

Оригинальная статья

УДК 612.822.3

<https://doi.org/10.24866/3033-5485/2025-3/13-23>

Активность альфа-диапазона, выявляемая при ЭЭГ-исследовании: столетие поисков и ошибок

Сергей Александрович Гуляев^{1, ✉}, Дарису Вячеславовна Максарова¹,
Александр Александрович Гармаш¹

¹Инженерно-физический институт биомедицины НИЯУ МИФИ,
Москва, Российская Федерация
✉ sergruss@yandex.ru

Аннотация. Ритмическая активность мозга часто воспринимается как прямое отражение его функциональной активности. Несмотря на длительный период изучения, в настоящее время нет единого понимания этого явления, что существенно затрудняет изучение высших нервных функций.

Ритмическая активность альфа-диапазона представляет собой комплекс ритмических феноменов, продуцируемых в зрительной коре (поля 17, 18, 19), ретроспленальной коре (поле 31), гностических центрах, объединяемых в теменной области в структуре 7 поля Бродмана, а также в структурах слухового восприятия (в т.ч. и области Вернике). Частота и амплитуда альфа-активности не связаны с процессами реализации высших нервных функций, поскольку не представляют собой биоэлектрического эквивалента функционального возбуждения корковых структур, поэтому регистрируемую во время ЭЭГ-исследования альфа-активность более целесообразно рассматривать как некую «несущую» составляющую, формируемую отдельными корковыми структурами, реализующими базовые функции, связанные с восприятием и пространственным ориентированием.

Проведённое исследование функциональной активности структурно неизменённых мозговых структур смогло бы предложить технологии объективной диагностики для нейропсихологических и психиатрических заболеваний, т.е. в тех областях, в которых позиции объективных методов диагностики чрезвычайно слабы даже в настоящее время.

Ключевые слова: ЭЭГ, анализ ритмов, когнитивные функции, источник активности, физиология мозговой деятельности

Для цитирования: Гуляев С.А., Максарова Д.В., Гармаш А.А. Активность альфа-диапазона, выявляемая при ЭЭГ-исследовании: столетие поисков и ошибок // Клиническая и фундаментальная медицина. 2025. Т. 1, № 3. С. 13–23.

Original article

Alpha-band activity detected in EEG research: a century of researches and errors

Sergey A. Gulyaev^{1, ✉}, Darisu V. Maksarova¹, Alexander A. Garmash¹

¹Institute for Physics and Engineering in Biomedicine,
National Research Nuclear University “MEPhI”,
Moscow, Russian Federation
✉ sergruss@yandex.ru

Abstract. The rhythmic activity of the brain is often perceived as a direct reflection of its functional activity. Despite the long period of study, there is currently no common understanding of this phenomenon, which significantly complicates the study of higher nervous functions.

© Гуляев С.А., Максарова Д.В., Гармаш А.А., 2025

Rhythmic activity of the alpha range is a complex of rhythmic phenomena produced in the visual cortex (areas 17, 18, 19), retrosplenial cortex (area 31), gnostic centers, united in the parietal region in the structure of the 7th Brodmann area, as well as in the structures of auditory perception (including Wernicke's area). The frequency and amplitude of alpha activity are not associated with the processes of implementing higher nervous functions, since they do not represent a bioelectric equivalent of the functional excitation of cortical structures, therefore, it is more appropriate to consider the alpha activity recorded during the EEG study as a kind of "carrier" component formed by individual cortical structures implementing basic functions associated with perception and spatial orientation.

The conducted study of the functional activity of structurally unchanged brain structures could offer technologies for objective diagnostics for neuropsychological and psychiatric diseases, i.e. in those areas where the position of objective diagnostic methods is extremely weak even at present.

Keywords: EEG, rhythm analysis, cognitive functions, source of activity, physiology of brain activity

For citation: Gulyaev S.A., Maksarova D.V., Garmash A.A. Alpha-band activity detected in EEG research: a century of researches and errors. *Clinical and Fundamental Medicine*, 2025, vol. 1, no. 3, pp. 13–23. (In Russ.).

Введение

Ритмическая активность альфа-диапазона – ритмический феномен, обнаруженный при электроэнцефалографическом исследовании церебральной активности, был описан более ста лет назад В.В. Правдич-Неминским (в 1913 г.) в опытах на животных и Г. Бергером (в 1929 г.) – на людях [1, 2]. Несмотря на значительный объём работ, выполненных Бергером по исследованию особенностей ритмической активности у больных с психическими заболеваниями, научное сообщество не приняло его идей, и только их подтверждение Э. Адрианом и Б. Мэтьюзом позволило обратить внимание на ЭЭГ как на один из диагностических методов. Сформировав мнение об исключительной роли альфа-ритма в работе мозговых структур, Э. Адриан объявил его главной составляющей мозговой активности [3]. Однако в 1940-х годах У. Пенфилд [4], изучая особенности появления и редуцирования альфа-ритма и развивая идею о центрэнцефалической системе, связал появление альфа-ритма не с корковыми структурами головного мозга, а с подкорковыми образованиями, что было активно поддержано в работах [5], продемонстрировавших изменение альфа-активности при раздражении таламических структур.

Тем не менее альфа-активность не является исключительным и единственным ритмическим феноменом, продуцируемым корковыми структурами. Ещё в 50-х годах прошлого века Г. Гасто продемонстрировал независимость сенсомоторного мю-ритма от депрессии альфа-ритма, вызываемой открыванием глаз, поскольку в случае подкоркового источника на уровне подкорковых образований ритмическая активность мю-диапазона также должна была реагировать на открывание и закрывание глаз, как и альфа-ритм [6].

