

# Особенности медленноволновых ЭЭГ-феноменов в раннем восстановительном периоде ишемического инсульта

С. А. Гуляев<sup>1</sup>✉

Л. М. Ханукова<sup>2</sup>

А. А. Гармаш<sup>3</sup>

В. Г. Лелюк<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Инженерно-физический институт биомедицины, Москва, Россия, [sergruss@yandex.ru](mailto:sergruss@yandex.ru), <https://orcid.org/0000-0001-9122-7144>

<sup>2</sup> Инженерно-физический институт биомедицины, Москва, Россия, [sergruss@yandex.ru](mailto:sergruss@yandex.ru), <https://orcid.org/0009-0004-4552-2870>

<sup>3</sup> Инженерно-физический институт биомедицины, Москва, Россия, [AAGarmash@mephi.ru](mailto:AAGarmash@mephi.ru), <https://orcid.org/0000-0002-1129-7220>

<sup>4</sup> Институт цереброваскулярной патологии и инсульта, Москва, Россия, [v.g.lelyuk@gmail.com](mailto:v.g.lelyuk@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0002-9690-8325>

## Резюме

**Введение.** Одной из значимых проблем ранней реабилитации пациентов с острым нарушением мозгового кровообращения является развитие гемодинамических нарушений, вызванных изменением потоков в системе базальных анастомозов. В результате активно проводимая физическая реабилитация может не только не достигать ожидаемого эффекта, но и приводить к обратному результату. Решением данной проблемы мог бы стать метод динамического наблюдения за состоянием церебральной гемоперфузии, который можно было бы применять в том числе и в условиях проведения реабилитационных мероприятий для наблюдения за изменениями в состоянии пациента во время выполнения подобранной ему физической нагрузки. В нашем исследовании изучалась возможность использования метода клинической электроэнцефалографии для решения данной задачи, поскольку методика широко распространена в современном здравоохранении, не требует значительных затрат при проведении исследования и не оказывает неблагоприятного действия на пациента.

**Цель работы.** Цель представленной работы состоит в описании возможности исследования ритмических медленноволновых феноменов, связанных с развитием нарушений локальной гемоперфузии, возникающих при повышении физической активности у пациентов в раннем восстановительном периоде ишемического инсульта.

**Материалы и методы.** Было обследовано 24 человека, перенесших ишемический инсульт (атеротромботический вариант) в течение года и имевших индекс Рэнкина – 3. Средний возраст обследованных составил 57,3 года, Мо – 55, Ме – 58, первый квартиль – 55, третий – 61,3, возрастной диапазон – 38 лет, минимальный возраст – 35 лет, максимальный – 73 года.

**Результаты.** Установлено, что в первые 6 месяцев физическое воздействие на пораженные конечности вызывают значимые изменения церебральной гемодинамики, которые могут приводить к развитию гемодинамического обкрадывания смежных областей коры головного мозга, в том числе и в неповрежденном полушарии. Эти данные необходимо учитывать при разработке программ физической реабилитации пациентов с острым нарушением мозгового кровообращения, а сам метод электроэнцефалографии может с успехом использоваться для непосредственного наблюдения за состоянием церебральной гемоперфузии, в том числе в условиях проведения реабилитационных мероприятий.

**Ключевые слова:** электроэнцефалография, медленные волны, мозговые ритмы, ишемия, гемоперфузия, метод исследования  
**Для цитирования:** Гуляев С. А., Ханукова Л. М., Гармаш А. А., Лелюк В. Г. Особенности медленноволновых ЭЭГ-феноменов в раннем восстановительном периоде ишемического инсульта. Лечащий Врач. 2026; 5 (29): 124-130. <https://doi.org/10.51793/OS.2026.29.5.018>

**Конфликт интересов.** Авторы статьи подтвердили отсутствие конфликта интересов, о котором необходимо сообщить.

# Features of slow-wave EEG phenomena in the early recovery period of ischemic stroke

Sergei A. Guliaev<sup>1</sup>✉

Larisa M. Khanukhova<sup>2</sup>

Alexandr A. Garmash<sup>3</sup>

Vladimir G. Lelyuk<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Engineering Physics Institute of Biomedicine, Moscow, Russia, [sergruss@yandex.ru](mailto:sergruss@yandex.ru), <https://orcid.org/0000-0001-9122-7144>

<sup>2</sup> Engineering Physics Institute of Biomedicine, Moscow, Russia, [sergruss@yandex.ru](mailto:sergruss@yandex.ru), <https://orcid.org/0009-0004-4552-2870>

<sup>3</sup> Engineering Physics Institute of Biomedicine, Moscow, Russia, [AAGarmash@mephi.ru](mailto:AAGarmash@mephi.ru), <https://orcid.org/0000-0002-1129-7220>

<sup>4</sup> Institute of Cerebrovascular Pathology and Stroke, Moscow, Russia, [v.g.lelyuk@gmail.com](mailto:v.g.lelyuk@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0002-9690-8325>

## Abstract

**Background.** One of the significant problems of early rehabilitation of acute cerebrovascular accident is the development of hemodynamic disorders caused by changes in flows in the system of basal anastomoses. As a result, actively conducted physical rehabilitation may not only fail to achieve the expected effect, but also lead to the opposite result. A solution to this problem could be a method of dynamic monitoring of the state of cerebral hemoperfusion, which could be used, including in the context of rehabilitation measures, to monitor changes in the patient's condition during the physical load imposed on him. In our study, we examined the possibility of using the clinical electroencephalography method to solve this problem, since the technique is widely used in modern healthcare, does not require significant costs for the study and does not have an adverse effect on the patient.

