

Становление инвазивной ЭЭГ в хирургии эпилепсии (обзор литературы)

В.М. Джафаров, Д.А. Рзаев

Федеральный центр нейрохирургии Минздрава РФ
630087, Новосибирск, ул. Немировича-Данченко, 132/1

Резюме

Для определения объема хирургического вмешательства при медикаментозно-резистентной эпилепсии используются методы диагностики, направленные на поиск зоны начала эпилептических приступов. Среди всех методов диагностики «золотым стандартом» в определении эпилептогенной зоны является инвазивный ЭЭГ-видеомониторинг, к настоящему моменту имеющий богатую историю применения. В данной статье приведена историческая справка об инвазивной записи ЭЭГ с обзором литературы, касающимся техник проведения, анализа их преимуществ и недостатков, актуальных вопросов на сегодняшний день.

Ключевые слова: эпилепсия, ЭЭГ, инвазивный ЭЭГ-видеомониторинг, стерео-ЭЭГ, субдуральный ЭЭГ-мониторинг.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Благодарности. Авторы благодарят Г.И. Мойсак за критический анализ выполненной работы.

Автор для переписки: Джафаров В.М., e-mail: mvijayd@hotmail.com

Для цитирования: Джафаров В.М., Рзаев Д.А. Становление инвазивной ЭЭГ в хирургии эпилепсии (обзор литературы). *Сибирский научный медицинский журнал*. 2020; 40 (6): 23–33. doi: 10.15372/SSMJ20200603

Development of invasive EEG in epilepsy surgery (review)

V.M. Dzhaifarov, J.A. Rzaev

Novosibirsk Center of Neurosurgery of Minzdrav of Russia
630087, Novosibirsk, Nemirovicha-Danchenko str., 132/1

Abstract

There are different diagnostic methods that used for localization of the seizure onset zone in focal refractory epilepsy cases. Invasive video-EEG recording is the «gold standard» in determining the epileptogenic zone among other diagnostic methods. Invasive EEG already has a long history of using. This article provides historical review and analysis of the techniques, their advantages and disadvantages, current issues.

Key words: epilepsy, EEG, invasive video-EEG monitoring, stereo-EEG, subdural EEG monitoring.

Conflict of interest. Authors declare no conflict of interest.

Acknowledgments. Authors would like to thank G.I. Moysak for critical review of this manuscript.

Correspondence author: Dzhaifarov V.M., e-mail: mvijayd@hotmail.com

Citation: Dzhaifarov V.M., Rzaev J.A. Development of invasive EEG in epilepsy surgery (review). *Sibirskiy nauchnyy meditsinskiy zhurnal = Siberian Scientific Medical Journal*. 2020; 40 (6): 23–33. [In Russian]. doi: 10.15372/SSMJ20200603

Введение

Несмотря на значительные успехи в диагностике и лечении эпилепсии за последние годы, часть больных имеет рефрактерный к терапии характер течения заболевания. По эпидемиологическим данным около 30 % пациентов страдает фармакорезистентной эпилепсией, а 10 % являются кандидатами на хирургическое лечение [1, 2]. Для определения объема хирургического вмешательства используются методы диагностики, направленные на поиск эпилептогенной зоны (ЭЗ). Данная зона подразумевает скопление патологических клеток в мозге, ответственных за периодический запуск процессов возбудимости и, тем самым, за возникновение эпилептического приступа. Неинвазивные методы исследования, такие как скальповая электроэнцефалография (ЭЭГ), ЭЭГ-видеомониторинг, ЭЭГ высокой плотности, магнитоэнцефалография и др., не всегда отображают полноценную информацию о локализации эпилептогенной зоны [3]. В таких случаях среди всех методов диагностики «золотым стандартом» в определении зоны начала приступов является инвазивный ЭЭГ-видеомониторинг (инвазивная ЭЭГ) [4, 5]. Амплитуды потенциалов, записанные с помощью инвазивной ЭЭГ, в 2–58 раз больше, чем при скальповой ЭЭГ [6].

Быстрое распространение приступа по головному мозгу, имитация одних видов эпилепсии другими, наличие технических сложностей в проведении инвазивной ЭЭГ, пропуск дополнительной ЭЗ являются причинами некорректных выводов, что приводит к неудовлетворительным результатам хирургического лечения, которое может выполняться с неоправданным риском. С появлением многообразия техник проведения инвазивной ЭЭГ частота выявления зоны начала приступов стала существенно выше, но единый подход к выбору определенной техники в настоящее время отсутствует. Выбор методики инвазивного ЭЭГ-видеомониторинга может зависеть от многих факторов, что требует уточнения и структуризации.

Разумное определение объема инвазивной ЭЭГ у конкретного больного позволит получить полноценную информацию о зоне начала приступов и, соответственно, выбрать наиболее подходящий метод лечения. В обзоре дана историческая справка о становлении инвазивной ЭЭГ, описаны преимущества и недостатки каждой из техник и дальнейшие тенденции развития этого направления.

Появление и совершенствование инвазивной ЭЭГ. Первые подробные описания эпилепсии встречаются в эпоху Возрождения [7]. Од-

нако эпилептические приступы были описаны и ранее, имели название «падучих болезней», а носители этого недуга считались скорее физически больными, нежели магически околдованными или проклятыми оккультными процедурами. Многие известные люди разных эпох, такие как Сократ, Юлий Цезарь, Наполеон Бонапарт, Достоевский, Нобель, Ван Гог страдали эпилепсией. Врачи обращали внимание на проявление судорог и использовали различные попытки их купирования. Было отмечено, что травматические повреждения головы и новообразования головного мозга сопровождались эпилептическими судорогами. Хорсли был первым нейрохирургом, который рассматривал необходимость оперативного лечения больных с эпилепсией [8]. Хирургическое лечение эпилепсии стали применять задолго до появления скальповой и инвазивной ЭЭГ. Выделяют несколько ключевых факторов в становлении хирургии эпилепсии [8–10]: появление нейрохирургии, Первая и Вторая мировые войны, открытие ЭЭГ, междисциплинарный подход в изучении эпилепсии.