Данные наблюдения позволили Ф. да Силва [7] и В. Климешу [8] сформулировать идею о непосредственно корковом происхождении ритмических феноменов, положив в основу своих утверждений сравнение количества синаптических соединений в коре и подкорковых структурах, связав альфа-ритм с активностью зрительного анализатора.

Тем не менее фактически до появления в конце прошлого века технологии МРТ-исследования, а также комбинации фМРТ- и ЭЭГ-технологий, теория Э. Адриана о том, что ритмическая активность головного мозга представляет собой прямое отражение функциональной

активности корковых структур, практически не подвергалась сомнению, даже несмотря на работы Пенфилда и Андерсена, описывающие её лимбико-кортикальную природу.

В значительной мере этому способствовала сосредоточенность учёных на доказательствах регистрации патологических ЭЭГ-ритмов в условиях развития внутричерепных объёмных образований и поиска возможностей активного использования метода ЭЭГ в их локализационной диагностике, но предлагаемые технологии, разрабатываемые для потребности клинической нейрохирургии, при применении их в неврологии показали неоднозначные результаты, что практически привело к потере интереса к подобным исследованиям и его смещению к новым методам функциональной нейровизуализации [9–12].

Однако современное человеческое общество с его повышенным информационным воздействием потребовало возможности исследования изменений мозговой активности, обладающих быстрой динамикой, поэтому ЭЭГ-исследование, в том числе и церебральных ритмических феноменов, вновь привлекло внимание научного сообщества на новом этапе развития современных вычислительных технологий [13].

Целью текущего исследования является изучение особенностей ритмической активности альфа-диапазона и возможности их использования в исследовании высших нервных функций.

Материалы и методы

Регистрация ЭЭГ проводилась с помощью цифрового электроэнцефалографа (производство – Зеленоград, Россия) с частотой АЦП – 500 Гц, с входными параметрами фильтрации сигнала 0,03–70 Гц. Электроды располагались на поверхности скальпа головы согласно рекомендациям IFCN 2017–2023 гг. с монтажом IFCN-25 (системы «10-20» и «10-10» в комбинации). Точность положения электрода производилась при помощи линейных измерений с последующей коррекцией стандартных таблиц пространственного положения электродов. Выбор системы монтажа был обусловлен вопросом нарастания количества артефактов записи в многоканальной системе, связанных с воздействием внешних физических и технологических факторов.

На первом этапе обработки осуществлялась минимизация артефактов физической природы, для чего отключались сторонние электрические приборы, создающие паразитные электромагнитные поля, контролировался импеданс интерфейса. Также регулировалась температура в помещении, по возможности минимизировались паразитные движения мышц, что уменьшало выраженность биологических артефактов.

На втором этапе полученный пул данных проходил процедуры повторной фильтрации с выделением диапазона частот 8–14 Гц, стандартизации базового монтажа в единое электродное пространство с удалением артефактных сигналов посредством процедуры выделения независимых компонент сигнала, что позволяло получить данные, содержащие информацию об активности церебральных структур, продуцирующих ритмическую активность в диапазоне альфа-волн.

На третьем этапе проводилась сегментация ЭЭГ-сигнала с выделением отдельных ЭЭГ-микросостояний посредством процедуры программного пакета sLORETA с выделением 8 классов отдельных микросостояний (канонических (I–IV) и четырёх дополнительных (V–VIII) с учётом их вариабельности). Выбор восьми классов был основан на идее Ф. Гиббса о

минимальном количестве ЭЭГ-электродов для описания характеристик электроэнцефалограммы и технологической реализации программ обработки независимых компонент сигнала.

Заключительный этап исследования включал решение обратной задачи ЭЭГ для каждого из выделенных классов ЭЭГ-микросостояний с помощью алгоритма решения обратной задачи ЭЭГ, реализованного в пакете прикладных программ sLORETA. Результаты представляли информацию о 8 отдельных вариантах источников отдельных ЭЭГ-микросостояний, согласно атласу полей К. Бродмана по атласу Монреальского института нейрохирургии (рис. 1).

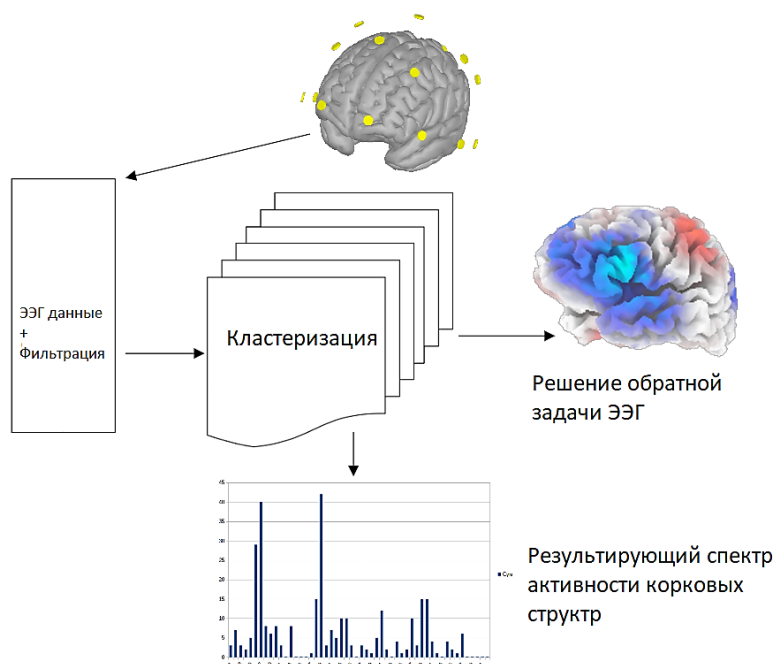


Рис. 1. Блок-схема процесса обработки данных ЭЭГ, использованного в исследовании

Fig. 1. Block diagram of the EEG data processing process used in the study

Основная группа исследования

Обследование было проведено на 43 здоровых добровольцах в возрасте от 5 до 71 года. Средний возраст обследуемых составил 26,2 года. Из них 25 человек – женщины от 5 до 55 лет. Их средний возраст составил 24 года. 18 участников были мужчинами от 10 до 71 года, средний возраст составил 29,2 года.

