

ISSN 2077-8333 (print)
ISSN 2311-4088 (online)

ЭПИЛЕПСИЯ и пароксизмальные состояния



2024 Том 16 №1

EPILEPSY AND PAROXYSMAL CONDITIONS

2024 Vol. 16 №1

<https://epilepsia.su>

Данная интернет-версия статьи была скачана с сайта <http://www.epilepsia.su>. Не предназначено для использования в коммерческих целях.
Информацию о репринтах можно получить в редакции. Тел.: +7 (495) 649-54-95; эл. почта: info@irbis-1.ru.



Однофотонная эмиссионная компьютерная томография с протоколом SISCOTM в предхирургической диагностике эпилепсии

Е.В. Ишмуратов, А.А. Зуев

Федеральное государственное бюджетное учреждение «Национальный медико-хирургический центр им. Н.И. Пирогова» Министерства здравоохранения Российской Федерации (ул. Нижняя Первомайская, д. 70, Москва 105203, Россия)

Для контактов: Евгений Валерьевич Ишмуратов, e-mail: ei-doc@yandex.ru

РЕЗЮМЕ

Успешность хирургического лечения эпилепсии зависит от точности локализации эпилептогенной зоны. Однофотонная эмиссионная компьютерная томография (ОФЭКТ) с применением протокола SISCOTM (англ. subtraction ictal SPECT co-registered to MRI) является единственным методом визуализации, который позволяет идентифицировать зону иктального начала путем введения и фиксации специального радиоактивного трейсера в области усиления мозгового кровотока. В обзоре представлены ключевые этапы проведения ОФЭКТ с применением протокола SISCOTM, обобщены и проанализированы данные о возможностях и недостатках данного метода, а также о перспективах его применения в предоперационном обследовании пациентов с эпилепсией. Показано, что методика имеет высокую чувствительность (в среднем 70–75%) в локализации эпилептогенной зоны у пациентов с фармакорезистентной эпилепсией, когда структурные изменения головного мозга не выявляются при магнитно-резонансной томографии. Однако организационные особенности проведения процедуры в сочетании с ее специфическими ограничениями в отношении больных эпилепсией не позволяют рассматривать ее как рутинный диагностический метод.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Однофотонная эмиссионная компьютерная томография, ОФЭКТ, SISCOTM, эпилепсия, хирургия эпилепсии, эпилептогенная зона.

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

Поступила: 28.10.2023. В доработанном виде: 07.12.2023. Принята к печати: 11.01.2024. Опубликовано: 30.03.2024.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии необходимости раскрытия конфликта интересов в отношении данной публикации.

Вклад авторов

Ишмуратов Е.В. – поиск и анализ статей, написание текста;
Зуев А.А. – редактирование, финальное утверждение рукописи

Для цитирования

Ишмуратов Е.В., Зуев А.А. Однофотонная эмиссионная компьютерная томография с протоколом SISCOTM в предхирургической диагностике эпилепсии. *Эпилепсия и пароксизмальные состояния*. 2024; 16 (1): 69–76. <https://doi.org/10.17749/2077-8333/epi.par.con.2024.173>.

Subtraction ictal single-photon emission computed tomography (SPECT) co-registered to MRI (SISCOM) in presurgical diagnostics of epilepsy

E.V. Ishmuratov, A.A. Zuev

Pirogov National Medical and Surgical Center (70 Nizhnyaya Pervomayskaya Str., Moscow 105203, Russia)

Corresponding author: Evgeny V. Ishmuratov, e-mail: ei-doc@yandex.ru

SUMMARY

Success of surgically treated epilepsy depends on the accuracy of epileptogenic zone localization. Single-photon emission computed tomography (SPECT) using SISCOM (subtraction ictal SPECT co-registered to MRI) protocol is the only imaging method that allows identification of ictal onset zone by injection and fixation of a special radioactive tracer in the area of increased cerebral blood flow. The review outlines the key stages of SPECT using SISCOM protocol, generalizes and analyzes data for related opportunities and disadvantages as well as its prospects for use in preoperative examination of patients with epilepsy. It was demonstrated that the technique showed high sensitivity (mean 70–75%) to localize epileptogenic zone in patients with pharmacoresistant epilepsy in case if brain structural changes were not detected by magnetic resonance imaging (MRI). However, the organizational features of the procedure in combination with its specific limitations for epilepsy patients do not allow it to be considered as a routine diagnostic method.