Открытие в XIX в. принципов асептики, антисептики и анестезии дало возможность хирургам расширить свои возможности оперативного лечения. Труды Харви Кушинга, американского хирурга и основоположника современной нейрохирургии, направленные на усовершенствование техники хирургии, анестезиологического подхода и мониторинга различных функций во время операции, позволили выделить нейрохирургию в отдельную хирургическую науку. Проводимые в конце XIX – начале XX в. Харви Кушингом и его учеником Уолтером Денди операции на головном мозге позволили многим хирургам, неврологам, исследователям-физиологам «заглянуть» внутрь черепной коробки. Уолтер Денди также совершенствовал технику, сделал множество открытий в нейрохирургии, позднее названных в его честь. Различные находки при оперативных вмешательствах способствовали уточнению типа патологического процесса, а также изучению важных функций головного мозга. Достижения этих известных людей обеспечили снижение уровня летальности и усовершенствование качества хирургической помощи больным с патологией головного мозга, что приблизило исследователей к решению проблемы эпилепсии.

Наряду с развитием хирургии головного мозга, Первая и Вторая мировые войны послужили причиной роста количества многочисленных травматических поражений головы, резко увеличилось число больных с симптомами эпилепсии. Вопрос хирургической коррекции последствий травм становился все более острым. Большой

вклад в решение этой проблемы внес немецкий невролог и хирург Отфрид Ферстер. Он проводил различные операции на головном и спинном мозге, на поврежденных периферических нервах, детально изучил картину эпилептического приступа, особенности неврологического статуса и результаты пневмоэнцефалографии. Используя эти данные, Ферстер начал выполнять операции на головном мозге под местной анестезией с электростимуляцией коры, создавая прообраз современных операций с нейрофизиологическим контролем. Он первым аргументировал важность полноты резекции патологического участка в мозге для достижения регресса приступов. При помощи электростимуляции Ферстер открыл известную в настоящее время дополнительную моторную кору.

Еще одним значимым условием развития хирургии эпилепсии стало открытие метода регистрации электрических потенциалов головного мозга (ЭЭГ) человека Хансом Бергером в 1924 г. [11]. ЭЭГ стала широко использоваться в клинической и исследовательской практике. Многие неврологи, такие как Фредерик Гиббс, Уильям Леннокс, Хэллоуэлл Дэвис, отмечали большую значимость ЭЭГ в диагностике эпилепсии, опухолевых образований головного мозга. Впервые были выявлены «молчание» ЭЭГ над опухолевой тканью и первый иктальный ЭЭГ-паттерн эпилептического приступа. Однако неинвазивная ЭЭГ имела недостатки: наличие артефактов, плохое качество записи из-за прохождения сигнала с поверхности головного мозга через толщину костных и мягких структур к электродам. Появлению первой инвазивной записи ЭЭГ в палате и ее дальнейшему совершенствованию способствовал междисциплинарный подход. Благодаря успешной кооперации нейрохирурга Уайлдера Пенфилда и невролога-нейрофизиолога Герберта Джаспера зародилась история Монреальского института неврологии, в котором было выполнено множество открытий в нейронауке. Стоит отметить, что именно Джаспер убедил Пенфилда устанавливать электроды внутрь черепа. Несколько позже во Франции были разработаны новые концепции инвазивной ЭЭГ при сотрудничестве нейрохирурга и невролога.

Основные этапы становления инвазивной ЭЭГ, которая неотделима от истории развития хирургии эпилепсии, условно делят на периоды, обусловленные развитием технических возможностей и накоплением знаний об эпилепсии [10]:

1) интраоперационный ЭЭГ-мониторинг (с 1934 г.),

2) экстраоперативный инвазивный ЭЭГ-мониторинг (с 1939 г.),

3) стерео-ЭЭГ (с 1960-х годов),

4) модификация техник (с 1980-х годов),

5) экспериментальные методики настоящего времени.

На основании получения межприступной активности головного мозга на ЭЭГ и самих приступов Джаспер придал особое значение «случайным спайкам». Он рассматривал их как маркер локальной эпилептогенной активности мозга. Другие же эквиваленты в виде острых, медленных волн играли менее важную роль, поскольку находились на расстоянии от предполагаемого очага эпилепсии. Основываясь на этих данных, нейрохирург Пенфилд и нейрофизиолог Джаспер в операционной проводили резекцию так называемой «ЭЭГ очерченной» области мозга. С накоплением опыта они пришли к выводу, что различные участки височной доли могут участвовать в эпилептогенезе. Совершенствовалась топическая диагностика приступов: при стимуляции нижней части височной доли Джасперу удалось получить приступы по типу автоматизмов, дополнительно Пенфилд зарегистрировал появление ауры при стимуляции крючка. В 1951 г. при проведении стимуляции миндалевидного тела был получен типичный приступ ауры и впервые поставлен вопрос о роли амигдало-гиппокампального комплекса в развитии височных приступов. В дальнейшем Джаспер и Пенфилд предположили, что успех операции зависит от полноты удаления всей эпилептогенной зоны. Неудаленная часть могла обуславливать рецидивы приступов и способствовать повторным вмешательствам. Анализируя вышеописанное, врачи пришли к выводу, что объем резекции должен быть расширен.