Всем обследуемым проводилась ЭЭГ-запись, включавшая исследование фоновой мозговой активности в состоянии пассивного расслабленного бодрствования с закрытыми глазами в затемнённой и тихой комнате, удалённой от источников мощного электромагнитного излучения.

Все участники в анамнезе не имели острых заболеваний центральной нервной системы, а также обострений хронических заболеваний. Обследуемые не имели тяжёлых черепно-мозговых травм в анамнезе или психических заболеваний, а также эпилепсии.

Критериями исключения было курение, употребление психоактивных веществ, в том числе и по назначению врача, а также регулярное употребление алкоголя.

Клинические обследования проводились на базе ООО «Клиника Ла Салюте», согласно договору о сотрудничестве между ИФИБ НИЯУ «МИФИ» и ООО «Клиника Ла Салюте» от 12.01.2023 № 01-12/23.

Статистическая обработка полученных результатов проводилась с применением программы GNU-PSPP под управлением ОС Linux Mate. Использовался однофакторный дисперсионный анализ ANOVA с поправкой Бонферони.

Результаты

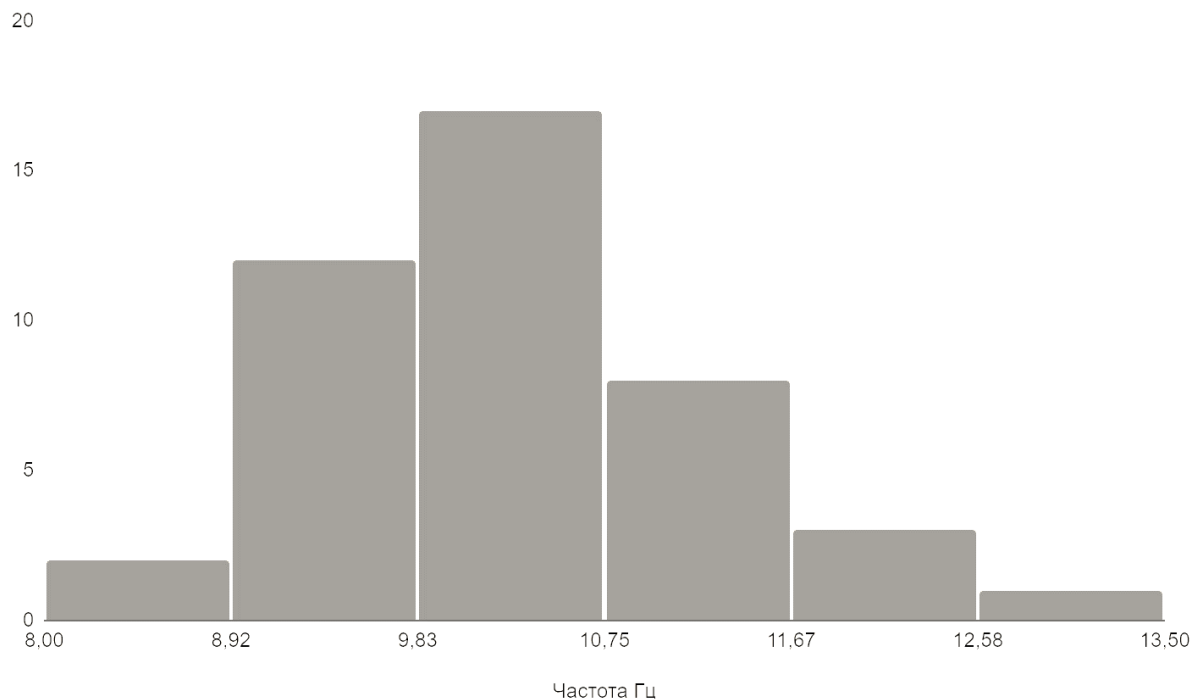


Рис. 2. Гистограмма распределения частоты альфа-активности у обследованных (средние значения)

Fig. 2. Histogram of the distribution of the frequency of alpha activity in those examined (average values)