KEYWORDS

Single-photon emission computed tomography, SPECT, SISCOM, epilepsy, epilepsy surgery, epileptogenic zone.

ARTICLE INFORMATION

Received: 28.10.2023. **Revision received:** 07.12.2023. **Accepted:** 11.01.2024. **Published:** 30.03.2024.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interest regarding this publication.

Authors' contribution

Ishmuratov E.V. – publications search and analysis, text writing;

Zuev A.A. – text editing, final approval of the manuscript

For citation

Ishmuratov E.V., Zuev A.A. Subtraction ictal single-photon emission computed tomography (SPECT) co-registered to MRI (SISCOM) in presurgical diagnostics of epilepsy. *Epilepsia i paroksizmal'nye sostoania / Epilepsy and Paroxysmal Conditions*. 2024; 16 (1): 69–76 (in Russ.). <https://doi.org/10.17749/2077-8333/epi.par.con.2024.173>.

ВВЕДЕНИЕ / INTRODUCTION

В настоящее время под эпилепсией подразумевают заболевание головного мозга, которое соответствует хотя бы одному из трех критериев, предложенных Международной Противозепилептической Лигой (англ. International League Against Epilepsy, ILAE) [1]:

- два и более неспровоцированных (или рефлекторных) эпилептических приступа с интервалом более 24 ч;
- один неспровоцированный (или рефлекторный) приступ с высокой вероятностью рецидива (60% и более);
- диагноз эпилептического синдрома.

Известно, что около 1/3 пациентов резистентны к медикаментозной терапии [2]. В случае формирования фармакорезистентности одним из эффективных методов лечения является хирургия. Успех хирургического вмешательства зависит от точности определения эпилептогенной зоны, при удалении которой удастся избавить пациента от приступов [3]. Согласно концепции Н.О. Lüders et al., эпилептогенная зона – это совокупность нескольких зон (ирритативной, иктального начала,

функционального дефицита, эпилептогенного анатомического поражения и симптоматогенной) [4].

Основными методами предхирургической диагностики эпилепсии являются магнитно-резонансная томография (МРТ) по эпилептологическому протоколу и продолженный электроэнцефалографический (ЭЭГ) видеомониторинг с регистрацией приступов [5–7]. МРТ головного мозга может выявлять различные анатомические эпилептогенные субстраты, такие как склероз гиппокампа, опухоли и аномалии развития головного мозга. Продолженный видео-ЭЭГ-мониторинг решает вопрос поиска зон ирритации, начала приступа и симптоматогенной зоны.

Если данные, полученные по результатам двух вышеуказанных методов обследования, достаточны и не противоречат друг другу, возможно обсуждение хирургического лечения [8, 9]. Во всех остальных случаях пациентам требуется дообследование. Одной из методик, которая может применяться для решения этой задачи, является однофотонная эмиссионная компьютерная томография (ОФЭКТ) с применением протокола SISCOM (англ. subtraction ictal SPECT co-registered to MRI).

ОФЭКТ КАК МЕТОД ПРЕДХИРУРГИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ ЭПИЛЕПСИИ / SPECT AS A METHOD FOR PRESURGICAL EPILEPSY DIAGNOSTICS

ОФЭКТ является методом ядерной визуализации, с помощью которого оценивают изменяющийся уровень перфузии крови в ткани мозга. Для этого применяется внутривенно вводимый меченый трейсер, который накапливается и в течение нескольких часов удерживается в мелких сосудах [10]. При возникновении эпилептического приступа в зоне инициации отмечаются гиперперфузия и усиленное накопление радионуклидного препарата тканями головного мозга.

Основные используемые радиофармпрепараты – гамма-излучатели. Трейсеры, которые могут применяться в определении зоны начала приступа, должны обладать определенными характеристиками: липофильностью, малым молекулярным размером для быстрого преодоления неповрежденного гематоэнцефалического барьера [11–13]. Используют препараты технеция 99 (^{99m}Tc), такие как ^{99m}Tc -HMPAO (Ceretec® – GE Healthcare Ltd. (Великобритания), Theoxum® – ООО «Диамед» (Россия)) или ^{99m}Tc -ECD (Neurolite® – Lantheus Medical Imaging (США)). Препараты проникают в клетки головного мозга благодаря своей липофильной природе и остаются там, превращаясь в гидрофильные соединения [14].