**Objective.** The purpose of the presented work is to describe the possibility of studying rhythmic slow-wave phenomena associated with the development of local hemoperfusion disorders that occur with increased physical activity in patients in the early recovery period of ischemic stroke.

**Materials and methods.** We examined 24 people who had suffered an ischemic stroke (atherothrombotic variant) during the year, who had a Rankin index of 3. The average age of the examined was 57.3 years, Mo – 55, Me – 58, First quartile – 55, third – 61.3. Age range – 38 years. Minimum age – 35 years, maximum – 73 years.

**Results.** Our study found that during the first 6 months, physical impact on the affected limbs causes significant changes in cerebral hemodynamics, which can lead to the development of hemodynamic steal in adjacent areas of the cerebral cortex, including in the unaffected hemisphere. These data should be taken into account when developing physical rehabilitation programs for patients with stroke, and the EEG method itself can be successfully used for direct monitoring of cerebral hemoperfusion, including in the context of rehabilitation activities.

**Keywords:** electroencephalography, slow waves, brain rhythms, ischemia, hemoperfusion, research method

**For citation:** Guliaev S. A., Khanukhova L. M., Garmash A. A., Lelyuk V. G. Features of slow-wave EEG phenomena in the early recovery period of ischemic stroke. *Lechaschi Vrach.* 2026; 5 (29): 124-130. (In Russ.) <https://doi.org/10.51793/OS.2026.29.5.018>

**Conflict of interests.** Not declared.

Основной причиной современного использования электроэнцефалографии (ЭЭГ) является возможность неинвазивной диагностики мозговых процессов, обладающих быстрой динамикой, в частности, связанных с развитием локальных нарушений церебральной гемоперфузии, отмеченная еще в работах, опубликованных в 1960-х [1-4]. В практическом здравоохранении это позволяет решить задачу наблюдения за изменениями биоэлектрической активности в корковых отделах полушарий головного мозга в режиме реального времени, что позволяет предложить доступную и эффективную систему функционального контроля, особенно в условиях проведения реабилитационных программ [5, 6]. Однако использование рутинного визуально-феноменологического анализа подчас не позволяет специалисту получить адекватный набор данных из-за упрощения методики, связанной с исключением технологий пространственной локализации.

Несмотря на то что вопрос связи ЭЭГ-сигнала с мозговыми структурами был решен научной группой W. Penfield еще в 1940-х [7] с помощью и поныне используемой системы расположения электродов на скальпе «10-20», в СССР она не получила широкого применения и была заменена

на упрощенную систему анализа ЭЭГ-отведений, что дало возможность сделать ряд значимых наблюдений о природе медленноволновых ритмических феноменов [1, 3], но позволило судить об их пространственной локализации лишь условно, вне точной связи с отдельными мозговыми структурами [8, 9]. Поэтому бурное развитие технологий рентгенологической нейровизуализации, позволяющих получать понятное большинству специалистов двумерное изображение, сравнимое с традиционными анатомическими рисунками и данными постмортального исследования, привело к полной потере интереса к ЭЭГ в конце 1990-х [10].

В то же время развитие идей У. Пенфилда среди научных групп крупных западных университетов и клиник привело к созданию систем точной локализации положения ЭЭГ-электродов в пространстве [11], а также разработке новейших систем ЭЭГ-диагностики с большим числом активных электродов [12], что позволило создать доступные технологии для совмещения результатов пространственного распределения ЭЭГ-потенциала с данными радиовизуализационных методов [13-15].

В 2017 году руководство Международной федерации клинической нейрофизиологии (International Federation

of Clinical Neurophysiology – IFCN) приняло официальные рекомендации по использованию расширенных систем локализации электродов, а также рекомендовало постепенный переход от использования системы «10-20» к системе «10-10» [16], что позволило разработать новые идеи по созданию системы мозгового картирования (brain mapping), предоставляющей возможность фиксировать различные функциональные изменения церебральной активности в режиме реального времени и сопоставлять их непосредственную связь с анатомическими данными [17].

Внедрение представленных выше методов ЭЭГ-анализа и точной локализации в отечественную медицинскую школу позволяет пересмотреть многие идеи советских и российских ученых [1-6], что особенно важно в контексте цереброваскулярных заболеваний с возможностью открыть совершенно новые перспективные направления, которые улучшат качество жизни больных с инсультом и ускорят их возвращение к активной социальной жизни [18-20].

Целью представленной работы является описание возможности исследования ритмических медленноволновых феноменов, связанных с развитием нарушений локальной гемоперфузии, возникающих при повышении физической активности у пациентов в раннем восстановительном периоде ишемического инсульта (ИИ).

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Было обследовано 24 человека, перенесших ИИ (атеротромботический вариант) в течение года, с индексом Рэнкина – 3. Средний возраст обследованных составил 57,3 года, Мо – 55, Ме – 58, первый квартиль – 55, третий – 61,3. Средний возраст равнялся 38 годам (минимальный возраст – 35 лет, максимальный – 73 года). Из числа обследованных вернуться к профессиональной деятельности планировали 16 человек, 9 из них были профессионально связаны с высшим и еще 7 – со средним образованием. Остальные 8 имели оформленную инвалидность по текущему заболеванию.

У всех обследованных в анамнезе отсутствовали припадки, учтенные наследственные заболевания, прием нейростимулирующих препаратов, оральных контрацептивов (для женщин), регулярное употребление алкоголя, общий наркоз в течение года. Сроки обследования после перенесенного инсульта составили 12 мес (минимум – 1, максимум – 12), Мо – 1, Ме – 5,5, первый квартиль – 3,8, третий – 9,3: это значит, что пациенты в основном были обследованы в первые 6 мес от начала заболевания.