В апреле 1939 г. первым пациентом с инвазивной записью ЭЭГ в палате был мужчина 32 лет с травмой головы в результате дорожно-транспортного происшествия [12]. Эпилептические приступы, которые длились около 30 мин, проявлялись потерей сознания, наличием ауры, агрессивным поведением. При первом поступлении в стационар ему была проведена рентгенография черепа, по данным которой выявлен травматический дефект в теменной области. Пневмоэнцефалография обнаружила диффузную атрофию мозга, более выраженную на левой стороне. При повторном поступлении на лечение по данным ЭЭГ выявлена эпилептиформная активность в левой и правой височных областях. Поскольку было обнаружено несоответствие клинических и электрофизиологических данных, Пенфилд впервые имплантировал электроды на височные поверхности обеих височных долей. Анализ ЭЭГ показал патологическую активность на левой стороне, в связи с чем было выполнено удаление

эпилептогенной зоны под местной анестезией. С целью предупреждения развития негативных последствий хирургического вмешательства впервые использовалась интраоперационная стимуляция коры мозга для выявления сенсорных и моторных областей (картирование головного мозга). В послеоперационном периоде приступы у пациента не прекратились, и ЭЭГ не показала существенных улучшений. Сразу после операции больной находился в удовлетворительном состоянии, однако на следующий день развились нарушения речи вместе с фокальными и генерализованными приступами. Подтвержденная по ЭЭГ зона начала приступа локализовалась близко к границе речевой зоны, что не позволило провести повторное оперативное вмешательство.

С использованием субдурального ЭЭГ-мониторинга стало очевидно, что не только латеральная часть коры больших полушарий является эпилептогенной, но и глубинные структуры, вероятно, могут играть роль в развитии эпилептического приступа. На экспериментальных моделях животных в работах того периода показано, что источником эпилептиформной активности могут быть таламус и другие базальные ганглии. Однако значение таламокортикальных взаимосвязей и медленноволновой активности по-прежнему было не до конца понятным [13, 14]. При этом эффективной оказалась резекция глубинно расположенных медиальных структур височных долей при височной эпилепсии. Предполагалось, что структуры, соединяющие оба полушария головного мозга (передняя, задняя комиссуры, мозолистое тело), являются проводниками к гомологичным участкам головного мозга. Таким образом, необходимость в изучении глубинных структур головного мозга на предмет наличия в них эпилептогенных участков становилась все более актуальной.

В 1949 г. Роберт Хайн и Рассел Мейерс впервые в истории выполнили установку электродов в глубинные структуры мозга и выявили независимую эпилептиформную активность в глубинных и поверхностных участках головного мозга [15]. Этот пример послужил поводом для более подробного изучения кортикальных и субкортикальных структур. Однако в связи с отсутствием в то время специальных инструментов для установки электродов в необходимые участки головного мозга ее точность была очень низкой, что отражалось на расположении электродов относительно ЭЗ.

Точкой отсчета прецизионной имплантации электродов в желаемую область стала концепция французского нейрохирурга Жана Талайра [16], который связывал трехмерное пространство

с маловариабельными структурами (передняя и задняя комиссуры) в головном мозге, тем самым создав современную модель координат для стереотаксических операций на голове. По этим координатам с помощью специальной рамы Талайра заводил электроды в глубинные структуры головного мозга, в 1957 г. создав первый в мире стереотаксический атлас. Работая в госпитале Св. Анны в Париже, он завязал знакомство с неврологом-нейрофизиологом Жаном Банко, которое переросло в тесное и успешное сотрудничество. Их совместные труды по разработке системы для имплантации электродов в глубинные структуры позволили проводить анализ распространения приступа во времени и «в пространстве» головного мозга. Такую концепцию анализа ЭЭГ и метод имплантации они назвали стерео-ЭЭГ. Данный способ получил широкое распространение благодаря хорошей информативности, переносимости пациентами данной процедуры, при этом длительность записи ЭЭГ увеличилась от нескольких дней до недель.

Стерео-ЭЭГ позволила Талайру и Банко выдвинуть собственную гипотезу об ЭЗ [17]. В отличие от гипотезы Пенфилда и Джаспера, согласно которой маркером ЭЗ были интериктальные спайки и приступы, возникающие во время стимуляции области интереса, которую в дальнейшем резецировали, теория французских исследователей основывалась на точном выявлении начальных ЭЭГ-изменений при приступе. При этом изменения на ЭЭГ по Джасперу авторы предлагали соотнести с «ирритативной зоной», которая расценивалась скорее как функциональная, нежели структурная. Анатомо-клинико-электрофизиологические корреляты зоны начала приступов, зоны поражения и ирритативной зоны они назвали «эпилептогенной сетью».

Вплоть до 1980-х годов стерео-ЭЭГ была практически золотым стандартом инвазивного ЭЭГ-мониторирования у пациентов с эпилепсией. Затем вновь возрос интерес к применению субдуральных электродов и их модификаций, а также усовершенствованию техники. Этому способствовал ряд недостатков при использовании стерео-ЭЭГ, а именно дороговизна исследования, огромные затраты времени, необходимость опыта интерпретации результатов. Мариэлла Фишер-Уильямс продемонстрировала безопасность и успех использования субдуральных решеток [18]. Много преимуществ давали различные конфигурации электродов с широким покрытием поверхности головного мозга и детальным анализом функционально значимых зон. Кроме того, улучшались техники имплантации, стал использоваться подвисочный доступ для достиже-

ния глубинных медиальных структур эпилепсии. Несколько позже в Швейцарии были разработаны специальные электроды для установки через овальные отверстия основания черепа, способные регистрировать эпилептиформную активность с медиальных отделов височных долей. При сочетанном использовании данных электродов со скальповой ЭЭГ процедура приобрела полунвазивный характер [5].

В настоящее время инвазивная ЭЭГ не только обнаруживает ЭЗ, но и стимулирует их с целью прерывания развития эпилептического приступа. С 2000-х годов проводились исследования таких систем стимуляции «с обратной связью» [19]. Подобные системы, которые имплантируются в мозг больного, позволяют в автоматическом режиме регистрировать начинающийся эпилептический приступ и одновременно его прерывать путем электростимуляции ЭЗ. Для проведения подобной операции необходимо точное знание локализации зоны начала приступа, которое стало возможным благодаря инвазивной ЭЭГ и записи ЭЭГ-паттерна приступа. После операции устройство необходимо калибровать и проводить неоднократную проверку его способности регистрировать эпилептический приступ. Эффективность данной процедуры демонстрирует уменьшение частоты приступов на 40 % в первый год лечения, на 60 % за 3 года и на 66 % при 5-летнем наблюдении.