Для регистрации накопившегося в зоне гиперперфузии гамма-излучателя применяют гамма-томограф. Полученные в иктальный и интериктальный периоды изображения обрабатываются и совмещаются с МРТ-изображениями головного мозга (применение протокола SISCOM).

ОФЭКТ С ПРИМЕНЕНИЕМ ПРОТОКОЛА SISCOM / SPECT USING SISCOM PROTOCOL

Показания к проведению / Indications for the procedure

Основным показанием к проведению ОФЭКТ у пациентов с эпилепсией является необходимость локализации эпилептогенной зоны, не выявленной достаточно четко с помощью других диагностических методов.

Как правило, ОФЭКТ показана больным МР-негативной эпилепсией или с противоречивыми результатами ранее проведенных обследований. У некоторых МР-негативных больных ОФЭКТ может иметь навигационную функцию, когда после установления вероятного места иктального начала приступа проводится повторный анализ данных МРТ, выявляется эпилептогенный субстрат и пациент перестает считаться МР-негативным [12, 15–18].

Методика полезна для выбора местоположения установки инвазивных электродов (субдуральных или глубинных) и может сократить их количество во время разработки гипотезы об эпилептогенной зоне, а также применяется для уточнения эпилептогенной зоны у уже прооперированных пациентов, если первая операция не привела к освобождению от приступов [16].

Противопоказания к проведению / Contraindications for the procedure

Среди противопоказаний к проведению ОФЭКТ можно выделить [10, 14]:

- беременность и грудное вскармливание (если кормящей матери показано выполнение ОФЭКТ, грудное вскармливание прерывается на 24 ч);

- невозможность или существенные трудности во взаимодействии пациента с медицинским персоналом (сюда можно отнести различные состояния, препятствующие проведению обследования, такие как параллельно текущие психические расстройства, выраженное снижение когнитивных функций, длительные постприступные психозы и эпизоды дезориентации);

- короткие по продолжительности приступы (требуется рассчитывать минимальную продолжительность приступа, подходящую для ОФЭКТ, исходя из времени, необходимого на введение радиоактивного трейсера и транспортировку препарата до тканей головного мозга, которое составляет около 10 с);

- частые приступы, не купирующиеся бензодиазепинами, т.к. будет затруднено проведение одного из этапов обследования (минимум за 2 ч до выполнения интериктальной ОФЭКТ не должно быть приступов).

Методика проведения / Procedure methodology

ОФЭКТ является многоэтапным исследованием и требует взаимодействия разнопрофильных специалистов (невролог-эпилептолог, средний медицинский персонал, нейрорадиолог), каждый из которых должен четко понимать свою роль в обследовании и уметь действовать быстро и слаженно с остальными. Можно выделить несколько этапов проведения исследования:

- 1) подготовительный этап;
- 2) иктальная ОФЭКТ;
- 3) интериктальная ОФЭКТ;
- 4) применение протокола SISCOM;
- 5) оценка полученных данных.

Ниже раскрыты основные особенности этапов ОФЭКТ.

Подготовительный этап

Пациента готовят к исследованию согласно руководству по проведению ОФЭКТ Европейской ассоциации ядерной медицины (англ. European Association of Nuclear Medicine, EANM). Перед началом исследования [14]:

- исключается табакокурение, употребление стимуляторов (таких как кофеиносодержащие напитки), алкоголя и любых лекарств, которые могут влиять на мозговую кровоток;

- исследование рекомендовано проводить в тихой, тускло освещенной комнате;

- пациент принимает комфортное (предпочтительно лежащее) положение;

- глаза пациента должны быть открыты, он не должен двигаться, говорить и читать;

- до начала процедуры устанавливается внутривенный катетер;

— обеспечивается проведение ЭЭГ для регистрации паттерна начала приступа.

Однако эти рекомендации не могут быть полностью реализованы у пациентов с эпилепсией. В некоторых случаях запись приступа возможна только в состоянии сна, когда глаза закрыты, или требуется определенная провокация приступа (например, гипервентиляцией) и состояние покоя перед введением радиофармпрепарата обеспечить можно далеко не всегда. В подготовительный этап также входит планирование частичной или полной отмены противоэпилептической терапии, чтобы повысить шансы развития приступа.