По данным магнитно-резонансной томографии (МРТ) у 11 человек область инфаркта мозга располагалась в бассейне левой средней мозговой артерии (СМА) с соответствующей компретацией правой руки, у 10 – в бассейне правой СМА (пострадала левая рука) и у трех – в вертебробазиллярном бассейне (ВБС), что характеризовалось сохранением подвижности обеих рук. У 15 обследованных (63%) зона ишемии перекрывала зону инфаркта, у 9 совпадала с зоной инфаркта (37%).

Всем обследуемым проводилась ЭЭГ высокой плотности записи (128 каналов, объединенных в систему GSN-128 со средневзвешенным референтным электродом) на приборе EGI-GES-300 производства Magstim, USA. Исследование

проводилось в состоянии пассивного расслабленного бодрствования и при активных движениях в здоровой и скомпрометированной конечностях. Технология средневзвешенного электрода (Average) позволяла получить наименьшую разницу между истинным значением скальповых биопотенциалов и электрическим напряжением, формирующим запись ЭЭГ, в отличие от технологии иных монтажей, в которых референтный электрод может иметь собственный потенциал, а также подавлять артефактные биологические сигналы, посредством применения технологии независимого анализа компонент сигнала [21-24].

Обследование включало запись ЭЭГ в течение 3-5 минут в состоянии пассивного расслабленного бодрствования с закрытыми глазами. В дальнейшем обследуемый выполнял функциональные нагрузочные пробы, включающие 3 минуты движения здоровой конечностью при закрытых глазах и 3 минуты движения скомпрометированной конечностью также при закрытых глазах. Полученные результаты ЭЭГ анализировались в программе Brainstorm<sup>®</sup>, в которой проводилось совмещение данных ЭЭГ с T1-взвешенными МРТ-изображениями, а также построение трехмерной модели, что позволяло измерять площадь распространения биопотенциала на скальпе в каждом конкретном случае [22, 25] в пространстве координат Монреальского института нейрохирургии (MNI) [26]. В последующем производились соответствующие поправки по осям X, Y и Z, что позволяло добиться строгой фиксации электродов на поверхности головы, исключая их провалы или провисания. Система позволяла создавать трехмерные карты с выделением отдельных диапазонов частот. При этом использовались следующие значения ЭЭГ-диапазонов: дельта – 0-3 Гц, тета – 4-7 Гц, альфа – 8-14 Гц, бета-1 – 15-35 Гц и бета-2 – 36-70 Гц. Расчет площади биопотенциала производился с помощью утилиты Scout (Проводник) [27]. Полученные результаты статистически обрабатывались с помощью программы PSPP согласно рекомендациям [28].

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

### *Визуально-феноменологический анализ тета-активности (классическая технология)*

При визуально-феноменологическом исследовании с учетом разделения области интереса по мозговым полушариям выявлены изменения тета-активности в условиях физической нагрузки как пораженной, так и здоровой руки. В непораженном (интактном) полушарии таких изменений не регистрировалось (рис. 1).

### *Оценка изменений характеристик мозговой активности тета-диапазона в зависимости от пораженного бассейна*

Анализ данных с учетом поражения в отдельно взятом сосудистом бассейне показал, что при физической нагрузке наиболее значимые изменения наблюдались в правом (субдоминантном) полушарии при включении пораженной руки в процесс двигательной активности (рис. 2).

### *Исследование изменений площади биопотенциалов тета-диапазона с помощью программного обеспечения пакета программ Brainstorm*

Анализ активности тета-диапазона при нагрузке в сравнении с фоновой записью выявил нарастание площади тета-активности на скальпе при функционировании как здоровой, так и пораженной конечности (рис. 3).

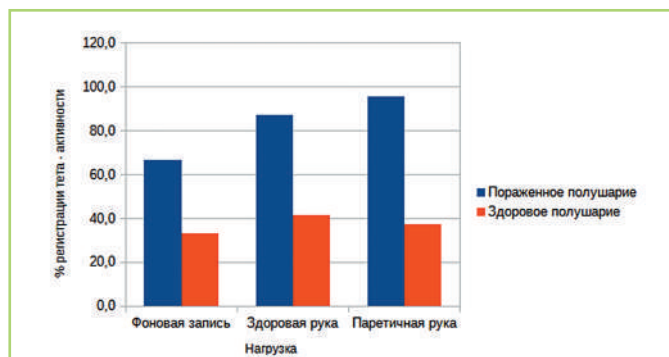


Рис. 1. Регистрация медленноволновой активности (%) по отведениям полушарий головного мозга в зависимости от стимуляции здоровой и пораженной руки. Различия показателей фоновой записи и записи при физической активности здоровой руки на стороне поражения ( $p = 0,022$ ), интактная сторона ( $p = 0,574$ ) — данные t-test, при физической активности паретичной руки на стороне поражения ( $p = 0,005$ ), интактная сторона ( $p = 0,0746$ ) [предоставлено авторами] / Registration of slow-wave activity (%) in the leads of the cerebral hemispheres, depending on the stimulation of a healthy and affected arm. Differences in the indicators of background recording and recording during physical activity of a healthy hand on the side of the lesion  $p = 0.022$ , intact side  $p = 0.574$  (t-test data), with physical activity of the affected hand on the side of the lesion  $p = 0.005$ , intact side —  $p = 0.0746$  [provided by the authors]

#### Исследование изменений площади биопотенциалов тета-диапазона в зависимости от сосудистого бассейна

Однако анализ изменений при разделении общей группы соответственно пораженному артериальному бассейну обнаружил, что наиболее выраженными были изменения, регистрируемые при поражении бассейна левой СМА (ЛСМА), питающей доминантное полушарие, когда достоверно значимые изменения площади биопотенциала регистрировались при нагрузке как пораженной, так и здоровой конечности. При поражении бассейна правой СМА (ПСМА) достоверные изменения удалось обнаружить только при нагрузке пораженной конечности, в то время как нагрузка здоровой не вызывала достоверных изменений по сравнению с фоновой записью (рис. 4).

#### ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ работ [27-32], посвященных исследованию изменений биоэлектрической активности головного мозга, в большинстве наблюдений опирается на исследование альфа-активности, описывая ее как фоновый ритм и считая повышение ее частотных значений положительной реакцией. Однако исследование диапазона тета-волн, который непосредственно отражает изменение состояния активности нейронов, связанное с нарушениями их питания, показало другие результаты. Так, физическая нагрузка вызывает нарастание индекса тета-активности у перенесших ИИ вне зависимости от того, здорова ли конечность или ее функция скомпрометирована развившимся инсультом. Данные изменения наиболее выражены при поражении субдоми-

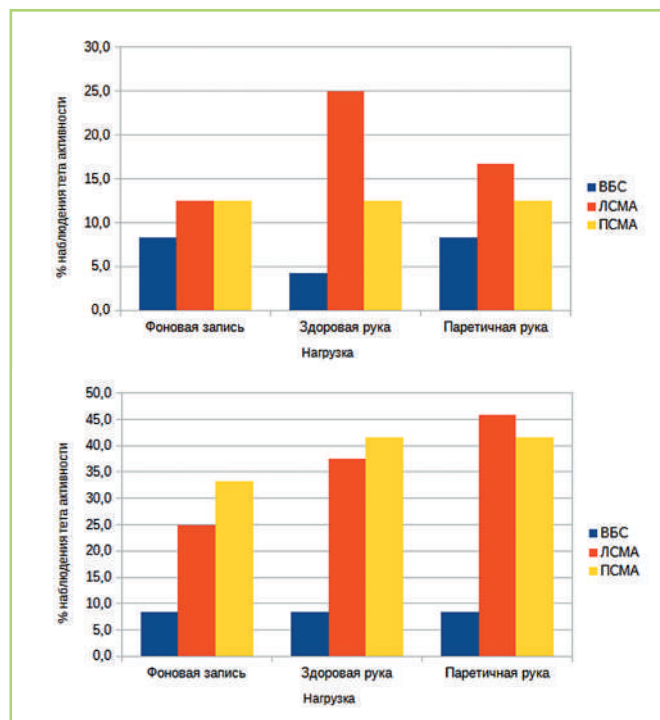


Рис. 2. Результаты визуально-феноменологического анализа тета-активности (%) при учете сосудистого бассейна. ВБС — малое количество наблюдений; ЛСМА на стороне поражения при активности здоровой руки ( $p = 0,1$ ), при активности пораженной руки ( $p = 0,2$ ). Интактное полушарие при активности здоровой руки ( $p = 0,2$ ), при активности пораженной руки ( $p = 0,6$ ). ПСМА на стороне поражения при активности здоровой руки ( $p = 0,2$ ), при активности пораженной руки ( $p = 0,02$ ). Интактное полушарие при активности здоровой руки ( $p = 1$ ), при активности пораженной руки ( $p = 1$ ) по данным t-test [предоставлено авторами] / Results of visual — phenomenological analysis of theta activity, taking into account the vascular pool. VBS — a small number of observations; LSMA on the side of the lesion with the activity of the healthy arm  $p = 0.1$ , with the activity of the affected arm  $p = 0.2$ . The intact hemisphere with the activity of the healthy hand  $p = 0.2$ , with the activity of the affected hand  $p = 0.6$ . PSMA on the side of the lesion with the activity of the healthy arm  $p = 0.2$ , with the activity of the affected arm  $p = 0.02$ . The intact hemisphere with the activity of the healthy hand  $p = 1$ , with the activity of the affected hand  $p = 1$  (t-test data) [provided by the authors]

нантного полушария, что является следствием худшего развития систем компенсирующих коллатералей [33], в том числе и системы лептоменингеальных анастомозов, что следует из ряда работ [34-36].

В нашем исследовании был применен как классический анализ биоэлектрической активности мозга при определении индекса представленности исследуемого частотного феномена в записи [26], так и новый подход к исследованию, базирующийся на определении площади проекции медленноволновой ЭЭГ-активности на скальповую поверхность головы. В отличие от традиционно используемой оценки ритмической активности по индексу, применяемой как часть

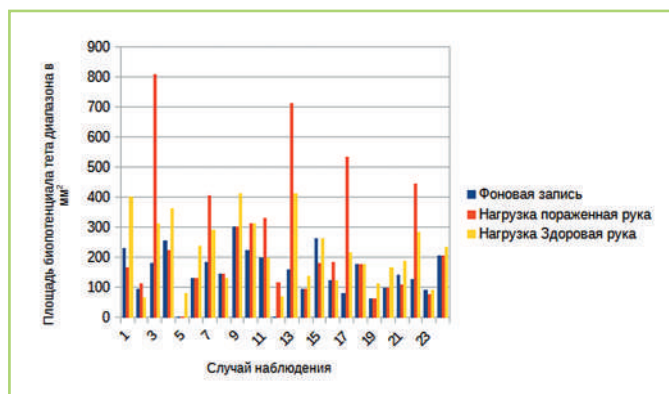


Рис. 3. Изменение площади биопотенциала тета-диапазона в обследованной группе в покое (фоновая запись) и при нагрузке на пораженную руку ( $p = 0,022$ ), здоровой руки ( $p < 0,001$ ) (t-тест) [предоставлено авторами] / Change in the biopotential area of theta-range in the examined group at rest (background recording) and with exercise of the affected arm ( $p = 0.022$ ), healthy arm ( $p < 0.001$ ) (t-test) [provided by the authors]