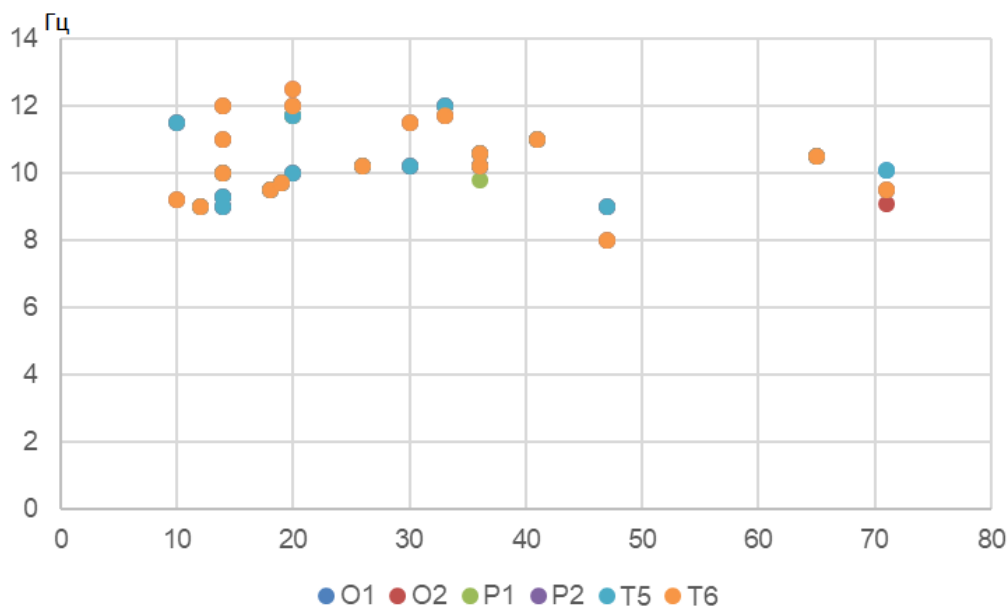


Рис. 3. Распределение альфа-активности у мужчин по основным точкам стандартных отведений

Fig. 3. Distribution of alpha activity in men in main points of standard positions

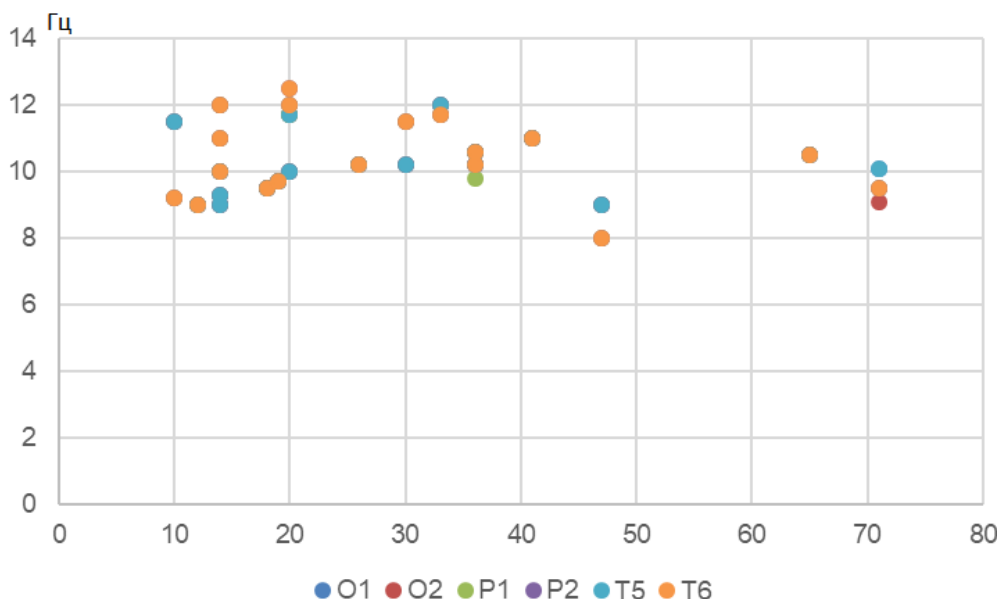


Рис. 4. Распределение альфа-активности у женщин по основным точкам стандартных отведений

Fig. 4. Distribution of alpha activity in women in main points of standard positions

Непосредственный анализ частотных характеристик альфа-ритма, регистрируемого в задних отделах скальповой поверхности головы, показал, что вне зависимости от возраста и пола обследованных частота альфа-ритма находится в стандартных частотных диапазонах 8–14 Гц (рис. 2–4) с некоторой тенденцией к снижению в возрасте от 60 до 50 лет в задневисочных областях, со стабилизацией частотного показателя в районе 10 Гц в более старшем возрасте, что было ожидаемо и не раз демонстрировалось в более ранних исследованиях альфа-активности.

Распределение источников альфа-активности в корковых структурах

В целом, исследование результатов решения обратной ЭЭГ-задачи в альфа-диапазоне частот показало сходные результаты при делении как по половому признаку, так и по возрастному. Данное сходство было вполне ожидаемым, поскольку мы исследовали практически монотипную группу с позиции образования, культуры и традиций. Но даже при таком подходе некоторые из показателей различались.

При исследовании распределения источников альфа-активности в корковых структурах у мужчин и женщин выявлялась в целом сходная картина с выделением трёх основных областей, включавших 7-й, 19-й и 31-й поля Бродмана (рис. 5). В целом у женщин отмечалось преобладание активности 19-го поля Бродмана, связанного со зрительным анализатором ($p < 0,04$), а у мужчин – структур ретроспленциальной коры. Эти данные нами были расценены как преобладание количества нейронных сетей, вовлечённых в зрительную кору у женщин и ретроспленциальную кору – у мужчин.

Возрастные особенности альфа-ритма также демонстрировали сходные результаты (рис. 6).