Будущим направлением регистрации приступов, возможно, станет эндоваскулярная методика имплантации электродов [20]. Она включает в себя установку в глубинные области мозга платиновых контактов диаметром не более 0,1 мм, проводимых по венозным или артериальным сосудам больного. Впервые подобная возможность ЭЭГ-записи была продемонстрирована Ричардом Пенном в 1973 г. С тех пор внутрисосудистые катетеры и стенты с электродами были модифицированы и в настоящее время позволяют относительно безопасно проводить запись ЭЭГ с минимальной травматичностью. Данные, получаемые с помощью подобных устройств, возможно, позволят выбирать вид оперативного лечения и уменьшат количество открытых инвазивных ЭЭГ. В настоящее время использование методики ограничено для рутинного применения ввиду невозможности проведения хронической записи ЭЭГ, ограничений в количестве областей мозга для ЭЭГ-мониторинга и артефактов на ЭЭГ, получаемых от тока крови. Требуется больше доказательных данных с современными системами на человеке. Несмотря на это, данная технология может быть перспективной для записи ЭЭГ не только при подозрении на эпилепсию, например,

в области височной доли, но и для интерфейсов компьютер – мозг.

Особенности современного этапа инвазивной ЭЭГ. Современная хирургия эпилепсии, основанная на широкой базе данных, позволяет достигнуть значительного снижения частоты приступов или купировать их вовсе, тем самым повышая уровень качества жизни пациентов. Многие дополнительные методы обследования (магнитоэнцефалография, позитронно-эмиссионная томография, однофотонная эмиссионная компьютерная томография, функциональная магнитно-резонансная томография (МРТ) и трактография, синхронные комбинированные методы обследования) позволяют получить информацию о локализации ЭЗ и их количестве для дальнейшего выбора вида оперативного вмешательства. К настоящему моменту накоплены сведения об эффективности и возможных осложнениях различных видов хирургических техник. Оперативное лечение проводится в крупных клиниках, имеющих широкое и современное оснащение, при участии междисциплинарной команды, которая занимается вопросами эпилепсии.

Существует единый подход к лечению больного, страдающего медикаментозно-резистентной эпилепсией: для определения лечебной тактики необходимо применение неинвазивных методов исследования, позволяющих с большой точностью определять вовлеченные в эпилепсию зоны мозга. С появлением в 1980-х годах компьютерной и магнитно-резонансной томографии отмечалось резкое снижение частоты проведения инвазивной ЭЭГ. Видимые поражения головного мозга на снимках часто совпадали с информацией, получаемой путем скальповой ЭЭГ. Так нейрохирурги могли планировать оперативное лечение без необходимости в дополнительных инвазивных диагностиках. И только в отдельных случаях при расхождении данных ЭЭГ и МРТ или при отсутствии эпилептогенного поражения на МРТ проводятся операции по установке интракраниальных электродов. Однако сохраняется некоторая приверженность хирургических клиник к использованию тех или иных методов диагностики эпилепсии. Особенно это прослеживается при выборе инвазивной ЭЭГ для поиска ЭЗ [10, 21]. К примеру, большинство университетов и институтов стран Северной Америки предпочитают субдуральные электроды в виде сеток, а в Европе по-прежнему используется стерео-ЭЭГ.

Интраоперационное использование ЭЭГ ограничено узким рядом показаний и выполняется лишь в некоторых центрах по лечению эпилеп-

сии. Применение интраоперационной ЭЭГ может применяться для [4]:

- 1) мониторингирования активности мозга при картировании функциональных зон;
- 2) определения границ и полноты резекции.

Однако имеют место вопросы при проведении интраоперационной ЭЭГ, в частности: какую роль играет ирритативная зона для определения прогноза? что делать с областью, где имеются зоны стойкой эпилептиформной активности после резекции эпилептогенного очага?

В настоящее время для проведения инвазивного ЭЭГ-видеомониторинга существует ряд показаний, которых придерживается хирургическое сообщество [5]: 1) расхождение данных о зоне начала приступа, полученных по результатам неинвазивных и инвазивных процедур; 2) зона начала приступа располагается близко к функциональной коре головного мозга; 3) определение границ резекции.

Имеет место возрастающий интерес к стерео-ЭЭГ во многих клинических центрах [10, 21, 22]. Такой тенденции способствуют проведение международных научных и образовательных конференций и мастер-классов, свободные перемещения по миру, взаимодействие с зарубежными коллегами, а также доступность технического оснащения и наличие накопленных литературных данных. Среди преимуществ стерео-ЭЭГ выделяют [23, 24]: 1) большой объем покрытия мозговой ткани; 2) возможность проведения процедуры с двух сторон; 3) возможность одновременной оценки потенциалов с поверхностных и глубинных структур; 4) наличие данных о распространении разряда приступа в пространственно-временном отношении; 5) хорошая переносимость процедуры пациентами; 6) точность расположения электродов. Недостатками стерео-ЭЭГ считают: 1) невозможность ее проведения в детском возрасте при толщине кости менее 3 мм; 2) сложность планирования и интерпретации данных; 3) ограниченное покрытие коркового слоя мозга; 4) дороговизну метода; 5) ограниченные возможности для картирования функциональных зон мозга.

Совершенствуются различные методы установки внутримозговых электродов. При выполнении стерео-ЭЭГ используются стереотаксические рамы и технологии безрамной навигации, которые позволяют устанавливать электроды по заранее сформированным траекториям на стереотаксических моделях головного мозга. Траектории создаются на основании данных МРТ и компьютерной томографии (КТ) с коротким шагом исследования для «объединения» модели головного мозга больного с математической си-

