

ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ СТИМУЛЯЦИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭЛЕКТРОДОВ ДЛЯ СТЕРЕОЭЛЕКТРОЭНЦЕФАЛОГРАФИИ

**В.О. Русскин¹, А.А. Кузнецова^{2,3}, В.Б. Соловьев², А.В. Левов², Ф.Б. Бердинов^{2,4}, М.И. Лившиц^{2,5},
В.А. Сандриков¹**

¹Научно клинический центр № 1 ФГБНУ «Российский научный центр хирургии им. акад. Б.В. Петровского»; Россия, 119435 Москва, Абрикосовский пер., 2;

²ГБУЗ г. Москвы «Морозовская детская городская клиническая больница Департамента здравоохранения г. Москвы»; Россия, 119049 Москва, 4-й Добрынинский пер., 1/9;

³ГБУЗ г. Москвы «Научно-практический психоневрологический центр им. З.П. Соловьева Департамента здравоохранения г. Москвы»; Россия, 115419 Москва, ул. Донская, 43;

⁴ФГАОУ ВО «Российский университет дружбы народов им. Патриса Лумумбы»; Россия, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6;

⁵ФГБОУ ВО «Российский национальный исследовательский медицинский университет им. Н.И. Пирогова» Минздрава России; Россия, 117997 Москва, ул. Островитянова, 1

Контакты: Вадим Олегович Русскин russkin.vadim@mail.ru

Электрическая стимуляция (ЭС) с использованием электродов для стереоэлектроэнцефалографии – важный компонент предхирургического обследования пациентов со структурной фармакорезистентной эпилепсией. ЭС помогает в решении 2 наиболее сложных проблем в хирургии эпилепсии – тотального удаления эпилептогенного участка коры головного мозга и минимизации постоперационного неврологического дефицита. ЭС позволяет осуществлять провокацию типичных эпилептических приступов у пациентов с целью уточнения нейрофизиологических особенностей и границ эпилептогенной зоны, а также картировать функционально значимые зоны для уменьшения площади резекции с прогнозированием постоперационного неврологического дефицита. Результаты исследований, проведенных с использованием ЭС, вносят огромный вклад не только в практическую медицину, но и в фундаментальную науку, позволяя более детально изучить функции отдельных участков головного мозга и понять элементы патогенеза различных заболеваний нервной системы.

Ключевые слова: эпилепсия, стереоэлектроэнцефалография, электрическая стимуляция, эпилептогенная зона, нейрофизиология, функциональная нейрохирургия

Для цитирования: Русскин В.О., Кузнецова А.А., Соловьев В.Б. и др. Электрическая стимуляция с использованием электродов для стереоэлектроэнцефалографии. Нейрохирургия 2024;26(3):144–55.

DOI: <https://doi.org/10.17650/1683-3295-2024-26-3-144-155>

Electric stimulation using stereoelectroencephalography electrodes

V.O. Russkin¹, A.A. Kuznetsova^{2,3}, V.B. Solovyev², A.V. Levov², F.B. Berdinov^{2,4}, M.I. Livshits^{2,5}, V.A. Sandrikov¹

¹Scientific Clinical Center No. 1, B.V. Petrovsky Russian Scientific Center of Surgery; 2 Abrikosovsky Ln., Moscow 119435, Russia;

²Morozovskaya Children's City Clinical Hospital, Moscow Healthcare Department; 1/9 4th Dobryninsky Ln, Moscow 119049, Russia;

³Z.P. Solovyov Scientific and Practical Psychoneurological Center, Moscow Healthcare Department; 43 Donskaya St., Moscow 115419, Russia;

⁴Peoples' Friendship University of Russia n. a. Patrice Lumumba; 6 Miklikho Maklaya St., Moscow 117198, Russia;

⁵N.I. Pirogov Russian National Research Medical University, Ministry of Health of Russia; 1 Ostrovityanova St., Moscow 117997, Russia

Contacts: Vadim Olegovich Russkin russkin.vadim@mail.ru

Electrical stimulation (ES) using stereoelectroencephalography is an essential component in the workup of surgical epilepsy. ES helps to solve two major problems in epilepsy surgery – total resection of the epileptogenic lesion while minimising the postoperative neurological deficit. ES allows to induce habitual epileptic seizures to define the neurophysiological characteristics and boundaries of the epileptogenic zone and to map eloquent areas to reduce the

area of resection with prediction of post-operative neurological deficit. The results of studies using ES make a huge contribution not only to practical medicine, but also to fundamental science, allowing us to study the functions of individual parts of the brain and to understand the elements of the pathogenesis of various diseases of the nervous system.

Keywords: epilepsy, stereoelectroencephalography, electrical stimulation, epileptogenic zone, neurophysiology, functional neurosurgery

For citation: Russkin V.O., Kuznetsova A.A., Solovyev V.B. et al. Electric stimulation using stereoelectroencephalography electrodes. *Neyrokhirurgiya = Russian Journal of Neurosurgery* 2024;26(3):144–55. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.17650/1683-3295-2024-26-3-144-155>

ВВЕДЕНИЕ

Эпилепсия — одно из самых распространенных заболеваний в неврологической практике, которым страдает около 1 % населения мира [1]. На сегодняшний день количество противоэpileптических препаратов (ПЭП) приближается к 50 [2]. Несмотря на активное развитие фармакологии и пополнение списка ПЭП, доля пациентов, избавившихся от эпилептических приступов на фоне консервативной терапии, не превышает 70 %, а у трети пациентов, страдающих эпилепсией, наблюдается фармакорезистентное течение заболевания [3]. Фармакорезистентность определяют как неэффективность 2 и более адекватно подобранных и правильно получаемых антиэпилептических препаратов в достижении ремиссии [4]. В таких случаях рассматривают вопрос об использовании альтернативных методов лечения эпилепсии: хирургическое лечение, стимуляционные методики, диетотерапия. Около половины пациентов с фармакорезистентным течением заболевания — это пациенты со структурными формами эпилепсии, являющиеся кандидатами на нейрохирургическое лечение [5, 6].

Часть пациентов со структурной фармакорезистентной эпилепсией нуждаются в проведении дополнительного обследования с использованием инвазивных методов: стереоэлектроэнцефалографии (СЭЭГ), субдуральных полосок или решеток. Оба метода продемонстрировали свою чувствительность; выбор конкретной методики индивидуален и зависит от решения клинициста после анализа клинической картины, данных нейровизуализации и скальповой энцефалографии. Процедура инвазивной энцефалографии подразумевает возможность использования электрической стимуляции (ЭС) для провокации типичных эпилептических приступов и картирования функционально значимых зон.

ИСТОРИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СТИМУЛЯЦИИ

Впервые кортикальную стимуляцию у человека в сознании независимо провели в 1874 г. физиолог Дэвид Ферриер и врач Роберт Бартлоу [7]. Р. Бартлоу проводил процедуру кортикальной стимуляции гальваническим током у пациентки с гнойной язвой волосяной части головы. Он заметил, что стимуляция затылочной коры вызывает появление вспышек света

в контралатеральном поле зрения, а также поворот головы и глаз в противоположную сторону.

Работу своих предшественников продолжил американский нейрохирург Харви Кушинг. В 1909 г. Х. Кушинг стал первым, кто отметил изолированные сенсорные феномены в разных частях тела пациентов при стимуляции постцентральной извилины [8].

На основании работ Х. Кушинга в 1930 г. канадский нейрохирург Уайлдер Пенфилд и немецкий невролог Отфрид Фёрстер опубликовали результаты своих работ по стимуляции коры фарадеевским током, буквально создав «карту» коры головного мозга, в которую входили моторные, тактильные, зрительные, обонятельные и другие зоны [8, 9].