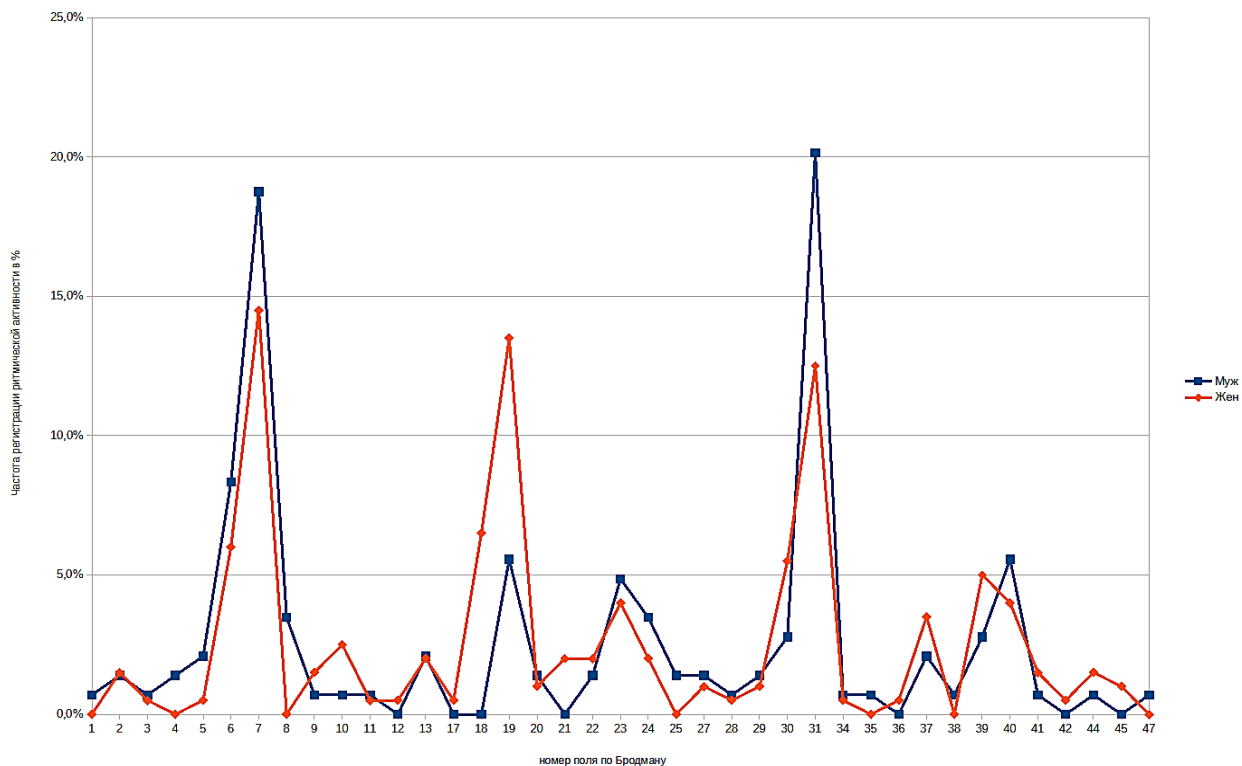


Рис. 5. Решение обратной задачи ЭЭГ для активности альфа-диапазона с гендерным распределением группы

Fig. 5. Solution of the inverse EEG problem for alpha-range activity with gender distribution of the group

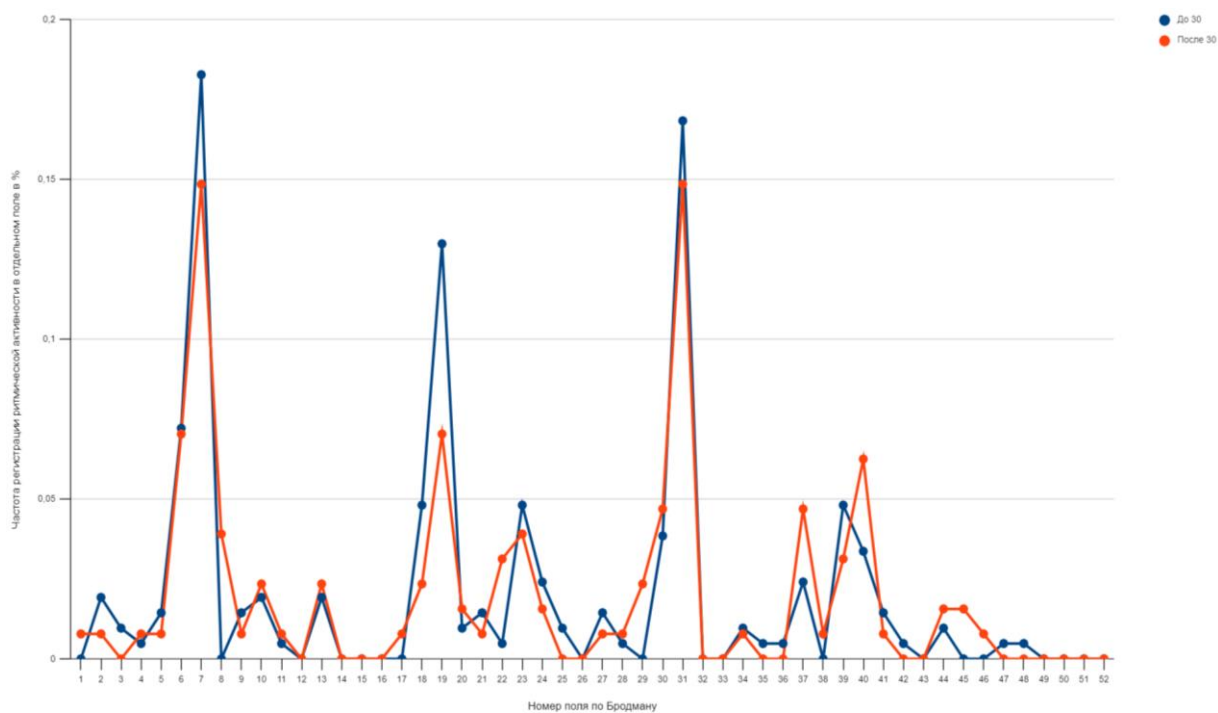


Рис. 6. Решение обратной задачи ЭЭГ для активности альфа-диапазона с возрастным распределением группы

Fig. 6. Solution of the inverse EEG problem for alpha-range activity with age distribution of the group

Распределение данных по возрасту не выявило существенных различий в частоте регистрации альфа-активности. У всех обследованных также наблюдался высокий процент регистрации альфа-активности в структурах 7-го, 19-го и 31-го полей Бродмана с достоверно большей ($p=0,03$) активностью 19-го поля у людей младше 30 лет.