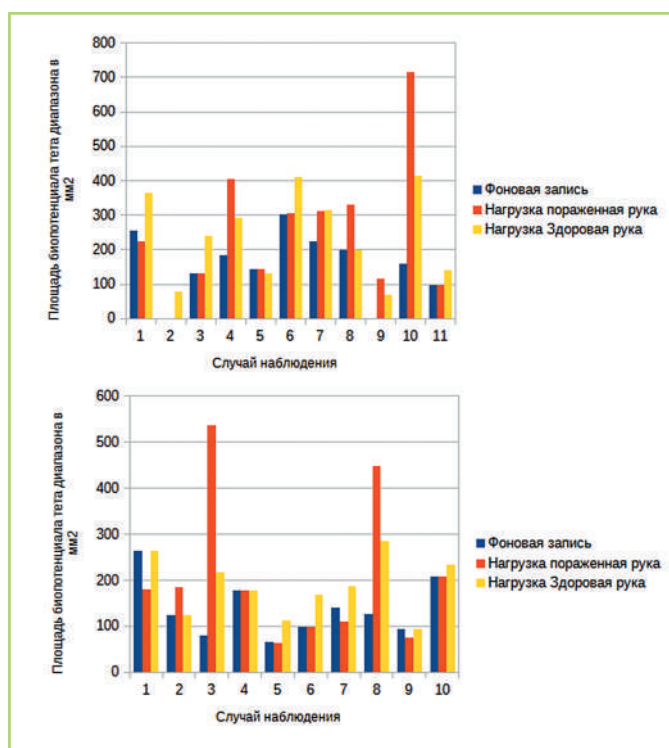


Рис. 4. Изменение площади биопотенциала тета-диапазона в обследованной группе в покое (фоновая запись) и при нагрузке в зависимости от пораженного бассейна. LSMA: нагрузка пораженной руки ( $p = 0,05$ ), нагрузка здоровой руки ( $p = 0,02$ ). PSMA: нагрузка пораженной руки ( $p = 0,236$ ), нагрузка здоровой руки ( $p = 0,026$ ) [предоставлено авторами] / Change in the biopotential area of theta-range in the examined group at rest (background recording) and during exercise, depending on the affected pool. LSMA load of the affected arm  $p=0.05$ , load of the healthy arm  $p = 0.02$ . PSMA load of the affected arm  $p = 0.236$ , load of the healthy arm  $p = 0.026$  [provided by the authors]

визуально-феноменологического анализа, расчет площади биопотенциала дает исследователю количественные данные, которые легко не только проанализировать и сравнить в ходе выполнения различных функциональных нагрузочных проб, но и сопоставить с результатами МРТ. Также эта технология позволяет произвести решение обратной задачи – ЭЭГ с установлением заинтересованных мозговых структур [15].

Несмотря на то что классический визуально-феноменологический анализ также показал достаточно высокую информативность данных, использование этой технологии позволяет получить более точную информацию об изменении церебральной гемоперфузии на уровне отдельно взятого сосудистого бассейна. Кроме того, его репрезентативность напрямую зависит от уровня подготовки специалиста, в то время как применение математических методов позволяет избежать ошибок, связанных с человеческим фактором.

## ВЫВОДЫ

1. ЭЭГ по-прежнему остается методом диагностики функционального состояния головного мозга, возможности которого распространяются далеко за пределы клинической эпидемиологии.

2. Тета-активность отражает изменения церебральной гемоперфузии в корковых отделах мозга и может использоваться для выявления областей функциональной ишемии-гипоксии, вызванных развитием феноменов гемодинамического обкрадывания вследствие несовершенства или неполного включения системы артериальных анастомозов.

3. В сравнении с рутинным визуально-феноменологическим анализом, исследование площади биопотенциала на поверхности скальпа может успешно применяться для анализа динамики в условиях изменения внешней среды с большим успехом, чем классический визуально-феноменологический метод даже с применением методики определения индекса исследуемых феноменов в записи. Технологии расчета площади обладают большой точностью, особенно на уровне отдельного сосудистого бассейна, а соответственно, и клинической значимостью по сравнению с методами простой визуальной оценки изменений. ЛВ

## Вклад авторов:

Концепция статьи – Гуляев С. А.  
 Концепция и дизайн исследования – Гуляев С. А.  
 Написание текста – Гуляев С. А., Ханукова Л. М.  
 Сбор и обработка материала – Гуляев С. А., Ханукова Л. М.  
 Обзор литературы – Гуляев С. А., Ханукова Л. М.  
 Анализ материала – Гуляев С. А., Ханукова Л. М.  
 Редактирование – Гуляев С. А., Гармаш А. А., Лелюк В. Г.  
 Утверждение окончательного варианта статьи – Гуляев С. А., Гармаш А. А., Лелюк В. Г.

## Contribution of authors:

Concept of the article – Guliaev S. A.  
 Study concept and design – Guliaev S. A.  
 Text development – Guliaev S. A., Khanukova L. M.  
 Collection and processing of material – Guliaev S. A., Khanukova L. M.  
 Literature review – Guliaev S. A., Khanukova L. M.  
 Material analysis – Guliaev S. A., Khanukova L. M.