В 40-х годах XIX в. Уайлдер Пенфилд и Герберт Джаспер ввели в неврологическую практику метод хронической инвазивной записи электроэнцефалограммы [10]. Запись проводилась с использованием суб- и эпидуральных решеток и полосок, а также глубинных электродов. Однако первые опыты не давали положительных результатов, смещаемость записываемой поверхности решеток и неточность установки глубинных электродов приводили к значительным погрешностям в определении локализации эпилептогенных очагов и функциональных зон. В связи с этим в 1950-х годах во Франции нейрохирургом Жаном Талайрахом была разработана стереотаксическая техника установки глубинных электродов. Изобретение французского нейрохирурга значительно повысило точность имплантации электродов и позволило создать стереотаксический атлас головного мозга. Ж. Талайрах и его коллега невролог Жан Банко совместно создали и начали использовать на практике метод СЭЭГ [11]. Первое время регистрация энцефалограммы занимала несколько часов. Эпилептические приступы индуцировали введением метразола и бемегида. С повышением опыта использования СЭЭГ длительность исследования увеличивалась вплоть до нескольких суток. Для определения зоны инициации приступов ориентировались на паттерн непровоцируемого эпилептического приступа. Использование глубинных электродов позволило изучать эпилептические приступы в трехмерном пространстве и наблюдать за распространением эпилептического приступа по волокнам белого вещества. Кроме того, одним из главных

преимуществ СЭЭГ стала возможность устанавливать записывающие электроды в медиальные и базальные отделы головного мозга.

Пионерами в стимуляционных исследованиях с использованием электродов для СЭЭГ стали сами создатели метода — Ж. Банко и Ж. Талайрах, в то время работавшие в госпитале Святой Анны в Париже. В 1960-х годах они наблюдали поведенческую и моторную реакцию в ответ на стимуляцию передней поясной извилины [12].

Ж. Банко и Ж. Талайрах использовали электрическую стимуляцию и для провокации типичных эпилептических приступов у пациентов [13]. На основе полученных результатов ими была предложена новая «электроклиническая» гипотеза эпилептогенной зоны (ЭЗ), характеризующая ее как зону первичной организации икctalной активности.

Несмотря на большое число нейрофизиологических исследований в СССР и России, публикации по ЭС через СЭЭГ отсутствуют.

ПОКАЗАНИЯ К ПРИМЕНЕНИЮ ИНВАЗИВНОЙ ЭНЦЕФАЛОГРАФИИ

Около 30–40 % пациентов со структурной фармакорезистентной эпилепсией нуждаются в инвазивной регистрации электроэнцефалограммы на этапе предхирургического обследования [14]. Инвазивное исследование является дополнительным и используется при расхождении данных основных неинвазивных методов: видеоэлектроэнцефалографического мониторинга, магнитно-резонансной томографии (МРТ), анализа семиотики эпилептических приступов [15]. В 2018 г. в Стэнфорде были определены следующие критерии отбора пациентов для проведения инвазивной электроэнцефалографии: 1) несоответствие данных икctalной или интерикctalной скальповой электроэнцефалограммы и семиологии приступов; 2) отсутствие потенциально эпилептогенных поражений по результатам МРТ; 3) несоответствие данных нейровизуализации и электроклинической гипотезы; 4) расположение предполагаемой ЭЗ вблизи функционально значимых участков коры головного мозга; 5) мультифокальное поражение по данным нейровизуализации [16]. Инвазивные методы электроэнцефалографии в сравнении со скальповой энцефалографией имеют большое преимущество в возможностях регистрации более широкого частотного диапазона [17]. В ряде исследований было показано, что высокочастотная активность является одним из значимых маркеров ЭЗ [18, 19], а удаление участка коры, продуцирующей высокочастотные осцилляции (high frequency oscillations, HFOs), с большей долей вероятности приведет к излечению пациента от эпилептических приступов [20, 21].

Значимым показанием к использованию инвазивных методов регистрации электроэнцефалограммы может быть необходимость картирования на этапе

предхирургического обследования близлежащих функционально значимых зон [22]. Особый интерес представляют участки моторного представительства и отделы коры головного мозга, ответственные за речевую функцию. На сегодняшний день существуют неинвазивные методы исследования функций коры головного мозга (функциональная МРТ, трактография) [23, 24], однако ЭС дает возможность определять функциональные зоны и их связи более детализированно [25].

МЕХАНИЗМ ДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СТИМУЛЯЦИИ

Нейробиологические основы действия прямого электрического тока на нервную ткань изучены не до конца. Впервые данные были суммированы в работе австрийского исследователя Фрэнка Рэттэ [26]. В его статье описана решающая роль вольтажзависимых натриевых каналов в возбуждении нервной ткани в ответ на стимул. Соответственно, в качестве точки приложения стимуляции была предложена та часть нейронов, которая наиболее богата каналами данного типа, — инициальный сегмент аксона. Более подверженными стимуляции оказались миелинизированные аксоны, причем тела этих нейронов показали меньшую возбудимость в сравнении с телами клеток с немиелинизированными аксонами. Помимо начального сегмента аксона ЭС может вызывать потенциал действия и в богатых натриевыми каналами перехватах Ранвье, что делает возможным стимуляцию не только коры головного мозга, но и проводящих путей [25]. Наибольшим возбуждением на ЭС реагируют инициальные участки аксонов пирамидных клеток [27]. С учетом глубины залегания этих клеток в коре головного мозга (5-й слой) и угасания импульса при увеличении расстояния до точки приложения ЭС с поверхности коры головного мозга требует большей силы импульса для получения необходимого ответа. В связи с этим при стимуляции с использованием глубинных электродов параметры силы тока будут ниже, чем при использовании субдуральных решеток или полосок. Кроме того, объем ткани, активируемой при ЭС, больше при подаче импульса на контакты, установленные в сером веществе, чем при аналогичной стимуляции белого вещества, что было продемонстрировано на 3D-модели [28]. ЭС действует не только локально, но и на расстоянии. В 2006 г. группа исследователей из Нью-Йорка продемонстрировала способность ЭС вызывать гемодинамические изменения на площади от 77 до 350 мм² от зоны подачи импульса [29].

МЕТОДОЛОГИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СТИМУЛЯЦИИ

Процедуру ЭС головного мозга через глубинные электроды для СЭЭГ используют в основном для достижения 2 целей: 1) провокации типичных эпилептических приступов у пациента; 2) картирования

функционально значимых зон [30]. ЭС проводят, как правило, на поздних этапах записи СЭЭГ, после фиксации непровоцируемых эпилептических приступов. В некоторых работах описано раннее использование стимуляции в случаях, когда на 1-й неделе исследования не зарегистрировано непровоцируемых приступов [31]. Не существует однозначного мнения относительно ЭС и использования ПЭП во время обследования. В одном из исследований проведение ЭС на фоне приема ПЭП обосновали снижением вероятности провокации нетипичного приступа, предполагая, что это делает процедуру стимуляции безопаснее для пациента и, соответственно, увеличивает уверенность клинициста в полученном результате [27]. В другой работе процедуру ЭС рекомендовали проводить на фоне отмены ПЭП, ожидая увеличения возбудимости нейронов, продуцирующих патологическую активность, и уменьшения вероятности ложноотрицательных результатов [31]. При исследовании в детской популяции было показано, что введение фосфенитоина значимо снижает вероятность провокации эпилептических приступов путем ЭС [32].

ПАРАМЕТРЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СТИМУЛЯЦИИ

При создании протокола ЭС необходимо учитывать ряд параметров, таких как монополярная или биполярная стимуляция, частотные характеристики, интенсивность стимуляции, длительность импульса, стимуляция «пачками» импульсов или одиночными стимулами [33]. Изменения этих параметров позволяют установить верные характеристики электрического поля для модулирующего действия на ткань головного мозга. Биполярная стимуляция осуществляется импульсами с переменной полярностью двумя смежными контактами электродов, тогда как при монополярной стимуляции электрический импульс проходит между «активным» электродом и референтом, находящимся на расстоянии (рис. 1).