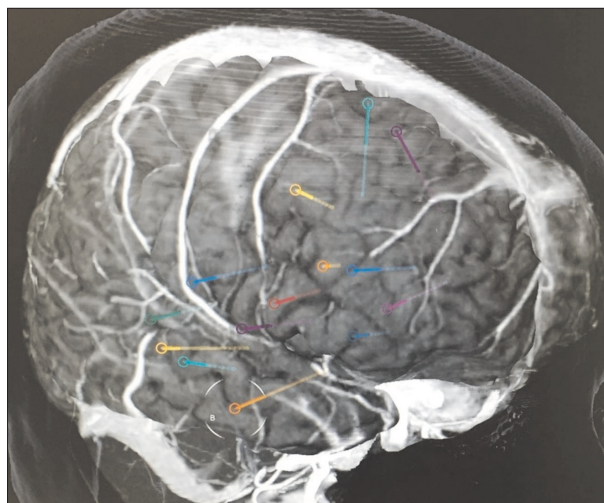


Рис. 1. Схема планирования установки электродов для стерео-ЭЭГ

Fig. 1. The stereoelectroencephalography planning

стемой координат. При использовании рамной технологии навигации на голову больного на время операции крепится стереотаксическая рама. С ней выполняются МРТ- и КТ-исследования, во время которых происходит слияние модели мозга и системы координат с помощью соответствующего программного обеспечения. Безрамная методика проводится в несколько упрощенной технологии, в которой специальные фиксаторы крепятся к голове больного для последующего КТ-исследования и дальнейшей программной обработки данных. Для максимальной точности попадания электродов в интересующие области мозга может применяться роботизированная техника: повторяя вышеописанные методы создания стереотаксических систем мозга, она имплантирует электроды по заданным параметрам под строгим контролем хирурга. Пример проведения стерео-ЭЭГ представлен на рис. 1, 2.

Для субдуральных сеток (решеток) преимущества заключаются в следующем [4]: 1) широкое покрытие коры головного мозга; 2) возможность определения границ резекции и картирования функциональной зоны; 3) имеется визуальный контроль установки электродов. Недостатки субдуральных электродов: 1) необходимость большой краниотомии; 2) сложность проведения билатеральной имплантации; 3) невозможность регистрации потенциалов с глубинных структур. Пример наложения субдуральных сеток показан на рис. 3, 4. Субдуральные полоски отличаются меньшей инвазией, «слепым» методом установки (под контролем интраоперационного рентгена), хорошей переносимостью операции при двусторонней имплантации. Установка электродов



Рис. 2. Интраоперационная фотография. Отображена минимальная инвазивность стерео-ЭЭГ при широком охвате областей мозга

Fig. 2. Intraoperative photo. The minimal invasiveness and wide coverage of brain are presented

овального отверстия является полуинвазивным методом, поскольку сочетается со скальповой ЭЭГ, хорошо переносится пациентами даже при двусторонней имплантации, имеет низкую частоту осложнений. Из минусов можно отметить то,

что передние отделы гиппокампа, миндалина, расположенные в медиальных отделах височной доли, остаются без покрытия электродами.

Эффективность и частота осложнений перечисленных методов вариабельны (табл. 1). В целом невозможно утверждать, что какая-то одна методика имеет однозначное преимущество для рутинного использования (табл. 2) [36, 37]. Кроме того, проводятся исследования по выявлению предикторов успешного выявления ЭЗ (взаимосвязь с этиологией эпилепсии, типом приступов, категориями больных и т.д.).

Детальный анализ ЭЗ с помощью инвазивной ЭЭГ в будущем позволит улучшить исходы хирургических операций. В настоящее время может проводиться анализ не только ЭЭГ-паттерна приступа (иктальная запись), но и высокочастотных осцилляций межприступной активности [38]. Чаще исследуется ночная межприступная активность, поскольку влияние артефактов и физиологических осцилляций минимально. Данный биологический маркер по многим наблюдениям различных исследователей может дополняться к идентификации ЭЗ. Резекция участков иктальной активности в сочетании с областью высокочастотных осцилляций приводит к лучшим результатам лечения. Согласно данным мультицентрового проспективного исследования, в группе пациентов с удаленной областью высокочастотных осцилляций чаще наблюдалось полное исчезновение

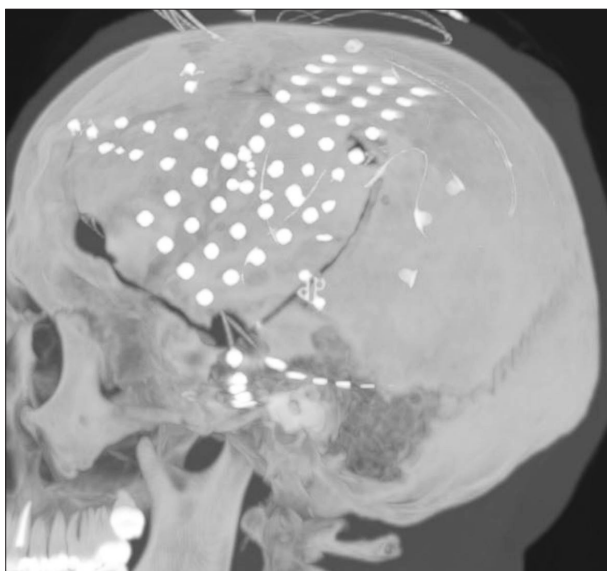


Рис. 3. КТ головного мозга в проекции максимальной интенсивности (MIP). Отображено расположение электродных сеток и полосок на височной, лобной, теменной долях

Fig. 3. Maximal intensive projection (MIP) of head CT. Subdural grids and strips are placed on temporal, frontal and parietal lobes

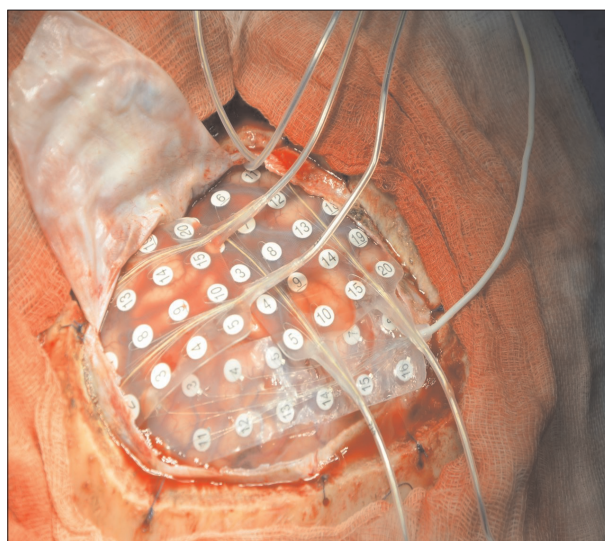


Рис. 4. Интраоперационная фотография. В области краниотомии визуализируются имплантированные на поверхность лобной и височной долей субдуральные сетки электродов