В обоих случаях распределения обращали на себя внимание активность 23-го, 39-го и 40-го полей Бродмана – вентральной части поясной извилины и полей, образующих центр речевосприятия (зона Вернике), не продемонстрировавших существенных девиаций в зависимости от пола и возраста.

Исходя из вышеизложенного, усреднённое представление ритмической активности альфа-диапазона в виде трёхмерной карты (рис. 7) не соответствует ожидаемым характеристикам кортикальной активности, отражающей реализацию основных мозговых функций (рис. 8), получаемым при исследовании изменения амплитудной модуляции или использования фМРТ-технологии.

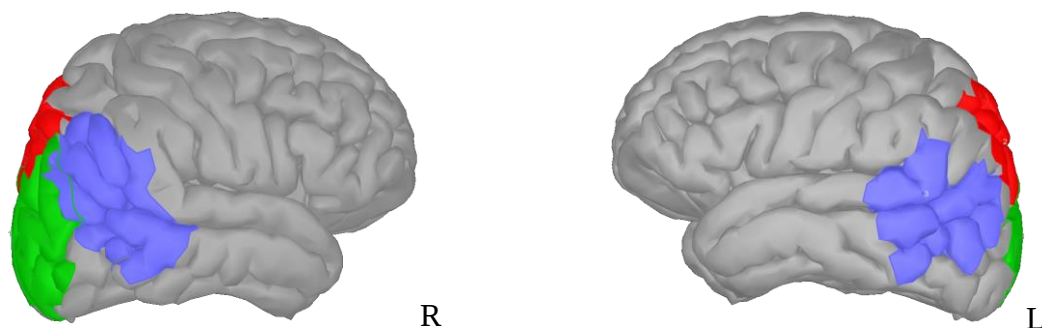


Рис. 7. Усреднённая ($n=43$) трёхмерная модель распределения источников альфа-ритма по коре головного мозга (медиальная ретроспленальная кора не визуализируется)
Fig. 7. Averaged ($n=43$) three-dimensional model of the distribution of alpha rhythm sources across the cerebral cortex (medial retrosplenial cortex is not visualized)

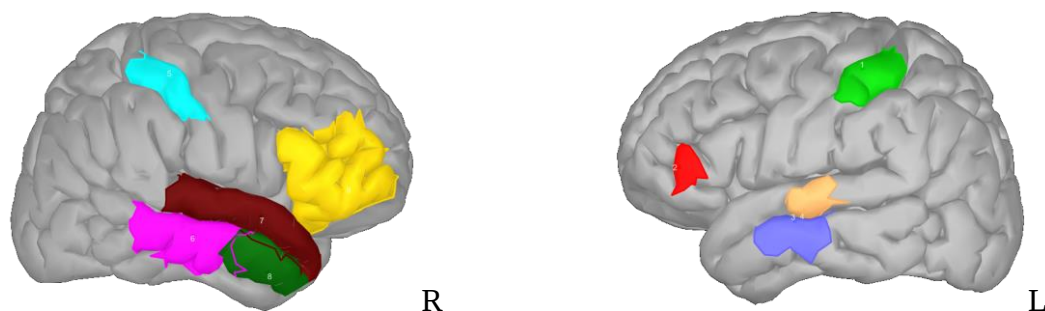


Рис. 8. Усреднённая ($n=43$) трёхмерная модель распределения функционально активных областей коры головного мозга (исследование процесса амплитудной модуляции)
Fig. 8. Averaged ($n=43$) three-dimensional model of the distribution of functionally active areas of the cerebral cortex (study of the amplitude modulation process)

Обсуждение результатов

Таким образом, исследования ритмической активности мозга в альфа-диапазоне показывают отдельные крупные нейрональные группы, связанные с непосредственным анализом окружающей среды (системы сетей пассивной работы мозга), а не с процессами реализации высших нервных функций, что было ранее показано в работе нашей научной группы [14]. Ген-

дерные различия зрительных функций и ранее описывались в работах [15]. В настоящее время это объясняется в большей степени генетической особенностью, поскольку не регламентируется вопросами культуры и религии. Результаты нашего исследования показывают, что, вероятно, женщины имеют больший функциональный объем зрительной коры, в то время как у мужчин наблюдается лучшее развитие ретроспленальной области. Уменьшение функционального объема зрительной коры с возрастом, наблюдаемое в полученных результатах, вероятно, не совсем правильно трактовать как следствие возрастного ухудшения зрения. По нашему мнению, эти изменения, вероятнее всего, определяют более высокую специализацию зрительной коры у лиц старше 30 лет, которая и приводит к уменьшению функционального объема корковых структур, вовлеченных в реализацию зрительной функции, как это наблюдается с изменением функционального объема сенсомоторных областей, изменяющегося в процессе обучения двигательным навыкам [16], в настоящее время связываемые с возрастным редуцированием систем зеркальных нейронов Риццолатти [17].