Editing — Guliaev S. A., Garmash A. A., Lelyuk V. G.  
Approval of the final version of the article — Guliaev S. A., Garmash A. A., Lelyuk V. G.

### Литература/References

1. *Жирмунская Е. А., Колтовер А. Н.* Атлас по электроэнцефалографии и морфологии мозгового инсульта. Медицина. М., 1967. 91 с.  
*Zhirnuskaya E. A., Koltover A. N.* Atlas of electroencephalography and stroke morphology. The medicine. Moscow, 1967. 91 s. (In Russ.)
2. *Грундель О. М.; отв. ред. В. С. Русинов;* АН СССР, Ин-т высш. нерв. деятельности и нейрофизиологии, Науч. совет по физиологии нерв. системы. Электроэнцефалограмма человека при черепно-мозговой травме. М.: Наука, 1988. 200 с.: ил.; 22 см; ISBN 5-02-005268-X.  
*Grindel O. M.; Rep. ed. V. S. Rusinov;* Academy of Sciences of the USSR, Institute of Higher. nerve. activity and neurophysiology, Nauch. nerve physiology advice. systems. Human electroencephalogram in traumatic brain injury. M.: Nauka, 1988. 200 p.: ill.; 22 cm; ISBN 5-02-005268-X. (In Russ.)
3. *Бехтерева Н. П.* Биопотенциалы больших полушарий головного мозга при супратенториальных опухолях. Ленинград: Медгиз, 1960.  
*Bekhtereva N. P.* Biopotentials of the cerebral hemispheres in supratentorial tumors. Leningrad: Medgiz, 1960. (In Russ.)
4. *Фадеева Т. Н.* Нейрофизиологические методы исследования в диагностике и комплексном лечении глиом полушарий большого мозга Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки. 2006; 4 (11): 457-466.  
*Fadeeva T. N.* Neurophysiological research methods in the diagnosis and complex treatment of gliomas of the cerebral hemispheres Bulletin of the Tambov University. Series: Natural and technical sciences. 2006; 4 (11): 457-466. (In Russ.)
5. *Гнездицкий В. В.* Обратная задача ЭЭГ и клиническая электроэнцефалография. М.: МЕДпресс-информ, 2004. 624 с.  
*Gnezditsky V. V.* Inverse problem of EEG and clinical electroencephalography. M.: MEDpress-inform, 2004. 624 p. (In Russ.)
6. *Кулаичев А. П.* Компьютерная электрофизиология и функциональная диагностика. Изд. 4-е, перераб. и доп. М.: ИНФРА-М, 2007. С. 178-230.  
*Kulaichev A. P.* Computer electrophysiology and functional diagnostics. Ed. 4th, revised. and additional. M.: INFRA-M, 2007. P. 178-230. (In Russ.)
7. *Пенфилд У., Робертс Л.* Речь и мозговые механизмы Л.: Медицина, 1964. 264 с. УДК 612.825.249+616.89=008.434.  
*Penfield W., Roberts L.* Speech and brain mechanisms. L.: Medicine, 1964. 264 p. UDC 612.825.249+616.89=008.434. (In Russ.)
8. [https://www.egi.com/images/stories/research/documents/Sensor\\_Digitization\\_Brochure\\_Oct\\_2016\\_MM\\_482.pdf](https://www.egi.com/images/stories/research/documents/Sensor_Digitization_Brochure_Oct_2016_MM_482.pdf).
9. *Жирмунская Е. А.* Биоэлектрическая активность здорового и больного мозга человека. С. 224-265. В кн.: Руководство по физиологии. Клиническая физиология. Ленинград: Наука, 1972.  
*Zhirnuskaya E. A.* Bioelectrical activity of a healthy and diseased human brain. Pp. 224-265. Book. Guide to Physiology. Clinical physiology. Leningrad: The science, 1972. (In Russ.)
10. *Русинов В. С., Майорчик В. Е., Грундель О. М.* и др. Клиническая электроэнцефалография. Под ред. В. С. Русинова. М.: Медицина, 1973. 339 с.  
*Rusinov V. S., Mayorchik V. E., Grindel O. M.* and others. Clinical electroencephalography. Ed. V. S. Rusinova. M.: Medicine, 1973. 339 p. (In Russ.)
11. Клинические рекомендации «Эпилепсия и эпилептический статус у взрослых и детей» (утв. Министерством здравоохранения РФ, 2022 г).  
Clinical guidelines "Epilepsy and status epilepticus in adults and children" (approved by the Ministry of Health of the Russian Federation, 2022). (In Russ.)
12. *Ruynänen O. R., Hyttinen J. A., Malmivuo J. A.* Effect of measurement noise and electrode density on the spatial resolution of cortical potential distribution with different resistivity values for the skull. IEEE Trans Biomed Eng. 2006; 53 (9): 1851-1858. <https://doi.org/10.1109/TBME.2006.873744>. PMID: 16941841.
13. *Lantz G., Grave de Peralta R., Spinelli L., Seeck M., Michel C. M.* Epileptic source localization with high density EEG: how many electrodes are needed? Clin Neurophysiol. 2003; 114 (1): 63-9. [https://doi.org/10.1016/s1388-2457\(02\)00337-1](https://doi.org/10.1016/s1388-2457(02)00337-1). PMID: 12495765.
14. *Wójcik G. M. 3.* Selected methods of quantitative analysis in electroencephalography. Simulations in Medicine: Computer-aided diagnostics and therapy, edited by Irena Roterman-Konieczna, Berlin, Boston: De Gruyter, 2020. Pp. 35-54. <https://doi.org/10.1515/9783110667219-003>.
15. *Pascual-Marqui R. D., Esslen M., Kochi K., Lehmann D.* Functional imaging with low-resolution brain electromagnetic tomography (LORETA): a review. Methods Find Exp Clin Pharmacol. 2002; 24 Suppl C: 91-95. PMID: 12575492.
16. *Seeck M., Koessler L., Bast T., Leijten F., Michel C., Baumgartner C., et al.* The standardized EEG electrode array of the IFCN. Clin Neurophysiol [Internet]. 2017; 128 (10): 2070-2077. <http://dx.doi.org/10.1016/j.clinph.2017.06.254>.
17. *Rossini P. M., Di Iorio R., Bentivoglio M., Bertini G., Ferreri F., Gerloff C., Ilmoniemi R. J., Miraglia F., Nitsche M. A., Pestilli F., Rosanova M., Shirota Y., Tesoriero C., Ugawa Y., Vecchio F., Ziemann U., Hallett M.* Methods for analysis of brain connectivity: An IFCN-sponsored review. Clin Neurophysiol. 2019; 130 (10): 1833-1858. <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2019.06.006>. Epub 2019 Jul 2. PMID: 31401492.
18. *Stergiadis C., Kostaridou V. D., Veloudis S., Kazis D., Klados M. A.* A Personalized User Authentication System Based on EEG Signals. Sensors (Basel). 2022; 22 (18): 6929. <https://doi.org/10.3390/s22186929>. PMID: 36146276; PMCID: PMC9503240.
19. *Romeo Z., Mantini D., Durgoni E., Passarini L., Meneghello F., Zorzi M.* Electrophysiological signatures of resting state networks predict cognitive deficits in stroke. Cortex. 2021; 138: 59-71. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2021.01.019>. Epub 2021 Feb 12. PMID: 33677328.
20. *Manganotti P., Furlanis G., Ajčević M., Polverino P., Caruso P., Ridolfi M., Pozzi-Mucelli R. A., Cova M. A., Naccarato M.* CT perfusion and EEG patterns in patients with acute isolated aphasia in seizure-related stroke mimics. Seizure. 2019; 71: 110-115. <https://doi.org/10.1016/j.seizure.2019.07.005>. Epub 2019 Jul 4. PMID: 31323445.
21. *Delorme A., Sejnowski T., Makeig S.* Enhanced detection of artifacts in EEG data using higher-order statistics and independent component analysis. NeuroImage. 2007; 4 (34). <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2006.11.004>.
22. *Tadel F., Baillet S., Mosher J. C., Pantazis D., Leahy R. M.* Brainstorm: a user-friendly application for MEG/EEG analysis. Comput Intell Neurosci. 2011; 2011: 879716. <https://www.doi.org/10.1155/2011/879716>.
23. *Poulsen C., Wakeman D. G., Atefi S. R., Luu P., Konyn A., Bonmassar G.* Polymer thick film technology for improved simultaneous dEEG/MRI recording: Safety and MRI data quality. Magn Reson Med. 2017; 77 (2):