Иctalная ОФЭКТ

Суть иctalной ОФЭКТ заключается в быстром введении радиофармпрепарата после начала приступа. В связи с этим пациенту проводится непрерывный видео-ЭЭГ-мониторинг. В некоторых источниках рекомендуют хранить подготовленные шприцы в отделении мониторинга эпилепсии, чтобы обеспечить максимально быстрое введение препарата [8, 12, 14]. Как только невролог-эпилептолог клинически или по данным ЭЭГ понимает, что начинается приступ, он сообщает среднему медицинскому персоналу о необходимости введения радиофармпрепарата. В настоящее время существует система автоматизированного введения радиотрейсера. Пациента подключают к ней заранее, и запуск инъекции осуществляют с панели управления или с помощью пульта дистанционного управления [19, 20].

Время введения гамма-излучающего радионуклида имеет решающее значение для обследования [18]. В основном авторы используют раннюю инъекцию без указания конкретного лимита времени. В ряде работ отмечается необходимость введения препарата в течение 15–45 с после начала приступа [10, 15]. Время инъекции с автоматизированной системой составляет менее 5 с, что может оптимизировать проведение обследования и обеспечить более высокую точность ОФЭКТ [19, 20].

После введения трейсера и стабилизации пациента необходима регистрация излучения на гамма-томографе. Для исключения повторных приступов во время сканирования возможна инъекция бензодиазепинов короткого действия, но не ранее чем через 5 мин после введения индикатора [14]. Изображения могут быть получены даже через несколько часов после окончания пароксизма. Согласно рекомендациям с целью получения изображения наилучшего качества необходимо откладывать проведение визуализации на 30–60 мин для трейсера ^{99m}Tc -ECD и на 30–90 мин для ^{99m}Tc -HMPAO. Следует избегать чрезмерной задержки сканирования, из-за радиоактивного распада рекомендуется выполнять его в течение 4 ч после введения препарата [14, 21].

Интериктальная ОФЭКТ

Интериктальная ОФЭКТ проводится не ранее чем через 24 ч после введения радиофармпрепарата в иctalный период, что связано с периодом полураспада.

Подготовительный этап соответствует таковому перед иctalной ОФЭКТ. Также рекомендуют проводить непрерывный видео-ЭЭГ-мониторинг по крайней мере за 2 ч до инъекции и через 15 мин после нее, чтобы исключить возможность возникновения эпилептического приступа незадолго до периода введения радиофармпрепарата и во время него [10, 14].

После введения трейсера также проводят визуализацию на гамма-томографе. Временной промежуток между инъекцией препарата и сканированием должен быть аналогичным таковому в иctalной ОФЭКТ [14].

Применение протокола SISCOM

Применять ОФЭКТ с внутривенным введением препаратов, меченных ^{99m}Tc (^{99m}Tc -HMPAO, ^{99m}Tc -ECD), для измерения перфузии участков головного мозга и поиска эпилептогенной зоны начали с 1976 г., однако оценивали в большинстве случаев только иctalную фазу [22]. С 1986 г. стали проводить сравнительный анализ (субтракцию) результатов ОФЭКТ в иctalном и интериктальном периодах. Изображения интериктального периода ОФЭКТ вычитают из изображений иctalного периода. Разницу между двумя исследованиями считают предположительной зоной начала приступа [16].

В 1998 г. T.J. O'Brien et al. [23] осуществили комбинацию полученных результатов субтракции с высокоразрешающей MPT головного мозга (проведенной с наркозом). Методика совмещения изображений, полученных в ходе субтракции интериктального и иctalного периодов ОФЭКТ и MPT, получила название «субтракционная иctalная ОФЭКТ, корегистрированная с данными MPT» (англ. subtraction ictal SPECT co-registered to MRI, SISCOM). Показано, что протокол SISCOM повышает чувствительность локализации эпилептогенной зоны на 43,1%. Обследование было включено в клиническую практику для визуализации МР-негативных эпилептогенных зон и в других сомнительных случаях [16, 22, 23].

Оценка полученных данных

После обработки данных получают искомый паттерн гиперперфузии эпилептогенной области на MPT головного мозга [10, 24].

Из дополнительных данных, оцениваемых для латерализации эпилептогенной области, выделяют гиперперфузию ипсилатеральных базальных ганглиев, таламуса, моторной коры или контралатеральную гиперперфузию мозжечка [24].