Fig. 4. Intraoperative photo. In the craniotomy implanted grid electrodes are located on surface of temporal and frontal lobes

Таблица 1. Сведения по инвазивной ЭЭГ из разных источников за 2000–2020 гг., включающих крупные выборки пациентов

Table 1. Different large patient series with invasive EEG for 2000–2020

Страна	Вид публикации	Возрастная характеристика больных	Эпилепсия	Количество пациентов	Вид мониторинга	Количество больных с резективной хирургией, %	Средний срок наблюдения, мес.	Количество больных после операции без приступов, %	Частота осложнений, %	Ссылка
Италия	Ретроспективная серия	Взрослые и дети	Разные виды	211	Стерео-ЭЭГ	82	12	56	5,6	[25]
США	Ретроспективная серия	Взрослые и дети	Разные виды	200	Стерео-ЭЭГ	87	24	68	4,5	[26]
Китай	Ретроспективная серия	Дети	Разные виды	137	Субдуральные решетки и глубинные электроды	97	24	49	21	[27]
США	Ретроспективная серия	Взрослые и дети	Разные виды	91	Субдуральные решетки и полоски	77	42	34	11	[28]
США	Ретроспективная серия	Взрослые и дети	Разные виды	102	Субдуральные решетки	82	22	70	Нет данных	[29]
США	Ретроспективная серия	Взрослые	Височная	42	Электроды овального отверстия	63	22,5	72	4,8	[30]
Франция	Ретроспективная серия	Дети	Височная	38	Электроды овального отверстия	71	77	93	2,6	[31]
Бразилия	Ретроспективная серия	Взрослые и дети	Височная	64	Электроды овального отверстия	52	Нет данных	67	Нет данных	[32]
Канада	Ретроспективная серия	Взрослые	Височная	139	Субдуральные полоски	94	36	53	3	[33]
Великобритания	Ретроспективная серия	Взрослые	Височная	57	Субдуральные полоски	30	40,4	55	5	[34]
Канада	Ретро-, проспективная серия	Взрослые	Разные виды	450	Стерео-ЭЭГ и субдуральные полоски	44	Нет данных	Нет данных	5	[35]

Таблица 2. Сравнительные характеристики методов инвазивной ЭЭГ

Table 2. Comparative features of invasive EEG modalities

Характеристика	ЭЭГ с субдуральными полосками	ЭЭГ с субдуральными сетками	ЭЭГ с электродами овального отверстия	Стерео-ЭЭГ
Точность установки	-	++	++	++
Частота осложнений	+	--	++	+
Билатеральная имплантация электродов	+	--	++	+
Регистрация с кортикальной поверхности	++	++	--	-
Регистрация с глубинных отделов	--	--	+	++
Возраст пациентов	Взрослые и дети	Взрослые и дети	С 2–3 лет	С 2–3 лет
Переносимость операции пациентами	Хорошая	Плохая	Отличная	Хорошая
Объем операции	+	--	++	--
Картирование коры мозга	+	++	--	--

приступов, чем в группе больных, у которых она не удалялась [39]. Многие проблемы, такие как дифференциация патологических высокочастотных и физиологических осцилляций, методы и технические ограничения их регистрации, значение в оценке ЭЗ, остаются не решенными. Важно, что некоторые пациенты могут избавиться от судорог после операции, несмотря на оставшиеся зоны головного мозга с высокочастотными осцилляциями, что приводит к дополнительным вопросам и пересмотру значения последних. По мере накопления данных в доказательной медицине алгоритмы диагностики и лечения пациентов с эпилепсией будут совершенствоваться.

Заключение

Через 5 лет после первой публикации о регистрации у человека ЭЭГ для определения ЭЗ была выполнена кортикография. К настоящему моменту инвазивная ЭЭГ уже имеет богатую историю ее применения. Используемые методы инвазивной ЭЭГ могут иметь взаимодополняющий характер, позволяя увеличить частоту выявления ЭЗ и подобрать соответствующий вид хирургического вмешательства. Для оптимизации вмешательств при эпилепсии и выработки определенных клинических алгоритмов требуется проведение дополнительных исследований с достаточным уровнем доказательности и сравнением эффективности методик. Новые перспективные технологии с использованием обратной связи, мини-инвазивные техники ЭЭГ и хирургическое лечение позволят повысить качество помощи больным с эпилепсией.

Список литературы / References

1. Крылов В.В., Гехт А.Б., Трифонов И.С., Лебедева А.В., Каймовский И.Л., Синкин М.В., Григорьева Е.В., Гришкина М.Н., Шишкина Л.В., Кочеткова О.О. Исходы хирургического лечения пациентов с фармакорезистентными формами эпилепсии. *Журн. неврологии и психиатрии*. 2016; 116 (9): 13–18. doi:10.17116/jnevro20161169213-18
2. Krylov V.V., Guekht A.B., Trifonov I.S., Lebedeva A.V., Kaimovsky I.L., Sinkin M.V., Grigorieva E.V., Grishkina M.N., Shyshkina L.V., Kochetkova O.O. Outcomes of surgical treatment of patients with pharmacoresistant epilepsy. *Zhurnal nevrologii i psikhiiatrii imeni Sergeya Sergeevicha Korsakova = S.S. Korsakov Journal of Neurology and Psychiatry*. 2016; 116 (9): 13–18. [In Russian]. doi:10.17116/jnevro20161169213-18
3. Banerjee P., Filippi D., Hauser W.A. The descriptive epidemiology of epilepsy – A review. *Epilepsy Res.* 2009; 85 (1): 31–45. doi:10.1016/j.epilepsyres.2009.03.003
4. Jin P., Wu D., Li X., Ren L., Wang Y. Towards precision medicine in epilepsy surgery. *Ann. Transl. Med.* 2016; 4 (2): 24. doi: 10.3978/j.issn.2305-5839.2015.12.65
5. Jayakar P., Gotman J., Harvey A., Palmini A., Tassi L., Schomer D., Dubeau F., Bartolomei F., Yu A., Kršek P., Velis D., Kahane P. Diagnostic utility of invasive EEG for epilepsy surgery: Indications, modalities, and techniques. *Epilepsia*. 2016; 57 (11): 1735–1747. doi: 10.1111/epi.13515
6. Taussig D., Montavont A., Isnard J. Invasive EEG explorations. *Neurophysiol. Clin.* 2015; 45 (1): 113–119. doi:10.1016/j.neucli.2014.11.006
7. Fisch B. Spehlmann's EEG Primer. Amsterdam: Elsevier, 1997. 642 p.