- 895-903. DOI: 10.1002/mrm.26116. Epub 2016 Feb 15. PMID: 26876960; PMCID: PMC4985508.
24. Poolman P., Frank R. M., Luu P., Pederson S. M., Tucker D. M. A single-trial analytic framework for EEG analysis and its application to target detection and classification. *Neuroimage*. 2008; 42 (2): 787-798. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2008.03.031>. Epub 2008 Apr 1. PMID: 18555700.
25. Sarter M., Fritschy J. M. Reporting statistical methods and statistical results in EJM. *Eur J Neurosci*. 2008; 28 (12): 2363-2364. <https://doi.org/10.1111/j.1460-9568.2008.06581.x>. PMID: 19087166.
26. Жирмунская Е. А. Клиническая электроэнцефалография М.: МЭЙБИ, 1991. 118 с.  
*Zhirimuskaya E. A. Clinical electroencephalography M.: MAYBI, 1991. 118 s. (In Russ.)*
27. Петрова Е. А., Георгиевская Н. А., Кичук И. В., Шаклунова Н. В., Савина М. А., Скворцова В. И. Биоэлектрическая активность головного мозга при различных аффективных расстройствах у больных с церебральным инсультом. *Журнал неврологии и психиатрии им. С. С. Корсакова*. 2010; 110 (6): 77-85.  
*Petrova E. A., Georgievskaya N. A., Kichuk I. V., Shaklunova N. V., Savina M. A., Skvortsova V. I. Bioelectrical brain activity in different affective disorders in patients with cerebral stroke. Zhurnal Nevrologii i Psikiatrii imeni S. S. Korsakova. 2010; 110 (6): 77-85. (In Russ.)*
28. Стафеева И. В., Субботина Н. С., Дуданов И. П. Состояние биоэлектрической активности мозга после каротидной эндартерэктомии в раннем восстановительном периоде ишемического инсульта. *Ученые записки Петрозаводского государственного университета*. 2014; 8-1 (145): 40-43.  
*Stafeeva I. V., Subbotina N. S., Dudanov I. P. The state of bioelectrical activity of the brain after carotid endarterectomy in the early recovery period of ischemic stroke. Uchenye zapiski Petrozavodskogo gosudarstvennogo universiteta. 2014; 8-1 (145): 40-43. (In Russ.)*
29. Stinear C. M. Prediction of motor recovery after stroke: advances in biomarkers. *Lancet Neurol*. 2017; 16 (10): 826-836. [https://doi.org/10.1016/S1474-4422\(17\)30283-1](https://doi.org/10.1016/S1474-4422(17)30283-1). Epub 2017 Sep 12. PMID: 28920888.
30. Abiri R., Borhani S., Sellers E. W., Jiang Y., Zhao X. A comprehensive review of EEG-based brain-computer interface paradigms. *J Neural Eng*. 2019; 16 (1): 011001. <https://doi.org/10.1088/1741-2552/aaf12e>. Epub 2018 Nov 15. PMID: 30523919.
31. Guggisberg A. G., Koch P. J., Hummel F. C., Buetefisch C. M. Brain networks and their relevance for stroke rehabilitation. *Clin Neurophysiol*. 2019; 130 (7): 1098-1124. <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2019.04.004>. Epub 2019 Apr 15. PMID: 31082786; PMCID: PMC6603430.
32. Sun R., Wong W. W., Gao J., Wong G. F., Tong R. K. Abnormal EEG Complexity and Alpha Oscillation of Resting State in Chronic Stroke Patients. *Annu Int Conf IEEE Eng Med Biol Soc*. 2021; 2021: 6053-6057. <https://doi.org/10.1109/EMBC46164.2021.9630549>. PMID: 34892497.
33. Vasquez H. E., Murlimanju B. V., Shrivastava A., et al. Intracranial collateral circulation and its role in neurovascular pathology. *Egypt J Neurosurg*. 2021; 2 (36). <https://doi.org/10.1186/s41984-020-00095-6>.
34. Phan T. G., Hilton J., Beare R., Srikanth V., Sinnott M. Computer modeling of anterior circulation stroke: proof of concept in cerebrovascular occlusion. *Front Neurol*. 2014; 5: 176. <https://doi.org/10.3389/fneur.2014.00176>. PMID: 25285093; PMCID: PMC4168699.
35. Gubskiy I. L., Logunova T. A., Nikogosova A. K., et al. Bilateral internal carotid artery occlusion: case report. *Consilium Medicum*. 2016; 18 (9): 17-20.
36. Li Z., Tremble S. M., Cipolla M. J. Implications for understanding ischemic stroke as a sexually dimorphic disease: the role of pial collateral circulations. *Am J Physiol Heart Circ Physiol*. 2018; 315 (6): H1703-H1712. <https://doi.org/10.1152/ajpheart.00402.2018>. Epub 2018 Sep 21. PMID: 30239233; PMCID: PMC6336971.