Иногда радиотрейсер ОФЭКТ не может быть введен быстро во время продолжающегося приступа и вместо этого инъекция проводится постиктально. Существует феномен постиктальной гипоперфузии, когда мозговой кровотока в области эпилептогенного очага резко падает на несколько минут после окончания приступа. Причем уровень постиктальной гипоперфузии ниже интериктальной гипоперфузии на 30–92%. Данный феномен также можно визуализировать с помощью SISCOM. Постиктальный очаг гипоперфузии обычно имеет более широкое распространение [25].

Эффективность методики / Methodology effectiveness

Наиболее актуальный метаанализ по данному вопросу датируется 2016 г. и объединяет результаты 11 исследований, проведенных в период с января 1995 г. по июнь 2015 г. и включавших в общей сложности 320 больных эпилепсией [26]. Суммарно 142 пациента были МР-негативными, и проведение ОФЭКТ по протоколу SISCOM позволило определить эпилептогенную зону у 119 из них (83,8%). Положительная прогностическая ценность диагностического метода для прооперированных пациентов без приступов (Engel I) составила 56% (95% доверительный интервал 49–64%).

По данным T.J. O'Brien et al., применение протокола SISCOM позволило визуализировать эпилептогенные зоны у 45 из 51 (88,2%) обследованных пациентов с фокальной эпилепсией [23]. Для сравнения, при ранее применявшейся ОФЭКТ без протокола SISCOM данный показатель составил 39,2% (20 из 51 пациента) ($p < 0,001$). Ряд авторов оценили чувствительность ОФЭКТ в 64,8–86%, а специфичность в 40,7–75% [12, 24, 27–29].

T.J. Von Oertzen et al. опубликовали данные, полученные на 175 пациентах с недостаточной информацией о локализации эпилептогенной зоны, которые были обследованы с помощью протокола SISCOM для решения вопроса об установке внутримозговых электродов [30]. Результаты SISCOM полностью соответствовали эпилептогенной зоне в 82% случаев. Специфичность метода при наличии множественных эпилептогенных субстратов составила 75%.

В **таблице 1** отображены основные характеристики прогностической ценности метода, полученные в разных исследованиях.

Послеоперационные исходы, приведенные в статьях, как правило, оценивались по общепринятой шкале Engel, где Engel I – полное избавление от приступов, Engel II – редкие приступы, Engel III – существенное улучшение, Engel IV – отсутствие эффекта [33]. В некоторых работах Engel I и II объединялись в единый блок положительного эффекта. В **таблице 2** представлены обобщенные данные по эффективности хирургического лечения па-

циентов с эпилепсией, зона резекции у которых соответствует зоне гиперперфузии по результатам ОФЭКТ с применением протокола SISCOM.

Имеются данные о сравнении ОФЭКТ с применением протокола SISCOM с другими методами предхирургической диагностики. Так, например, в исследовании A. Desai et al. у 45 взрослых пациентов, которым проводился инвазивный видео-ЭЭГ-мониторинг с целью подтверждения зоны начала приступа, ОФЭКТ показала большую чувствительность по сравнению с позитронной эмиссионной компьютерной томографией с ^{18}F -фтордезоксиглюкозой (ПЭТ-КТ с ^{18}F ФДГ) – 87% и 56% соответственно [28].

В отличие от ПЭТ-КТ с ^{18}F ФДГ, которую предпочтительнее использовать для височных форм эпилепсии, ОФЭКТ показывает лучшие результаты при вневисочной локализации эпилептогенной зоны [36].

В детской популяции метод также демонстрирует достаточное соответствие полученных результатов с эпилептогенной зоной [37]. Среди 54 прооперированных детей с фармакорезистентной формой структурной эпилепсии MPT головного мозга показала эпилептогенный субстрат в 21 из 54 случаев (39%), зона гиперперфузии на SISCOM была найдена в 36 из 54 наблюдений (67%), а зона гипометаболизма при применении ПЭТ-КТ с ^{18}F ФДГ – в 31 из 54 случаев (57%).

Ранее проведенные исследования, в которых сравнивались показатели диагностической эффективности ОФЭКТ с протоколом SISCOM и магнитоэнцефалографии (МЭГ), показали противоречивые результаты и были ограничены малым размером выборки [38–40]. В одной из недавних работ для ОФЭКТ получены незначительно лучшие результаты, чем для МЭГ, в отношении хорошего послеоперационного исхода [31].