Площадь охвата электрическим импульсом напрямую зависит от типа стимуляции; при биполярной стимуляции, несмотря на меньшую площадь стимуляции, интенсивность электрического раздражения коры будет выше. При стимуляции с применением субдуральной решетки или гридов возможно использование монополярной и биполярной техники с одинаковой эффективностью и безопасностью [34]. Для глубинных электродов большинство авторов рекомендуют применять биполярную стимуляцию [30, 35]. Существует 2 метода стимуляции — высокочастотная (ВЧ) (50–60 Гц) и низкочастотная (НЧ) (1 Гц) [31, 35]. G. Giovannelli и соавт. продемонстрировали возможность использования промежуточных частотных характеристик (6, 9, 12 Гц) для картирования речевой функции [36]. Для функционального картирования (за исключением первичных функциональных зон) рекомендуется исполь-

зовать ВЧ, в то время как для провокации эпилептических приступов — как ВЧ, так и НЧ виды стимуляции [30, 31, 35]. Подавать стимулы можно как единичными импульсами, так и «пачками» [31]. A. Trébuchon и P. Chauvel рекомендуют использовать единичные импульсы для стимуляции первичной моторной коры, гиппокампа и извилин Гешля при функциональном картировании во избежание возникновения эпилептических приступов или постразрядов (см. ниже). Для ЭС в целях картирования остальных зон коры головного мозга и провокации типичных эпилептических приступов применяют «пачки» стимулов [30, 31, 35, 37, 38]. Продолжительность подачи «пачки» импульсов зависит от целей стимуляции: короче (2–3 с) — для моторного картирования, дольше (5–10 с) — для картирования речевых зон, чтобы обеспечить достаточное количество времени для проведения лингвистического тестирования [35]. Интенсивность стимуляции характеризуется доставляемой силой тока и измеряется в миллиамперах (мА). ЭС рекомендуется начинать с минимальной силы тока (0,5–1 мА) и постепенно увеличивать на 0,5 мА до получения функционального ответа, постразрядов или эпилептического приступа [35]. Сила тока, достаточная для получения желаемого результата, разнится в зависимости от возраста пациентов и этиологии структурного повреждения и обычно составляет 0,5–5 мА [30, 35, 37, 38]. Продолжительность стимула измеряется в миллисекундах (мс) и характеризуется временем, на протяжении которого подается импульс. Стандартные параметры

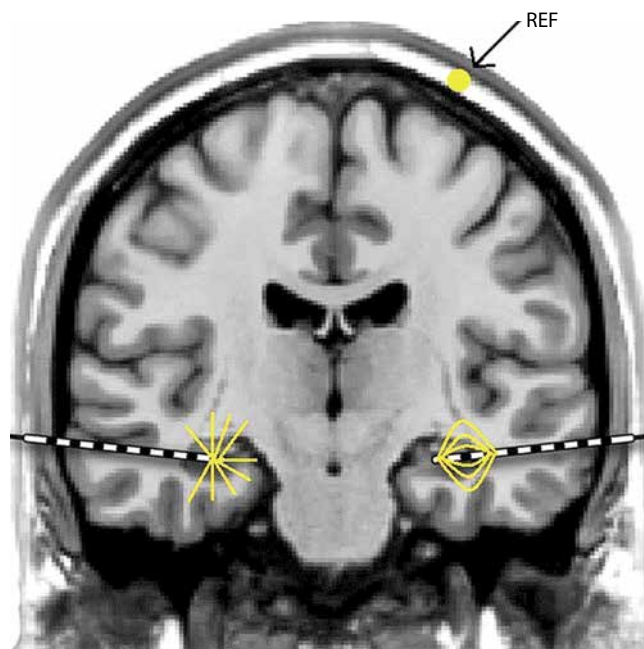


Рис. 1. Сравнение монополярной (слева) и биполярной (справа) стимуляции. REF — референтный электрод

Fig. 1. Comparison of monopolar (left) and bipolar (right) stimulation. REF — reference electrode

продолжительности импульса зависят от целей и участка головного мозга, на который подается стимул, и составляют обычно 0,5–3 мс [30, 35, 39].

ПОСТРАЗРЯДЫ

Ритмичная эпилептиформная активность, появляющаяся после подачи импульса, называется постразрядами (afterdischarges). Роль данных графоэлементов и их взаимосвязь с локализацией ЭЗ дискуссионны. F. Bartolomei и соавт. указывают, что их появление с высокой долей вероятности говорит о локализации ЭЗ под стимулируемым электродом [40]. Этот феномен, по мнению исследователей, является результатом повышенной возбудимости нейронов, участвующих в эпилептогенезе [41]. В других работах не отмечено преимущественного появления постразрядов в ЭЗ [42]. В ретроспективном анализе 2018 г. на основании проведенных обследований у 20 пациентов в эпилептологическом центре города Энларген (Германия) отмечалось появление постразрядов как при стимуляции ЭЗ, так и вне ее [43]. Всего было простимулировано 1366 электродов, установленных в зону инициации приступов, в ирритативную зону (в которой регистрируется интериктальная активность на энцефалограмме) и в здоровую ткань. В 19,2 % случаев регистрировалось появление следовых разрядов под электродами, установленными в зону инициации приступов, в 20,0 % случаев постразряды регистрировались под электродами в ирритативной зоне и в 12,5 % — под электродами вне эпилептогенной ткани. Разница оказалась статистически незначимой. Авторы исследования обратили внимание на конфигурацию, длительность и пропагацию постразрядов и отметили, что постразряды, локализующиеся в ЭЗ, имели большую длительность (>10 сек), большую частоту с преобладанием спайкового и островолнового компонентов, а также распространялись на соседние регионы. Кроме того, постразряды в ЭЗ с большей вероятностью провоцировали возникновение эпилептических приступов.

Появление постразрядов в процессе функционального картирования является нежелательным феноменом и ставит под угрозу безопасность и точность функционального картирования. При появлении постразрядов трудно определить, обусловлен ли функциональный ответ стимуляцией определенного региона или распространением постразрядов на соседние и отдаленные участки головного мозга [35].

ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ СТИМУЛЯЦИЯ ДЛЯ ПОИСКА ЭПИЛЕПТОГЕННОЙ ЗОНЫ

Эпилептогенная зона в классических работах характеризовалась как минимальный объем ткани головного мозга, удаление которого приведет к излечению пациента от приступов [44]. Из определения следует, что оценить границы ЭЗ возможно только после ней-

рохирургического вмешательства. Разработка Ж. Банко и Ж. Талайрахом метода СЭЭГ позволила ввести новую — электроклиническую — гипотезу ЭЗ [45]. Согласно их предположению ЭЗ — это зона начала и первичной организации иктальной активности. Соответственно, ЭЗ считается не только эпилептогенный очаг, но и связанные с ним структуры, участвующие в синхронизации иктальной активности по результатам инвазивной электроэнцефалографии. Электроклиническая гипотеза позволяет сделать предположение о локализации ЭЗ на дооперационном этапе.

Электрическая стимуляция по своей природе действует на ткань головного мозга как раздражитель и может провоцировать появление эпилептических приступов независимо, в том числе при стимуляции структур вне ЭЗ. Из этого следует, что к оценке спровоцированных ЭС эпилептических приступов с нетипичной для пациента семиологией следует подходить с осторожностью и в большинстве случаев интерпретировать такие приступы как ложноположительные.

Для провокации эпилептических приступов применяют биполярную стимуляцию с продолжительностью импульса от 0,5 до 3 мс и силой тока от 0,5 до 5 мА [30, 31, 46, 47]. Описано использование силы тока до 10–15 мА [43, 48, 49]. Возможно применение как ВЧ (>50 Гц), так и НЧ (1 Гц) стимуляции. Большинство авторов используют оба метода ЭС ввиду отсутствия данных о явном преимуществе одной модальности над другой [31, 46, 47]. J. Jacobs и соавт. описывают применение частоты 60 Гц [49]. E. Halgren и соавт. использовали частотный диапазон от 1 Гц до 30 Гц [50]. Данные об индуцированных приступах и параметрах ЭС, применявшейся в работах разных авторов, представлены в табл. 1 [13, 43, 46–58].