7. Girvin J. History of epilepsy surgery. In: *Operative Techniques in Epilepsy*. Switzerland: Springer International Publishing, 2014. 307 p.
8. Olivier A., Boling W., Tanriverdi T. History of epilepsy surgery. In: *Techniques in Epilepsy Surgery*. United Kingdom: Cambridge University Press, 2012. 298 p.
9. Тягун Н.С., Мухин К.Ю. Развитие хирургии эпилепсии со второй половины XIX до середины XX века. *Рус. журн. дет. неврологии*. 2009; 4 (3): 41–46.
10. Tyagun N.S., Mukhin E.Yu. Development of epilepsy surgery in the 2-nd half of XIX through mid-XX century. *Russkiy zhurnal detskoy neurologii = Russian Journal of Child Neurology*. 2009; 4 (3): 41–46. [In Russian].
10. Reif P., Strzelczyk A., Rosenow F. The history of invasive EEG evaluation in epilepsy patients. *Seizure*. 2016; 41: 191–195. doi:10.1016/j.seizure.2016.04.006
11. Berger H. Über das elektrenkephalogramm des menschen. *Archiv für Psychiatrie und Nervenkrankheiten*. 1929; 87: 527–570. doi: 10.1055/s-0028-1130334
11. Berger H. About the human electroencephalogram. *Archiv für Psychiatrie und Nervenkrankheiten = Archives for Psychiatry and Nervous Diseases*. 1929; 87: 527–570. [In German]. doi: 10.1055/s-0028-1130334
12. Almeida A., Martinez V., Feindel W. The first case of invasive EEG monitoring for the surgical treatment of epilepsy: Historical significance and context. *Epilepsia*. 2005; 46 (7): 1082–1085. doi:10.1111/j.1528-1167.2005.66404.x
13. Jasper H., Marsan C., Stoll J. Experimental studies of the subcortical projections of local cortical epileptiform discharge. *Trans. Am. Neurol. Assoc.* 1951; 56: 3–9.
14. Lennox M., Brody B. Paroxysmal slow waves in the electro-encephalograms of patients with epilepsy and with subcortical lesions. *J. Nerv. Ment. Dis.* 1946; 104 (3): 237–248. doi:10.1097/00005053-194609000-00001
15. Hayne R., Meyers R., Knott J. Characteristics of electrical activity of human corpus striatum and neighboring structures. *J. Neurophysiol.* 1949; 12 (3): 185–196. doi:10.1152/jn.1949.12.3.185
16. Talairach J., Bancaud J., Bonis A., Szikla G., Tournoux P. Functional stereotaxic exploration of epilepsy. *Confin. Neurol.* 1962; 22 (3-5): 328–331. doi:10.1159/000104378
17. Talairach J., Bancaud J. Lesion, «irritative» zone and epileptogenic focus. *Confin. Neurol.* 1966; 27 (1): 91–94. doi:10.1159/000103937
18. Northfield D. Experiment and neurological surgery. *Br. Med. J.* 1968; 4 (5629): 471–477. doi:10.1136/bmj.4.5629.471
19. Matias C., Sharan A., Wu C. Responsive neurostimulation for the treatment of epilepsy. *Neurosurg. Clin. N. Am.* 2019; 30 (2): 231–242. doi:10.1016/j.nec.2018.12.006
20. Sefcik R., Opie N., John S., Kellner C., Mocco J., Oxley T. The evolution of endovascular electroencephalography: historical perspective and future applications. *Neurosurg. Focus*. 2016; 40 (5): E7. doi:10.3171/2016.3.focus15635
21. Katz J., Abel T. Stereoelectroencephalography versus subdural electrodes for localization of the epileptogenic zone: what is the evidence? *Neurotherapeutics*. 2019; 16 (1): 59–66. doi: 10.1007/s13311-018-00703-2
22. Зуев А.А., Головтеев А.Л., Педяш Н.В., Калыбаева Н.А., Броннов О.Ю. Возможности хирургического лечения фармакорезистентной эпилепсии с использованием робот-ассистированной имплантации глубоных электродов для проведения инвазивной стереоэлектроэнцефалографии. *Нейрохирургия*. 2020; 22 (1): 12–20. doi:10.17650/1683-3295-2020-22-1-12-20
22. Zuev A.A., Golovtsev A.L., Pedyash N.V., Kalybaeva N.A., Bronov O.Yu. Possibilities for surgical treatment of the pharmacoresistant form of epilepsy using robot-assisted implantation of deep electrodes for invasive stereoelectroencephalography. *Neurokhirurgiya = Neurosurgery*. 2020; 22 (1): 12–20. [In Russian]. doi:10.17650/1683-3295-2020-22-1-12-20
23. Podkorytova I., Hoes K., Lega B. Stereo-encephalography versus subdural electrodes for seizure localization. *Neurosurg. Clin. N. Am.* 2016; 27 (1): 97–109. doi:10.1016/j.nec.2015.08.008
24. Minotti L., Montavont A., Scholly J., Tyvaert L., Taussig D. Indications and limits of stereoelectroencephalography (SEEG). *Neurophysiol. Clin.* 2018; 48 (1): 15–24. doi:10.1016/j.neucli.2017.11.006
25. Cossu M., Cardinale F., Castana L., Citterio A., Francione S., Tassi L., Benabid A., Russo G. Stereoelectroencephalography in the presurgical evaluation of focal epilepsy: a retrospective analysis of 215 procedures. *Neurosurgery*. 2005; 57 (4): 706–718. doi:10.1227/01.neu.0000176656.33523.1e
26. Serletis D., Bulacio J., Bingaman W., Najm I., González-Martínez J. The stereotactic approach for mapping epileptic networks: a prospective study of 200 patients. *J. Neurosurg.* 2014; 121 (5): 1239–1246. doi:10.3171/2014.7.jns132306
27. Yang P., Zhang H., Pei J., Tian J., Lin Q., Mei Z., Zhong Z., Jia Y., Chen Z., Zheng Z. Intracranial electroencephalography with subdural and/or depth electrodes in children with epilepsy: Techniques, complications, and outcomes. *Epilepsy Res.* 2014; 108 (9): 1662–1670. doi:10.1016/j.eplepsyres.2014.08.011
28. Vale F., Pollock G., Dionisio J., Benbadis S., Tatum W. Outcome and complications of chronically implanted subdural electrodes for the treatment of medically resistant epilepsy. *Clin. Neurol. Neurosurg.* 2013; 115 (7): 985–990. doi:10.1016/j.clineuro.2012.10.007
29. Mullin J., Sexton D., Al-Omar S., Bingaman W., Gonzalez-Martinez J. Outcomes of subdural

