brain–machine interfaces: past, present and future //TRENDS in Neurosciences. – 2006. – Т. 29. – №. 9. – pp. 536-546.
10. Ajiboye A. B. et al. Restoration of reaching and grasping movements through brain-controlled muscle stimulation in a person with tetraplegia: a proof-of-concept demonstration //The Lancet. – 2017. – Т. 389. – №. 10081. – pp. 1821-1830.
11. Pandarinath C. et al. High performance communication by people with paralysis using an intracortical brain-computer interface //elife. – 2017. – Т. 6. – С. e18554.
12. Hochberg L. R. et al. Reach and grasp by people with tetraplegia using a neurally controlled robotic arm //Nature. – 2012. – Т. 485. – №. 7398. – pp. 372-375.
13. Collinger J. L. et al. High-performance neuroprosthetic control by an individual with tetraplegia //The Lancet. – 2013. – Т. 381. – №. 9866. – pp. 557-564.
14. Hochberg L. R. et al. Neuronal ensemble control of prosthetic devices by a human with tetraplegia //Nature. – 2006. – Т. 442. – №. 7099. – pp. 164-171.
15. Lebedev M., Opris I. Brain-machine interfaces: from macro-to microcircuits //Recent Advances on the Modular Organization of the Cortex [Internet]. Dordrecht: Springer Netherlands. – 2015. – pp. 407-28.
16. Orban M. et al. A review of brain activity and EEG-based brain–computer interfaces for rehabilitation application //Bioengineering. – 2022. – Т. 9. – №. 12. – pp. 768.
17. Chari A. et al. Brain–machine interfaces: the role of the neurosurgeon //World neurosurgery. – 2021. – Т. 146. – pp. 140-147.
18. Phillips V. From neurons to networks: ethical dimensions of AI-infused neural interfaces //AI and Ethics. – 2025. – Т. 5. – №. 4. – pp. 3531-3536.
19. Zhu H. Y. et al. A human-centric metaverse enabled by brain-computer interface: A survey //IEEE Communications Surveys & Tutorials. – 2024. – Т. 26. – №. 3. – pp. 2120-2145.

20. Jiang L., Fung C. C. S., Cheng C. P. W. Research advances in neuronavigated target localization for repetitive transcranial magnetic stimulation in depression: from standardization to individualized neuromodulation //Frontiers in Neuroimaging. – 2025. – Т. 4. – pp. 1703198.