Согласно EANM и O'Brien T.J. выделяют следующие основные причины некорректных результатов ОФЭКТ [14, 23]:

- незапланированная активация головного мозга;
- артефакты на различных этапах проведения исследования (движения пациента во время сканирования на гамма-томографе, неправильная обработка данных);

Таблица 1. Основные показатели прогностической ценности однофотонной эмиссионной компьютерной томографии с применением протокола SISCOM

Table 1. Major parameters of predictive value for subtraction ictal single-photon emission computed tomography co-registered to magnetic resonance imaging (SISCOM)

Авторы / Authors	Год / Year	Чувствительность, % / Sensitivity, %	Специфичность, % / Specificity, %	PPV, %	NPV, %
M.V. Spanaki et al. [27]	1999	86,0	75,0	–	–
A. Desai et al. [28]	2013	87,0	–	–	–
T. Chen et al. [26]	2016	–	–	56,0	–
G. Aungaroon et al. [29]	2018	64,8	40,7	–	–
K. Kaur et al. [31]	2021	83,3–85,7	50,0	90,0–90,9	25,0–33,3
M. Prener et al. [32]	2023	76,0–83,3	65,0–73,0	70,0–75,0	20,0–50,0

Примечание. PPV (англ. positive predictive value) – положительная прогностическая ценность; NPV (англ. negative predictive value) – отрицательная прогностическая ценность.

Note. PPV – positive predictive value; NPV – negative predictive value.

Таблица 2. Эффективность хирургического лечения пациентов с фармакорезистентной структурной эпилепсией, зона резекции у которых совпадала с результатами однофотонной эмиссионной компьютерной томографии с применением протокола SISCOM

Table 2. The effectiveness of surgical treatment in patients with pharmacoresistant structural epilepsy, whose resection zone coincided with the results of subtraction ictal single-photon emission computed tomography co-registered to magnetic resonance imaging (SISCOM)

Авторы / Authors	Год / Year	Исходы класса Engel I / общее число прооперированных, n // Engel I outcomes / total post-surgery patients, n	Исходы класса Engel I, % / Engel I outcomes, %
T.J. O'Brien et al. [23]	1998	10/16	62,5
T.J. Von Oertzen et al. [30]*	2011	22/26	84,6
E.B. Cho et al. [34]	2015	25/39	65,8
T. Chen et al. [26]	2016	100/176	56,1
T. Foiadelli et al. [35]	2019	16/24	66,7
K. Kaur et al. [31]	2021	31/42	73,8
M. Prener et al. [32]	2023	25/56	44,0

Примечание. * В исследовании оценивали исходы классов Engel I–II.

Note. * Engel I–II outcomes were assessed in the study.

- прием лекарств, влияющих на мозговое кровообращение;
- позднее введение радиофармпрепарата (более 45 с от начала приступа).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ / CONCLUSION

Субтракционная иктальная ОФЭКТ, корегистрированная с данными МРТ (SISCOM), имеет достаточно высокую чувствительность (в среднем около 70–75%), умеренные специфичность (40–75%) и позитивную прогностическую ценность (56%) для пациентов с фармакорезистентной фокальной структурной эпилепсией

в плане выявления зоны иктального начала и может применяться в предхирургической диагностике.

Нельзя утверждать, что SISCOM является единственным вариантом и способна заменить другие неинвазивные и инвазивные методы. Она может использоваться в совокупности с другими исследованиями. Методику также допустимо применять для планирования объема инвазивного этапа диагностики (стерео-ЭЭГ, установка субдуральных электродов). Несмотря на диагностическую ценность SISCOM, ряд ограничений для пациентов с эпилепсией и трудоемкость исследования не позволяют использовать метод в достаточном объеме и создают проблему труднодоступности.