- grid electrode monitoring in the stereoelectroencephalography era. *World Neurosurg.* 2016; 89: 255–258. doi:10.1016/j.wneu.2016.02.034
30. Sheth S., Aronson J., Shafi M., Phillips H., Velez-Ruiz N., Walcott B., Kwon C., Mian M., Dykstra A., Cole A., Eskandar E. Utility of foramen ovale electrodes in mesial temporal lobe epilepsy. *Epilepsia.* 2014; 55 (5): 713–724. doi:10.1111/epi.12571
31. Nilsson D., Fohlen M., Jalin C., Dorfmueller G., Bulteau C., Delalande O. Foramen ovale electrodes in the preoperative evaluation of temporal lobe epilepsy in children. *Epilepsia.* 2009; 50 (9): 2085–2096. doi:10.1111/j.1528-1167.2009.02135.x
32. Velasco T., Sakamoto A., Alexandre V., Walz R., Dalmagro C., Bianchin M., Araújo D., Santos A., Leite J., Assirati J., Carlotti C. Foramen ovale electrodes can identify a focal seizure onset when surface eeg fails in mesial temporal lobe epilepsy. *Epilepsia.* 2006; 47 (8): 1300–1307. doi:10.1111/j.1528-1167.2006.00547.x
33. Massot-Tarrús A., Steven D., McLachlan R., Mirsattari S., Diosy D., Parrent A., Blume W., Girvin J., Burneo J. Outcome of temporal lobe epilepsy surgery evaluated with bitemporal intracranial electrode recordings. *Epilepsy Res.* 2016; 127: 324–330. doi:10.1016/j.epilepsyres.2016.08.008
34. Valentín A., Hernando-Quintana N., Moles-Herbera J., Jimenez-Jimenez D., Mourente S., Malik I., Selway R., Alarcón G. Depth versus subdural temporal electrodes revisited: Impact on surgical outcome after resective surgery for epilepsy. *Clin. Neurophysiol.* 2017; 128 (3): 418–423. doi:10.1016/j.clinph.2016.12.018
35. Joswig H., Lau J., Abdallat M., Parrent A., MacDougall K., McLachlan R., Burneo J., Steven D. Stereoelectroencephalography versus subdural strip electrode implantations: feasibility, complications, and outcomes in 500 intracranial monitoring cases for drug-resistant epilepsy. *Neurosurgery.* 2020; 87 (1): E23–E30. doi:10.1093/neuros/nyaa112
36. Yan H., Katz J., Anderson M., Mansouri A., Remick M., Ibrahim G., Abel T. Method of invasive monitoring in epilepsy surgery and seizure freedom and morbidity: A systematic review. *Epilepsia.* 2019; 60 (9): 1960–1972. doi:10.1111/epi.16315
37. Toth M., Papp K., Gede N., Farkas K., Kovacs S., Isnard J., Hagiwara K., Gyimesi C., Kuperczko D., Doczi T., Janszky J. Surgical outcomes related to invasive EEG monitoring with subdural grids or depth electrodes in adults: A systematic review and meta-analysis. *Seizure.* 2019; 70: 12–19. doi:10.1016/j.seizure.2019.06.022
38. Park C., Hong S. High frequency oscillations in epilepsy: detection methods and considerations in clinical application. *J. Epilepsy Res.* 2019; 9 (1): 1–13. doi:10.14581/jer.19001
39. Jacobs J., Wu J., Perucca P., Zelmann R., Mader M., Dubeau F., Mathern G., Schulze-Bonhage A., Gotman J. Removing high-frequency oscillations. *Neurology.* 2018; 91 (11): e1040–e1052. doi:10.1212/wnl.00000000000006158

Сведения об авторах:

Виджай Мансович Джафаров, ORCID: 0000-0002-5337-8715, e-mail: mvijayd@hotmail.com
Джамиль Афетович Рзаев, д.м.н., ORCID: 0000-0002-1209-8960, e-mail: jamilrzaev@gmail.com

Information about the authors:

Vidzhai M. Dzhaferov, ORCID: 0000-0002-5337-8715, e-mail: mvijayd@hotmail.com
Jamil A. Rzaev, doctor of medical science, ORCID: 0000-0002-1209-8960, e-mail: jamilrzaev@gmail.com

Поступила в редакцию 07.07.2020
 После доработки 23.07.2020
 Принята к публикации 04.09.2020

Received 07.07.2020
 Revision received 23.07.2020
 Accepted 04.09.2020