Доля пациентов, у которых типичные эпилептические приступы были спровоцированы ВЧ ЭС, варьировала от 30 до 100 % и была выше, чем процент пациентов, у которых приступы были спровоцированы НЧ ЭС (4,5–79 %) [46, 47, 52, 57]. Тем не менее С. Munari и соавт. указывали на то, что преимуществами НЧ ЭС являются провокация ранних, «субъективных» проявлений приступа, низкая частота артефактов от стимула и хорошая визуализация пространственного распространения иктальной активности [52]. Применение ВЧ ЭС чаще приводит к ложноположительным результатам — провокации нетипичных для пациентов эпилептических приступов. A. Trébuchon и соавт. отмечают, что ВЧ ЭС первичной моторной коры, гиппокампа и извилин Гешля может спровоцировать тонико-клонические эпилептические приступы [31]. С. Cuellar Oderiz и соавт. в группе из 103 пациентов зафиксировали 7,8 % ложноположительных приступов при использовании ВЧ ЭС и 1,5 % — при использовании НЧ ЭС. Авторы также обнаружили значимую разницу в провокации приступов у пациентов в зависимости от того, когда произошел спонтанный приступ

Таблица 1. Приступы, индуцированные электрической стимуляцией, по данным разных авторов

Table 1. Data on seizures induced by electric stimulation per various authors

Авторы, год Authors, year	Число пациен- тов, <i>n</i> Number of patients, <i>n</i>	Возраст на момент опера- ции, лет Age at the time of surgery, years	Доля пациен- тов, у которых удалось вы- звать типичные эпилептические приступы, % Percentage of patients in whom typical epileptic seizures were induced, %	Доля пациентов, у кото- рых приступы спрово- цированы НЧ и/или ВЧ стимуляцией, % Percentage of patients in whom seizures were provoked by LF and/or HF stimulation, %			Характеристики стимуляции Characteristics of stimulation	
				НЧ LF	ВЧ HF	НЧ и ВЧ LF and HF	Частота, Гц Frequency values, Hz	Сила тока, мА Current values, mA
J. Bancaud и соавт., 1974 [13] J. Bancaud et al., 1974 [13]	10	Диапазон: 18–27 Range: 18–27	100	—	—	—	ВЧ: 50 HF: 50	ВЧ: 12 В HF: 12 V
E. Halgren и соавт., 1978 [50] E. Halgren et al., 1978 [50]	36	Средний: 26 ± 8 (10–44) Mean: 26 ± 8 (10–44)	39	—	—	—	ВЧ: 30 НЧ: 1 HF: 30 LF: 1	ВЧ: 10 НЧ: 10 HF: 10 LF: 10
H.G. Wieser и соавт., 1979 [51] H.G. Wieser et al., 1979 [51]	82	—	67	—	—	—	ВЧ: 50 HF: 50	ВЧ: 0,5–1 HF: 0,5–1
G.P. Bernier и соавт., 1990 [48] G.P. Bernier et al., 1990 [48]	126	—	63	—	—	—	ВЧ: 50 HF: 50	ВЧ: 10 HF: 10
C. Munari и соавт., 1993 [52] C. Munari et al., 1993 [52]	24	—	ВЧ: 100 НЧ: 79 HF: 100 LF: 79	79	100	—	ВЧ: 50 НЧ: 1 HF: 50 LF: 1	ВЧ: 0,25–4 НЧ: 0,5–5 HF: 0,25–4 LF: 0,25–5
P. Kahane и соавт., 1993 [53] P. Kahane et al., 1993 [53]	10	—	100	—	—	—	ВЧ: 50 HF: 50	ВЧ: 0,5–4 НЧ: 0,5–4 HF: 0,5–4 LF: 0,5–4
F. Chassoux и соавт., 2000 [54] F. Chassoux et al., 2000 [54]	27	Медиана: 16,5 (5–41) Median: 16,5 (5–41)	100	—	—	—	ВЧ: 50 НЧ: 1 HF: 50 LF: 1	ВЧ: 0,5–2,5 НЧ: 0,5–5 HF: 0,5–2,5 LF: 0,5–5
E. Landré и соавт., 2004 [55] E. Landré et al., 2004 [55]	71	—	86	—	—	—	ВЧ: 50 НЧ: 1 HF: 50 LF: 1	ВЧ: 0,5–2,5 НЧ: 0,5–5 HF: 0,5–2,5 LF: 0,5–5
J. Jacobs и соавт., 2010 [49] J. Jacobs et al., 2010 [49]	20	—	90	—	—	—	ВЧ: 60 HF: 60	ВЧ: 0,2–10 HF: 0,2–10
A. McGonigal и соавт., 2018 [56] A. McGonigal et al., 2018 [56]	16	Диапазон: 7–46 Range: 7–46	19,20	—	—	—	ВЧ: 50 HF: 50	ВЧ: 0,5–3 HF: 0,5–3
S. Gollwitzer и соавт., 2018 [43] S. Gollwitzer et al., 2018 [43]	20	Средний: 32 ± 10,5 Mean: 32 ± 10,5	68	—	—	—	ВЧ: 50 HF: 50	ВЧ: 1–15 HF: 1–15
A. Trebuchon и соавт., 2020 [47] A. Trebuchon et al., 2020 [47]	346	Медиана: 25 (16,25–34) Median: 25 (16,25–34)	75	6,60	40,80	27,90	ВЧ: 50 НЧ: 1 HF: 50 LF: 1	ВЧ: 0,5–3 НЧ: 0,5–5 HF: 0,5–3 LF: 0,5–5

Авторы, год Authors, year	Число пациен- тов, <i>n</i> Number of patients, <i>n</i>	Возраст на момент опера- ции, лет Age at the time of surgery, years	Доля пациен- тов, у которых удалось вы- звать типичные эпилептические приступы, % Percentage of patients in whom typical epileptic seizures were induced, %	Доля пациентов, у кото- рых приступы спрово- цированы НЧ и/или ВЧ стимуляцией, % Percentage of patients in whom seizures were provoked by LF and/or HF stimulation, %			Характеристики стимуляции Characteristics of stimulation	
				НЧ LF	ВЧ HF	НЧ и ВЧ LF and HF	Частота, Гц Frequency values, Hz	Сила тока, мА Current values, mA
C. Cuello Oderiz и соавт., 2019 [46] C. Cuello Oderiz et al., 2019 [46]	103	Средний: 31 ± 11 Mean: 31 ± 11	59	4,5	43		ВЧ: 50 НЧ: 1 HF: 50 LF: 1	ВЧ: 0,5–5 НЧ: 0,5–5 HF: 0,5–5 LF: 0,5–5
R. Singh и соавт., 2020 [57] R. Singh et al., 2020 [57]	12	Медиана: 23,5 (7–52) Median: 23,5 (7–52)	91,67	16,67	75		ВЧ: 50 НЧ: 1 HF: 50 LF: 1	ВЧ: 0,5–4 НЧ: 3 HF: 0,5–4 LF: 3
M. Spilioti и соавт., 2020 [58] M. Spilioti et al., 2020 [58]	18	—	55	—	—	—	ВЧ: 50 HF: 50	ВЧ: 0,5–7 HF: 0,5–7

Примечание. НЧ — низкочастотная; ВЧ — высокочастотная.
Note. LF — low frequency; HF — high frequency.

(63,9 % среди пациентов, у которых спонтанный приступ был более чем 24 ч назад, и 25,0 % среди пациентов, у которых спонтанный приступ был менее чем 24 ч назад) [46]. Ложноотрицательные результаты являются следствием стимуляции недостаточного для провокации приступа объема ткани (ввиду особенности организации ЭЗ), наличия ПЭП во время проведения процедуры ЭС и слишком короткого периода, прошедшего после предыдущего приступа [31].

В литературе немного работ, посвященных сравнению результатов ЭС и постхирургических исходов. В работе C. Cuello Oderiz и соавт. (2019) было отмечено, что в группе пациентов с хорошими исходами (Engel 1 и 2) чаще наблюдались приступы, спровоцированные ЭС (70,5 %), по семиотике совпадающие с привычными приступами пациентов, по сравнению с группой плохих исходов (47,5 %) [46]. Кроме того, пациентам с хорошим исходом в среднем включали в зону резекции больше контактов электродов (63,2 %), стимуляция которых вызывала приступы. У пациентов с плохим исходом процент включения контактов достигал 33,3 %. У 7 из 103 пациентов, вошедших в исследование, не было зарегистрировано спонтанных эпилептических приступов во время проведения СЭЭГ. Тем не менее эпилептические приступы с типичной для пациента семиотикой были спровоцированы ЭС. Статистические показатели исходов в этой группе не отличались от показателей группы пациентов со спонтанными приступами в процессе исследования.