Альфа-активность, захватывающая область Вернике, не продемонстрировавшая существенных различий в гендерном и возрастном разделении, по нашему мнению, как раз характеризовала реальные результаты сходства общего онтогенетического и культурного развития обследуемых лиц, поскольку речевая функция, представляя собой наиболее поздно формируемую анатомо-функциональную структуру, как раз и характеризует эквивалентность процесса речевосприятия как для мужчин, так и для женщин, в то время как гендерные различия речевой продукции неоднократно демонстрировались в работах различных научных групп [18–20].

Выводы

1. Определяемая при ЭЭГ-исследовании ритмическая активность альфа-диапазона представляет собой комплекс ритмических феноменов, продуцируемых не в одной, а в функционально и анатомически различных корковых структурах, зрительной коре (поля 17, 18, 19), ретроспленальной коре (поле 31) и гностических центрах, объединяемых в теменной области в структуре 7-го поля Бродмана.

2. Непосредственно определяемые частотно-амплитудные характеристики этой активности сами по себе не связаны с процессами реализации высших нервных функций, поскольку не представляют собой биоэлектрического эквивалента функционального возбуждения корковых структур, а представляют собой характеристику функционально-структурной зрелости крупных нейронных сетей задних отделов головного мозга.

3. Данный подход открывает новые возможности к определению нарушений высшей нервной деятельности с позиции нарушения восприятия человеком его окружения, что в дальнейшем формирует его неправильный ответ к данному окружению, отражающийся в настоящее с позиции клинических дисциплин как эндогенное заболевание, не имеющее видимых причин.

4. Исследование ритмических феноменов альфа-диапазона может с успехом использоваться как метод объективной диагностики в психиатрии, которая до настоящего времени не имеет своего арсенала доказательных методов объективизации.

Заключение

Несмотря на свою более чем столетнюю историю, методика ЭЭГ-исследования, пережив период стагнации, по-прежнему является одной из наиболее актуальных нейрофизиологи-

ческих методик, обладающих как экономической доступностью, так и значительным уровнем информативности при условии использования современных методов математического анализа. Несмотря на очевидное преобладание технологий нейровизуализации в клинической неврологии и нейрохирургии, нейрофизиологическое исследование функциональной активности структурно неизменённых мозговых структур смогло бы предложить технологии объективной диагностики для нейропсихологических и психиатрических заболеваний, т.е. в тех областях, в которых позиции объективных методов диагностики чрезвычайно слабы даже в настоящее время. По нашему мнению, внедрение данной технологии могло бы заставить по-новому увидеть некоторые патологические состояния, особенно в клинике психических заболеваний.

Вклад авторов / Contribution of the authors

С.А. Гуляев – основная идея, анализ данных, оформление результатов; Д.В. Максарова – сбор данных; А.А. Гармаш – общее руководство проектом.

S.A. Gulyaev – main idea, data analysis, presentation of results; D.V. Maksarova – data collection; A.A. Gar-mash – general project management.

Соблюдение этических стандартов / Compliance with ethical standards

Исследование проведено в соответствии с Хельсинкской декларацией «Этические принципы медицинских исследований с участием человека в качестве испытуемого» от 1964 г. (ред. 2008 г.). Всеми пациентами подписано добровольное информированное согласие на исследование.

The study was conducted in accordance with the Helsinki Declaration "Ethical principles for medical research involving human subjects" of 1964 (2008 edition). All patients signed voluntary informed consent for the study.

Конфликт интересов / Conflict of interest

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflict of interest.

Список источников / References

1. Práwdicz-Neminski W.W. Zur Kenntnis der elektrischen und der Innervationsvorgänge in den funktionellen Elementen und Geweben des tierischen Organismus. Elektrocerebrogramm der Säugetiere. *Pflug Arch ges Physiol*, 1925, vol. 209, pp. 362–382. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF01730925>
2. Berger H. Über das Elektroenkephalogramm des Menschen. *Archiv für Psychiatrie und Nervenkrankheiten*, 1929, vol. 87, pp. 527–570.
3. Adrian E.D., Matthews B.H.C. The berger rhythm: potential changes from the occipital lobes in man. *Brain*, 1934, vol. 57, pp. 355–385. DOI: <https://doi.org/10.1093/brain/57.4.355>
4. Jasper H., Penfield W. Electrocorticograms in man: effect of voluntary movement upon the electrical activity of the precentral gyrus. *Archiv für Psychiatrie und Nervenkrankheiten*, 1949, vol. 183, pp. 163–174.
5. Andersen P., Andersson S.A. Physiological basis of the Alpha Rhythm. N.-Y.: Appleton-Century-Crofts, 1968. 384 p.
6. Gastaut H. Etude électrocorticographique de la réactivité des rythmes rolandiques [Electrocorticographic study of the reactivity of rolandic rhythm]. *Rev Neurol (Paris)*, 1952, vol. 87(2), pp. 176–182.
7. Lopes Da Silva F.H., Storm Van Leeuwen W. The cortical source of the alpha rhythm. *Neurosci Lett.*, 1977, vol. 6(2–3), pp. 237–241. [https://www.doi.org/10.1016/0304-3940\(77\)90024-6](https://www.doi.org/10.1016/0304-3940(77)90024-6)
8. Klimesch W. α -band oscillations, attention, and controlled access to stored information. *Trends Cogn Sci.*, 2012, no. 16(12), pp. 606–617. DOI: <https://www.doi.org/10.1016/j.tics.2012.10.007>
9. Grech R., Cassar T., Muscat J., Camilleri K.P., Fabri S.G., Zervakis M., Xanthopoulos P., Sakkalis V., Vanrumste B. Review on solving the inverse problem in EEG source analysis. *J Neuroeng Rehabil.*, 2008, no. 7, pp. 5–25. DOI: <https://doi.org/10.1186/1743-0003-5-25>