**Сведения об авторах:**

**Гуляев Сергей Александрович**, д.м.н., доцент кафедры фундаментальной медицины, Инженерно-физический институт биомедицины, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»; Россия, 115409, Москва, Каширское шоссе, 31; [sergruss@yandex.ru](mailto:sergruss@yandex.ru)

**Ханукова Лариса Михайловна**, ассистент кафедры фундаментальной медицины, Инженерно-физический институт биомедицины, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»; Россия, 115409, Москва, Каширское шоссе, 31; [sergruss@yandex.ru](mailto:sergruss@yandex.ru)

**Гармаш Александр Александрович**, к.т.н., директор, Инженерно-физический институт биомедицины, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»; Россия, 115409, Москва, Каширское шоссе, 31; [AAGarmash@mephi.ru](mailto:AAGarmash@mephi.ru)

**Лелюк Владимир Геннадьевич**, д.м.н., профессор, руководитель научно-исследовательского центра радиологии и клинической физиологии, Институт цереброваскулярной патологии и инсульта, Федеральное государственное бюджетное учреждение «Федеральный центр мозга и нейротехнологий» Федерального медико-биологического агентства России; Россия, 117513, Москва, ул. Островитянова, 1, стр. 10; [v.g.lelyuk@gmail.com](mailto:v.g.lelyuk@gmail.com)

**Information about the authors:**

**Sergei A. Guliaev**, *Cand. of Sci. (Med.)*, Associate Professor of the Department of Fundamental Medicine, Engineering Physics Institute of Biomedicine, Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education National Research Nuclear University "MEPhI"; 31 Kashirskoe Shosse, Moscow, 115409, Russia; [sergruss@yandex.ru](mailto:sergruss@yandex.ru)

**Larisa M. Khanukhova**, *assistant of the Department of Fundamental Medicine, Engineering Physics Institute of Biomedicine, Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education National Research Nuclear University "MEPhI"; 31 Kashirskoe Shosse, Moscow, 115409, Russia; [sergruss@yandex.ru](mailto:sergruss@yandex.ru)*

**Alexandr A. Garmash**, *Cand. of Sci. (Tech.)*, Director, Engineering Physics Institute of Biomedicine, Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education National Research Nuclear University "MEPhI"; 31 Kashirskoe Shosse, Moscow, 115409, Russia; [AAGarmash@mephi.ru](mailto:AAGarmash@mephi.ru)

**Vladimir G. Lelyuk**, *Dr. of Sci. (Med.)*, Professor, Head of the Scientific Research Center of Radiology and Clinical Physiology, Institute of Cerebrovascular Pathology and Stroke, Federal State Budgetary Institution Federal Center for Brain and Neurotechnology of the Federal Medical and Biological Agency of Russia; 1 bld. 10 Ostrovityanova str., Moscow, 117513, Russia; [v.g.lelyuk@gmail.com](mailto:v.g.lelyuk@gmail.com)

**Поступила/Received 04.10.2025**

**Поступила после рецензирования/Revised 13.11.2025**

**Принята в печать/Accepted 18.11.2025**