В самом крупном на данный момент исследовании, проведенном A. Trebuchon и соавт. (2020), ретроспективно проанализированы клинические случаи 346 пациентов, проходивших лечение по поводу структурной фармакорезистентной эпилепсии в 2 крупных европейских эпилептологических центрах — в Марселе (Франция) и Милане (Италия) [47]. Оценивали зависимость хирургического исхода от нескольких параметров, в частности от результатов проведенной ЭС. Полученные результаты свидетельствовали, что предикторами хорошего исхода являлись 3 фактора: информативность МРТ, этиология и данные ЭС. Значимыми факторами излечения пациентов от приступов стали наличие потенциально эпилептогенных поражений по данным МРТ, фокальная кортикальная дисплазия II типа и объемные образования, эпилептические приступы, спровоцированные НЧ ЭС. Стоит отметить, что для провокации приступов НЧ ЭС в среднем требовалась большая в сравнении с ВЧ ЭС продолжительность импульса (2 мс для НЧ и 0,5 мс для ВЧ) и сила тока (3 мА для НЧ и 1,5 мА для ВЧ).

ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ СТИМУЛЯЦИЯ ДЛЯ КАРТИРОВАНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ЗОН

Электрическая стимуляция позволяет определить наличие и распространенность функционально значимых зон в различных отделах головного мозга. Основная цель ЭС при проведении СЭЭГ — выявить функционально значимые зоны в прилежащем к ЭЗ участке

коры и определить их соотношение с ЭЗ для прогнозирования возможного появления неврологического дефицита после проведенного нейрохирургического вмешательства.

Для картирования функциональных зон чаще используют биполярную высокочастотную стимуляцию «пачками» стимулов [37, 59]. Для ЭС первичных корковых центров (моторных, слуховых, соматосенсорных, зрительных) рекомендуется использование НЧ стимуляции из-за риска провокации тонико-клонических приступов, для остальных участков возможно применение как НЧ, так и ВЧ стимуляции [30].

Идентифицировать первичные корковые центры, такие как моторный, соматосенсорный, зрительный или слуховой, относительно просто ввиду их точной анатомической локализации и возможности оценки поведенческих реакций [31]. Напротив, оценка и выбор точных стимуляционных параметров для картирования таких сложных функций, как речь, память, эмоции, осложнены вовлечением множества взаимосвязанных корковых и подкорковых центров.

Электрическая стимуляция первичной моторной коры вызывает двигательные феномены в контралатеральных конечностях. Зона регистрации первичного моторного ответа может выходить за пределы прецентральной извилины. Примерно у четверти пациентов первичный моторный ответ был индуцирован стимуляцией коры на 10 мм кпереди от центральной борозды, у 7 % данный ответ регистрировался стимуляцией кзади от центральной борозды [60].

Второй по частоте зоной, ЭС которой вызывает моторный ответ, является дополнительная моторная область. Эта область не имеет четко очерченной анатомической локализации и скорее представляет собой функциональную зону, не связанную напрямую со спинным мозгом и подкорковыми двигательными центрами, а взаимодействующую с первичной моторной и премоторной корой [61]. Характерные для дополнительной моторной области феномены могут быть вызваны стимуляцией обширного пространства медиальной поверхности лобной доли, включая медиальную поверхность верхней лобной извилины, парацентральную долю, и части поясной извилины [59]. Стимуляция дополнительной моторной области вызывает различные позотонические установки, тонические/дистонические установки контралатеральных конечностей, преимущественно в проксимальных отделах, возможны движения в ипсилатеральных конечностях, вовлечение рук и ног с обеих сторон, движения туловища, вокализация, девиация головы и глаз.

Сложные или простые двигательные реакции, спровоцированные ЭС, называют положительным моторным ответом. При стимуляции возможен также отрицательный моторный ответ — резкое прекращение двигательной активности с сохранением уровня сознания. Первичная зона отрицательного ответа находится

в нижней или средней лобной извилине, кпереди от первичной моторной коры. Нередко эта функциональная зона перекрывается с зоной моторной речи (зоной Брока), а отрицательный моторный ответ может проявляться и в языке, вызывая речевые нарушения, что иногда приводит к ошибкам в картировании функциональных речевых зон [31].

Исследование функции речи с использованием ЭС через инвазивные электроды необходимо при локализации эпилептогенных очагов в участках, находящихся в непосредственной близости к известным или предполагаемым речевым центрам доминантного полушария. Как правило, стимуляцию проводят через электроды, установленные в 3 региона: 1) задние отделы нижней лобной извилины (зона Брока); 2) задние отделы верхней височной и части нижней теменной извилины (зона Вернике); 3) задние отделы веретенообразной извилины левого полушария (базальная височная речевая зона) [62]. Для тестирования используют как базовые (счет, алфавит), так и более сложные задания (называние предметов на картинках, называние предметов после их описания, чтение) [63]. Экспрессивную речь рекомендуется исследовать с использованием заданий на чтение вслух, пересказ, счет. Сенсорный аспект речи и базальный речевой центр тестируют посредством называния предметов на картинках или называния предметов после описания [59]. Положительным результатом будет являться нарушение понимания или воспроизводства речи в ответ на подачу электрического стимула.

Картирование речевой функции с использованием инвазивных электродов показало свою эффективность как в определении латерализации [64], так и в локализации речевых центров [62]. В сравнительных исследованиях с интраоперационной электрокортикографией и Вада-тестом ЭС через глубинные электроды продемонстрировала свою информативность при меньшей (относительно интраоперационной электрокортикографии) инвазивности и более редкой встречаемости осложнений [64, 65]. Результаты ЭС могут различаться с данными, полученными с помощью функциональной МРТ, относительно локализации, но не латерализации речи [66].

Важным пунктом в планировании оптимальной стратегии картирования является определение пороговых характеристик для провокации желаемого функционального ответа и нежелательных постразрядов. R. Агуа и соавт. описывали меньший порог функционального (речевого) ответа ($3,1 \pm 1,5$ мА) в сравнении с порогом появления постразрядов ($4,0 \pm 2,0$ мА). При этом отмечено снижение пороговых характеристик с увеличением возраста испытуемых [37]. Та же группа авторов опубликовала данные подобного исследования в отношении сенсомоторной коры. Отмечены схожие результаты — порог функционального ответа был ниже (в среднем 3,4 мА), чем порог появления постразрядов (4,2 мА) [38].

Электрическая стимуляция с использованием глубинных электродов также позволяет оценивать зрительную функцию [33], исследовать память [31], эмоции [67, 68]. Исследования с использованием ЭС во время проведения СЭЭГ внесли огромный вклад в лучшее понимание функций различных участков головного мозга, включая недоступные ранее медиальные отделы лобной [69, 70] и височной долей [71]. Кроме того, данный метод дает возможность выявить зоны головного мозга, играющие ключевую роль в патогенезе не только эпилепсии, но и проявлении симптомов психических расстройств, таких как депрессия [68], обсессивно-компульсивное расстройство и шизофрения [72]. Более подробное изучение стимуляционных параметров и ответов на подачу стимулов также приведет к расширению возможностей использования стимуляционных методик (deep brain stimulation, responsive neurostimulation) и открытию новых точек приложения для нейромодуляции при лечении различных расстройств нервной системы.

ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СТИМУЛЯЦИИ В ПЕДИАТРИЧЕСКОЙ ПРАКТИКЕ

Стоит отметить малое количество работ, описывающих применение ЭС в детской популяции. Одна из главных причин этого — возможность использования методики СЭЭГ исключительно в специализированных эпилептологических центрах, необходимость наличия специальной подготовки и оборудования [73, 74]. СЭЭГ крайне редко проводят детям до 2 лет в связи со сложностями фиксации составных частей электродов к тонким и мягким костям черепа ребенка [75].

Главной особенностью работ, посвященных ЭС с использованием субдуральных решеток и полосок у детей, является более высокий в сравнении со взрослыми порог провокации эпилептических приступов и постразрядов, причем порог снижается с увеличением возраста пациента. Так, Р. Jayaага и соавт. в исследовании с участием 20 детей продемонстрировали снижение порога возникновения постразрядов от 10 мА у младенцев до 8 мА у пациентов 8 лет [76]. В недавней

работе G. Aungaroon и соавт. получены схожие результаты, авторы также отметили снижение порога провокации эпилептических приступов с увеличением возраста и необходимость использования больших параметров силы тока у детей с пороками развития головного мозга [77]. Высокий порог возбудимости при ЭС у детей раннего возраста в сравнении со взрослыми отмечен и в работах по интраоперационному нейромониторингу [78].