10. Иванов Л.Б. Спектр мощности электроэнцефалограммы: ошибки и практика применения (лекция первая) // Медицинский алфавит. 2021. № 39. С. 45–52. DOI: <https://doi.org/10.33667/2078-5631-2021-39-45-52>
Ivanov L.B. Power spectrum of electroencephalogram: Mistakes and practical application. *Medical Alphabet*, 2021, no. 39, pp. 45–52. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.33667/2078-5631-2021-39-45-52>
11. Иванов Л.Б. Спектр мощности по электроэнцефалограмме: ошибки и практика применения (лекция вторая). Дисперсионный анализ электроэнцефалограммы по Росману // Медицинский алфавит. 2022. № 9. С. 38–43. DOI: <https://doi.org/10.33667/2078-5631-2022-9-38-43>
Ivanov L.B. EEG power spectrum: Mistakes and practical application (lecture two). Dispersive EEG analysis according to Rosman's method. *Medical Alphabet*, 2022, no. 9, pp. 38–43. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.33667/2078-5631-2022-9-38-43>
12. Базанова О.М., Афтанас Л.И. Успешность обучения и индивидуальные частотно-динамические характеристики альфа-активности электроэнцефалограммы // Вестник Российской академии медицинских наук. 2006. № 6. С. 30–33.
Bazanova O.M., Aftanas L.I. Learnability and individual frequency characteristics of EEG alfa activity. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences*, 2006, no. 6, pp. 30–35. (In Russ.).
13. Babiloni C., Arakaki X., Baez S., et al. Alpha rhythm and Alzheimer's disease: Has Hans Berger's dream come true? *Clin Neurophysiol.*, 2025, vol. 172, pp. 33–50. PMID: 39978053. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2025.02.256>
14. Gulyaev S.A., Khanukhova L.M., Garmash A.A. Neurophysiological method for studying changes in the brain's default mode network activity. *Extreme Medicine*, 2023, no. 2, pp. 64–71. DOI: <https://doi.org/10.47183/mes.2023.009>
15. Seidler R.D., Carson R.G. Sensorimotor learning: Neurocognitive mechanisms and individual differences. *J Neuroeng Rehabil.*, 2017, no. 14(1), p. 74. DOI: <https://www.doi.org/10.1186/s12984-017-0279-1>. Erratum in: *J Neuroeng Rehabil.*, 2017, no. 14(1), p. 100. DOI: <https://www.doi.org/10.1186/s12984-017-0311-5>
16. Tsay J.S., Kim H.E., McDougale S.D., Taylor J.A., Haith A., Avraham G., Krakauer J.W., Collins A.G.E., Ivry R.B. Fundamental processes in sensorimotor learning: Reasoning, refinement, and retrieval. *Elife*, 2024, no. 13, p. e91839. DOI: <http://www.doi.org/10.7554/eLife.91839>
17. Casile A. Mirror neurons are class of neurons discovered by Rizzolatti and colleagues. *Neurosci Lett.*, 2013, vol. 540, pp. 1–2. DOI: <http://www.doi.org/10.1016/j.neulet.2012.12.010>
18. Cartier L., Guérin M., Saulnier F., Cotocea I., Mohammedi A., Moussaoui F., Kheloui S., Juster R.P. Sex and gender correlates of sexually polymorphic cognition. *Biol. Sex. Differ.*, 2024, no. 15(1), p. 3. DOI: <http://www.doi.org/10.1186/s13293-023-00579-8>
19. Weirich M., Simpson A.P. Gender identity is indexed and perceived in speech. *PLoS One*, 2018, no. 13(12), p. e0209226. DOI: <http://www.doi.org/10.1371/journal.pone.0209226>
20. Riskind R.G., Tornello S.L. "I Think It's Too Early to Know": Gender identity labels and gender expression of young children with nonbinary or binary transgender parents. *Front Psychol.*, 2022, no. 13, p. 916088. DOI: <http://www.doi.org/10.3389/fpsyg.2022.916088>

Информация об авторах / Information about the authors

Гуляев Сергей Александрович – доцент кафедры общей медицины, Инженерно-физический институт биомедицины НИЯУ «МИФИ» (Москва, Российская Федерация),

✉ sergruss@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0001-9122-7144>; SPIN 6645-2922

Sergey A. Gulyaev, Associate Professor of the Department of General Medicine, Institute for Physics and Engineering in Biomedicine, National Research Nuclear University “MEPhI” (Moscow, Russian Federation).

Максарова Дарису Вячеславовна – соискатель кафедры общей медицины, Инженерно-физический институт биомедицины НИЯУ «МИФИ» (Москва, Российская Федерация),

✉ dmaksarova@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0000-7327-0018>

Darisu V. Maksarova, Applicant of the Department of General Medicine, Institute for Physics and Engineering in Biomedicine, National Research Nuclear University “MEPhI” (Moscow, Russian Federation).

Гармаш Александр Александрович – директор, Инженерно-физический институт биомедицины НИЯУ «МИФИ» (Москва, Российская Федерация),

✉ aagarmash@mephi.ru; <https://orcid.org/0000-0002-1129-7220>

Alexander A. Garmash, Director, Institute for Physics and Engineering in Biomedicine, National Research Nuclear University “MEPhI” (Moscow, Russian Federation).

Статья поступила / Received: 24.04.2025.

Одобрена после рецензирования / Revised: 16.05.2025.

Принята к публикации / Accepted: 22.09.2025.