Сравнительные данные по использованию различных параметров ЭС через электроды для СЭЭГ в педиатрической и взрослой популяции не описаны. В мировой литературе встречаются работы с включением в группу пациентов детей, однако авторы не разделяли группы по возрасту и указывали общие параметры для всех пациентов [47, 50, 54, 57]. М. Cossu и соавт. в своей работе представили данные об успешном моторном картировании у 8 из 11 детей, однако параметры стимуляции не были освещены [79]. D. Taussig и соавт. в исследовании с участием группы из 65 детей использовали ВЧ ЭС и описали порог вызванного моторного ответа от 0,8 до 3,6 мА [80].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Электрическая стимуляция с использованием глубинных электродов для СЭЭГ является эффективным и безопасным вспомогательным методом диагностики структурной фармакорезистентной эпилепсии. Она продемонстрировала пользу как для провокации типичных эпилептических приступов с целью уточнения локализации ЭЗ, так и для картирования функционально значимых зон с целью ограничения объема резекции и постоперационного неврологического дефицита. Для получения корректных данных необходим подбор оптимальных стимуляционных параметров с учетом целей ЭС и точек приложения. Неверная установка параметров стимуляции может привести как к ложноположительным, так и к ложноотрицательным результатам. Использование ЭС дает толчок к дальнейшему изучению механизмов эпилептогенеза, границ ЭЗ и ее взаимосвязи с функциональными зонами, позволяет улучшить эффективность работы эпилептологов и нейрохирургов.

REFERENCES

1. Beghi E. The Epidemiology of epilepsy. *Neuroepidemiology* 2020;54(2):185–91. DOI: 10.1159/000503831
2. Эпилепсия и эпилептический статус у взрослых и детей. Клинические рекомендации Минздрава России. 2022. Доступно по: https://cr.minzdrav.gov.ru/schema/741_6?ysclid=lytt0xchgq539764487
Epilepsy and epileptic status in adults and children. Clinical recommendations. Ministry of Health of Russia. 2022. (In Russ.). Available at: https://cr.minzdrav.gov.ru/schema/741_6?ysclid=lytt0xchgq539764487
3. Крылов В.В., Гехт А.Б., Трифонов И.С. и др. Исходы хирургического лечения пациентов с фармакорезистентными формами эпилепсии. *Журнал неврологии и психиатрии им. С.С. Корсакова. Спецвыпуски* 2016;116(9–2):13–8. DOI: 10.17116/jnevro20161169213-18
Krylov V.V., Gueht A.B., Trifonov I.S. et al. Outcomes of surgical treatment of patients with pharmacoresistant epilepsy. *Zhurnal nevrologii i psichiatrii im S.S. Korsakova = S.S. Korsakov Journal of Neurology and Psychiatry* 2016;116(9–2):13–8. (In Russ.). DOI: 10.17116/jnevro20161169213-18

4. Kwan P., Arzimanoglou A., Berg A.T. et al. Definition of drug resistant epilepsy: consensus proposal by the ad hoc Task Force of the ILAE Commission on Therapeutic Strategies. *Epilepsia* 2010;51(6):1069–77. DOI: 10.1111/j.1528-1167.2009.02397.x
5. Scheffer I.E., Berkovic S., Capovilla G. et al. ILAE classification of the epilepsies: position paper of the ILAE Commission for Classification and Terminology. *Epilepsia* 2017;58(4):512–21. DOI: 10.1111/epi.13709
6. Зуев А.А., Головтеев А.Л., Педяш Н.В. и др. Возможности хирургического лечения фармакорезистентной эпилепсии с использованием робот-ассистированной имплантации глубоных электродов для проведения инвазивной стереоэлектронцефалографии. *Нейрохирургия* 2020;22(1):12–20. DOI: 10.17650/1683-3295-2020-22-1-12-20
Zuev A.A., Golovtsev A.L., Pedyash N.V. et al. Possibilities for surgical treatment of the pharmacoresistant form of epilepsy using robot-assisted implantation of deep electrodes for invasive stereo-electroencephalography. *Neurokhirurgiya = Russian Journal of Neurosurgery* 2020;22(1):12–20. (In Russ.). DOI: 10.17650/1683-3295-2020-22-1-12-20
7. Bartholow R. Experimental investigations into the functions of the human brain. *Am J Med Sci* 1874;66:305–13.
8. Leblanc R. Cushing, Penfield, and cortical stimulation. *J Neurosurg* 2018;130(1):76–83. DOI: 10.3171/2017.7.JNS171256
9. Foerster O., Penfield W. The structural basis of traumatic epilepsy and results of radical operation. *Brain* 1930;53(2):99–119. DOI: 10.1093/brain/53.2.99
10. Penfield W., Boldrey E. Somatic motor and sensory representation in the cerebral cortex of man as studied by electrical stimulation. *Brain* 1937;60(4):389–443. DOI: 10.1093/brain/60.4.389
11. Reif P.S., Strzelczyk A., Rosenow F. The history of invasive EEG evaluation in epilepsy patients. *Seizure* 2016;41:191–5. DOI: 10.1016/j.seizure.2016.04.006
12. Talairach J., Bancaud J., Geier S. et al. The cingulate gyrus and human behaviour. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol* 1973;34(1):45–52. DOI: 10.1016/0013-4694(73)90149-1
13. Bancaud J., Talairach J., Morel P. et al. “Generalized” epileptic seizures elicited by electrical stimulation of the frontal lobe in man. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol* 1974;37(3):275–82. DOI: 10.1016/0013-4694(74)90031-5
14. Kovac S., Vakharia V.N., Scott C., Diehl B. Invasive epilepsy surgery evaluation. *Seizure* 2017;44:125–36. DOI: 10.1016/j.seizure.2016.10.016
15. Балацкая А.С., Педяш Н.В., Головтеев А.Л. и др. Стереоэлектронцефалография в прехирургическом обследовании пациентов с фармакорезистентной фокальной эпилепсией. Эпилепсия и пароксизмальные состояния 2022;14(2):183–94. DOI: 10.17749/2077-8333/epi.par.con.2022.090
Balatskaya A.S., Pedyash N.V., Golovtsev A.L. et al. Stereoelectroencephalography in pre-surgical evaluation of patients with drug-resistant focal epilepsy. *Epilepsy and paroxysmal conditions*. 2022;14(2):183–94. (In Russ.). DOI: 10.17749/2077-8333/epi.par.con.2022.090
16. Sheng J., Liu S., Qin H. et al. Drug-resistant epilepsy and surgery. *Curr Neuropsychol* 2018;16(1):17–28. DOI: 10.2174/1570159X15666170504123316
17. Pfurtscheller G., Cooper R. Frequency dependence of the transmission of the EEG from cortex to scalp. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol* 1975;38(1):93–6. DOI: 10.1016/0013-4694(75)90215-1
18. Grinenko O., Li J., Mosher J.C. et al. A fingerprint of the epileptogenic zone in human epilepsies. *Brain* 2018;141(1):117–31. DOI: 10.1093/brain/awx306
19. David O., Blauwblomme T., Job A.S. et al. Imaging the seizure onset zone with stereo-electroencephalography. *Brain* 2011;134(Pt 10):2898–911. DOI: 10.1093/brain/awr238
20. Alarcon G., Binnie C.D., Elwes R.D., Polkey C.E. Power spectrum and intracranial EEG patterns at seizure onset in partial epilepsy. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol* 1995;94(5):326–37. DOI: 10.1016/0013-4694(94)00286-t
21. Höller Y., Kutil R., Klaffenböck L. et al. High-frequency oscillations in epilepsy and surgical outcome. A meta-analysis. *Front Hum Neurosci* 2015;9:574. DOI: 10.3389/fnhum.2015.00574
22. Kovac S., Scott C.A., Maglajlija V. et al. Extraoperative electrical cortical stimulation: characteristics of motor responses and correlation with precentral gyrus. *J Clin Neurophysiol* 2011;28(6):618–24. DOI: 10.1097/WNP.0b013e31823cc0f9
23. Chaudhary U.J., Duncan J.S. Applications of blood-oxygen-level-dependent functional magnetic resonance imaging and diffusion tensor imaging in epilepsy. *Neuroimaging Clin N Am* 2014;24(4):671–94. DOI: 10.1016/j.nic.2014.07.001
24. Ni B., Wang X., Yu T. et al. Pre-surgical language mapping in epilepsy: using fMRI in Chinese-speaking patients. *Front Hum Neurosci* 2019;13:183. DOI: 10.3389/fnhum.2019.00183
25. Sarubbo S., Tate M., De Benedictis A. et al. Mapping critical cortical hubs and white matter pathways by direct electrical stimulation: an original functional atlas of the human brain. *Neuroimage* 2020;205:116237. DOI: 10.1016/j.neuroimage.2019.116237
26. Rattay F. The basic mechanism for the electrical stimulation of the nervous system. *Neuroscience* 1999;89(2):335–46. DOI: 10.1016/S0306-4522(98)00330-3
27. Kovac S., Kahane P., Diehl B. Seizures induced by direct electrical cortical stimulation – mechanisms and clinical considerations. *Clin Neurophysiol* 2016;127(1):31–9. DOI: 10.1016/j.clinph.2014.12.009
28. Shindhelm A.C., Thio B.J., Sinha S.R. Modeling the impact of electrode/tissue geometry on electrical stimulation in stereo-EEG. *J Clin Neurophysiol* 2023;40(4):339–49. DOI: 10.1097/WNP.0000000000000892
29. Suh M., Bahar S., Mehta A.D., Schwartz T.H. Blood volume and hemoglobin oxygenation response following electrical stimulation of human cortex. *Neuroimage* 2006;31(1):66–75. DOI: 10.1016/j.neuroimage.2005.11.030
30. Isnard J., Taussig D., Bartolomei F. et al. French guidelines on stereoelectroencephalography (SEEG). *Neurophysiol Clin* 2018;48(1):5–13. DOI: 10.1016/j.neucli.2017.11.005
31. Trébucqon A., Chauvel P. Electrical stimulation for seizure induction and functional mapping in stereoelectroencephalography. *J Clin Neurophysiol* 2016;33(6):511–21. DOI: 10.1097/WNP.0000000000000313
32. Arya R., Aungaroon G., Zea Vera A. et al. Fosphenytoin pre-medication for pediatric extra-operative electrical stimulation brain mapping. *Epilepsy Res* 2018;140:171–6. DOI: 10.1016/j.epilepsyres.2018.01.017
33. Landazuri P., Minotti L. Electrical stimulation for mapping of the epileptogenic zone. In: *Invasive studies of the human epileptic brain: Principles and practice*. Ed. by S.D. Lhatoo, P. Kahane, H.O. Luders. Oxford: Oxford University Press, 2019. Pp. 161–172. DOI: 10.1093/med/9780198714668.003.0013
34. Kovac S., Scott C.A., Maglajlija V. et al. Comparison of bipolar versus monopolar extraoperative electrical cortical stimulation mapping in patients with focal epilepsy. *Clin Neurophysiol* 2014;125(4):667–74. DOI: 10.1016/j.clinph.2013.09.026
35. Grande K.M., Ihnen S.K.Z., Arya R. Electrical stimulation mapping of brain function: a comparison of subdural electrodes and stereo-EEG. *Front Hum Neurosci* 2020;14:61291. DOI: 10.3389/fnhum.2020.61291
36. Giovannelli G., Pelliccia V., Abarrategui B. et al. Intermediate stimulation frequencies for language mapping using Stereo-EEG. *Clin Neurophysiol* 2022;144:91–7. DOI: 10.1016/j.clinph.2022.10.003
37. Arya R., Ervin B., Dudley J. et al. Electrical stimulation mapping of language with stereo-EEG. *Epilepsy Behav* 2019;99:106395. DOI: 10.1016/j.yebeh.2019.06.038
38. Arya R., Ervin B., Holloway T. et al. Electrical stimulation sensorimotor mapping with stereo-EEG. *Clin Neurophysiol* 2020;131(8):1691–701. DOI: 10.1016/j.clinph.2020.04.159
39. Hamberger M.J., Williams A.C., Schevon C.A. Extraoperative neurostimulation mapping: results from an international survey

- of epilepsy surgery programs. *Epilepsia* 2014;55(6):933–9. DOI: 10.1111/epi.12644
40. Bartolomei F., Nica A., Valenti-Hirsch M.P. et al. Interpretation of SEEG recordings. *Neurophysiol Clin* 2018;48(1):53–7. DOI: 10.1016/j.neucli.2017.11.010
 41. Wyler A.R., Ward A.A. Jr. Neurons in human epileptic cortex. Response to direct cortical stimulation. *J Neurosurg* 1981;55(6):904–8. DOI: 10.3171/jns.1981.55.6.0904
 42. Mormann F., Jefferys J.G. Neuronal firing in human epileptic cortex: the ins and outs of synchrony during seizures. *Epilepsy Curr* 2013;13(2):100–2. DOI: 10.5698/1535-7597-13.2.100
 43. Gollwitzer S., Hopfengärtner R., Rössler K. et al. Afterdischarges elicited by cortical electric stimulation in humans: when do they occur and what do they mean? *Epilepsy Behav* 2018;87:173–9. DOI: 10.1016/j.yebeh.2018.09.007
 44. Rosenow F., Lüders H. Presurgical evaluation of epilepsy. *Brain* 2001;124(Pt 9):1683–700. DOI: 10.1093/brain/124.9.1683
 45. Kahane P., Landré E., Minotti L. et al. The Bancaud and Talairach view on the epileptogenic zone: a working hypothesis. *Epileptic Disord* 2006;8(Suppl 2):S16–26.
 46. Cuello Oderiz C., von Ellenrieder N., Dubeau F. et al. Association of cortical stimulation-induced seizure with surgical outcome in patients with focal drug-resistant epilepsy. *JAMA Neurol* 2019;76(9):1070–8. DOI: 10.1001/jamaneurol.2019.1464
 47. Trebuchon A., Racila R., Cardinale F. Electrical stimulation for seizure induction during SEEG exploration: a useful predictor of postoperative seizure recurrence? *J Neurol Neurosurg Psychiatry* 2020;jnnp-2019-322469. DOI: 10.1136/jnnp-2019-322469
 48. Bernier G.P., Richer F., Giard N. et al. Electrical stimulation of the human brain in epilepsy. *Epilepsia* 1990;31(5):513–20. DOI: 10.1111/j.1528-1157.1990.tb06099.x
 49. Jacobs J., Zijlmans M., Zelman R. et al. Value of electrical stimulation and high frequency oscillations (80–500 Hz) in identifying epileptogenic areas during intracranial EEG recordings. *Epilepsia* 2010;51(4):573–82. DOI: 10.1111/j.1528-1157.2009.02389.x
 50. Halgren E., Walter R.D., Cherlow D.G., Crandall P.H. Mental phenomena evoked by electrical stimulation of the human hippocampal formation and amygdala. *Brain* 1978;101(1):83–117. DOI: 10.1093/brain/101.1.83
 51. Wieser H.G., Bancaud J., Talairach J. et al. Comparative value of spontaneous and chemically and electrically induced seizures in establishing the lateralization of temporal lobe seizures. *Epilepsia* 1979;20(1):47–59. DOI: 10.1111/j.1528-1157.1979.tb04775.x
 52. Munari C., Kahane P., Tassi L. et al. Intracerebral low frequency electrical stimulation: a new tool for the definition of the “epileptogenic area”? *Acta Neurochir Suppl (Wien)* 1993;58: 181–5. DOI: 10.1007/978-3-7091-9297-9_42
 53. Kahane P., Tassi L., Francione S. et al. [Electroclinical manifestations elicited by intracerebral electric stimulation “shocks” in temporal lobe epilepsy (In French)]. *Neurophysiol Clin* 1993;23(4):305–26. DOI: 10.1016/s0987-7053(05)80123-6
 54. Chassoux F., Devaux B., Landré E. et al. Stereoelectroencephalography in focal cortical dysplasia: a 3D approach to delineating the dysplastic cortex. *Brain* 2000;123(Pt 8):1733–51. DOI: 10.1093/brain/123.8.1733
 55. Landré E., Turak B., Toussaint D., Trottier S. Intérêt des stimulations électriques intracérébrales en stéréoelectroencéphalographie dans les épilepsies partielles. *Epilepsies* 2004;16:213–25. (In French).
 56. McGonigal A., Lagarde S., Trébuchon-Dafonseca A. et al. Early onset motor semiology in seizures triggered by cortical stimulation during SEEG. *Epilepsy Behav* 2018;88:262–7. DOI: 10.1016/j.yebeh.2018.09.017
 57. Singh R., Principe A., Tadel F. et al. Mapping the insula with stereo-electroencephalography: the emergence of semiology in insula lobe seizures. *Ann Neurol* 2020;88(3):477–88. DOI: 10.1002/ana.25817
 58. Spilioti M., Winston J.S., Centeno M. et al. The nature, frequency and value of stimulation induced seizures during extraoperative cortical stimulation for functional mapping. *Seizure* 2020;81:71–5. DOI: 10.1016/j.seizure.2020.07.027
 59. So E.L., Alwaki A. A guide for cortical electrical stimulation mapping. *J Clin Neurophysiol* 2018;35(2):98–105. DOI: 10.1097/WNP.0000000000000435
 60. Nii Y., Uematsu S., Lesser R.P., Gordon B. Does the central sulcus divide motor and sensory functions? Cortical mapping of human hand areas as revealed by electrical stimulation through subdural grid electrodes. *Neurology* 1996;46(2):360–7. DOI: 10.1212/wnl.46.2.360
 61. Nachev P., Kennard C., Husain M. Functional role of the supplementary and pre-supplementary motor areas. *Nat Rev Neurosci* 2008;9(11):856–69. DOI: 10.1038/nrn2478
 62. Aron O., Jonas J., Colnat-Coulbois S., Maillard L. Language mapping using stereo electroencephalography: a review and expert opinion. *Front Hum Neurosci* 2021;15:619521. DOI: 10.3389/fnhum.2021.619521
 63. Hamberger M.J. Cortical language mapping in epilepsy: a critical review. *Neuropsychol Rev* 2007;17(4):477–89. DOI: 10.1007/s10655-007-9046-6
 64. Alonso F., Sweet J., Miller J. Speech mapping using depth electrodes: the “electric Wada”. *Clin Neurol Neurosurg* 2016;144:88–90. DOI: 10.1016/j.clineuro.2016.03.017
 65. Young J.J., Coulehan K., Fields M.C. et al. Language mapping using electrocorticography versus stereoelectroencephalography: a case series. *Epilepsy Behav* 2018;84:148–51. DOI: 10.1016/j.yebeh.2018.04.032
 66. Holloway T., Leach J.L., Tenney J.R. et al. Functional MRI and electrical stimulation mapping for language localization: a comparative meta-analysis. *Clin Neurol Neurosurg* 2022;222:107417. DOI: 10.1016/j.clineuro.2022.107417
 67. Parvizi J., Veit M.J., Barbosa D.A.N. et al. Complex negative emotions induced by electrical stimulation of the human hypothalamus. *Brain Stimul* 2022;15(3):615–23. DOI: 10.1016/j.brs.2022.04.008
 68. Fausto C. The integration of emotional expression and experience: a pragmatist review of recent evidence from brain stimulation. *Emotion Rev* 2019;11(1):27–38. DOI: 10.1177/1754073917723461
 69. Long Q., Li W., Zhang W. et al. Electrical stimulation mapping in the medial prefrontal cortex induced auditory hallucinations of episodic memory: a case report. *Front Hum Neurosci* 2022;16:815232. DOI: 10.3389/fnhum.2022.815232
 70. Caruana F., Avanzini P., Gozzo F. et al. Mirth and laughter elicited by electrical stimulation of the human anterior cingulate cortex. *Cortex* 2015;71:323–31. DOI: 10.1016/j.cortex.2015.07.024
 71. Bartolomei F., Lagarde S., Villalon S.M. et al. The “Proust phenomenon”: odor-evoked autobiographical memories triggered by direct amygdala stimulation in human. *Cortex* 2017;90:173–5. DOI: 10.1016/j.cortex.2016.12.005
 72. Popa I., Donos C., Barborica A. et al. Intrusive thoughts elicited by direct electrical stimulation during stereo-electroencephalography. *Front Neurol* 2016;7:114. DOI: 10.3389/fneur.2016.00114
 73. Gumnit R.J., Labiner D.M., Fountain N.B. et al. Data on Specialized Epilepsy Centers: report to the Institute of Medicine’s Committee on the Public Health Dimensions of the Epilepsies. In: *Epilepsy across the spectrum: promoting health and understanding*. Ed. by M.J. England, C.T. Liverman, A.M. Schultz et al. Washington (DC): National Academies Press (US), 2012. C. Available at: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK100603/>
 74. Gaillard W.D., Jette N., Arnold S.T. et al. Task force for pediatric epilepsy surgery, commission for pediatrics, and the surgical commission of the international league against epilepsy. Establishing criteria for pediatric epilepsy surgery center levels of care: report from the ILAE Pediatric Epilepsy Surgery Task Force. *Epilepsia* 2020;61(12):2629–42. DOI: 10.1111/epi.16698
 75. Katz J., Armstrong C., Kvint S. et al. Stereoelectroencephalography in the very young: case report.

- Epilepsy Behav Rep 2022;19:100552.
DOI: 10.1016/j.ebr.2022.100552
76. Jayakar P., Lesser R.P. Extraoperative functional mapping. In: Epilepsy: A comprehensive textbook. Ed. by J.J. Engel, T.A. Pedley. 2nd edn. Philadelphia, PA: Lippincott Williams & Wilkins, 2008.
77. Aungaroon G., Zea Vera A., Horn P.S. et al. After-discharges and seizures during pediatric extra-operative electrical cortical stimulation functional brain mapping: incidence, thresholds, and determinants. *Clin Neurophysiol* 2017;128(10):2078–86. DOI: 10.1016/j.clinph.2017.06.259
78. Signorelli F., Guyotat J., Mottolese C. et al. Intraoperative electrical stimulation mapping as an aid for surgery of intracranial lesions involving motor areas in children. *Childs Nerv Syst* 2004;20(6):420–6. DOI: 10.1007/s00381-004-0961-z
79. Cossu M., Schiariti M., Francione S. et al. Stereoelectroencephalography in the presurgical evaluation of focal epilepsy in infancy and early childhood. *J Neurosurg Pediatr* 2012;9(3):290–300. DOI: 10.3171/2011.12.PEDS11216
80. Taussig D., Chipaux M., Lebas A. et al. Stereoelectroencephalography (SEEG) in 65 children: an effective and safe diagnostic method for pre-surgical diagnosis, independent of age. *Epileptic Disord* 2014;16(3):280–95. DOI: 10.1684/epd.2014.0679

Вклад авторов

В.О. Русскин: разработка концепции исследования, сбор данных для анализа, написание и редактирование текста статьи;
А.А. Кузнецова, В.Б. Соловьев, В.А. Сандриков: разработка концепции исследования, редактирование текста статьи;
А.В. Левов, Ф.Б. Бердинов, М.И. Лившиц: разработка концепции исследования.

Authors' contributions

V.O. Russkin: developing a research concept, collecting data for analysis, article writing, editing of the article;
A.A. Kuznetsova, V.B. Solovyev, V.A. Sandrikov: developing a research concept, editing of the article;
A.V. Levov, F.B. Berdinov, M.I. Livshits: developing a research concept.

ORCID авторов / ORCID of authors

В.О. Русскин / V.O. Russkin: <https://orcid.org/0000-0003-4743-5522>
А.А. Кузнецова / A.A. Kuznetsova: <https://orcid.org/0000-0002-0344-9765>
В.Б. Соловьев / V.B. Solovyev: <https://orcid.org/0000-0003-0024-4630>
А.В. Левов / A.V. Levov: <https://orcid.org/0000-0003-3035-9375>
Ф.Б. Бердинов / F.B. Berdinov: <https://orcid.org/0000-0001-5314-4436>
М.И. Лившиц / M.I. Livshits: <https://orcid.org/0000-0001-7010-0101>
В.А. Сандриков / V.A. Sandrikov: <https://orcid.org/0000-0003-1535-5982>

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Финансирование. Работа выполнена без спонсорской поддержки.
Funding. The work was performed without external funding.