ЛИТЕРАТУРА:

- Fisher R.S., Acevedo C., Arzimanoglou A., et al. ILAE official report: a practical clinical definition of epilepsy. *Epilepsia*. 2014; 55 (4): 475–82. <https://doi.org/10.1111/epi.12550>.
- Pittau F., Grouiller F., Spinelli L., et al. The role of functional neuroimaging in pre-surgical epilepsy evaluation. *Front Neurol*. 2014; 5: 31. <https://doi.org/10.3389/fneur.2014.00031>.
- Engel J. Jr. Multimodal approaches in the evaluation of epilepsy patients for surgery. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol Suppl*. 1999; 50: 40–52.
- Lüders H.O., Najm I., Nair D., et al. The epileptogenic zone: general principles. *Epileptic Disord*. 2006; 8 (Suppl. 2): S1–9.
- Kobulashvili T., Kuchukhidze G., Brigo F., et al. Diagnostic and prognostic value of noninvasive long-term video-electroencephalographic monitoring in epilepsy surgery: a systematic review and meta-analysis from the E-PILEPSY consortium. *Epilepsia*. 2018; 59 (12): 2272–83. <https://doi.org/10.1111/epi.14598>.
- Rados M., Mouthaan B., Barsi P., et al. Diagnostic value of MRI in the presurgical evaluation of patients with epilepsy: influence of field strength and sequence selection: a systematic review and meta-analysis from the E-PILEPSY Consortium. *Epileptic Disord*. 2022; 24 (2): 323–42. <https://doi.org/10.1684/epd.2021.1399>.
- Wang I., Bernasconi A., Bernhardt B., et al. MRI essentials in epileptology: a review from the ILAE Imaging Taskforce. *Epileptic Disord*. 2020; 22 (4): 421–37. <https://doi.org/10.1684/epd.2020.1174>.
- So E.L. Role of neuroimaging in the management of seizure disorders. *Mayo Clin Proc*. 2002; 77 (11): 1251–64. <https://doi.org/10.4065/77.11.1251>.
- Thadani V.M., Williamson P.D., Berger R., et al. Successful epilepsy surgery without intracranial EEG recording: criteria for patient selection. *Epilepsia*. 1995; 36 (1): 7–15. <https://doi.org/10.1111/j.1528-1157.1995.tb01658.x>.
- Айвазян С.О. Предхирургическое обследование детей с фармакорезистентной фокальной эпилепсией. М.; 2017. URL: <https://irbis.rmapo.ru/UploadsFilesForIrbis/d4c19dc84b79d9f0422f6e7e5c0a6e33.pdf> (дата обращения 15.10.2023).
- Ergün E.L., Salanci B.V., Erbas B., Saygi S. SPECT in periodic lateralized epileptiform discharges (PLEDs): a case report on PLEDs. *Ann Nucl Med*. 2006; 20 (3): 227–31. <https://doi.org/10.1007/BF03027435>.
- la Fougère C., Rominger A., Förster S., et al. PET and SPECT in epilepsy: a critical review. *Epilepsy Behav*. 2009; 15 (1): 50–5. <https://doi.org/10.1016/j.yebeh.2009.02.025>.
- Lequin M.H., Blok D., Pauwels E.K.J. Radiopharmaceuticals for functional brain imaging with SPECT. In: Freeman L.M. (Ed.): Nuclear medicine annual. New York: Raven Press; 1991: 37–65.
- Kapucu O.L., Nobili F., Varrone A., et al. EANM procedure guideline for brain perfusion SPECT using 99mTc-labelled radiopharmaceuticals, version 2. *Eur J Nucl Med Mol Imaging*. 2009; 36 (12): 2093–102. <https://doi.org/10.1007/s00259-009-1266-y>.
- Карпов О.Э., Бронов О.Ю., Вахромеева М.Н. и др. Протокол SISCOM

- в диагностике эпилепсии (первые данные). *Вестник Национально-го медико-хирургического центра им. Н.И. Пирогова*. 2018; 13 (3): 75–8. <https://doi.org/10.25881/BPNMSC.2018.33.29.016>.
16. Ergün E.L., Saygi S., Yalnizoglu D., et al. SPECT-PET in epilepsy and clinical approach in evaluation. *Semin Nucl Med*. 2016; 46 (4): 294–307. <https://doi.org/10.1053/j.semnuclmed.2016.01.003>.
 17. Engel J. Jr. Introduction to temporal lobe epilepsy. *Epilepsy Res*. 1996; 26 (1): 141–50. [https://doi.org/10.1016/s0920-1211\(96\)00043-5](https://doi.org/10.1016/s0920-1211(96)00043-5).
 18. Kumar A., Chugani H.T. The role of radionuclide imaging in epilepsy, Part 1: Sporadic temporal and extratemporal lobe epilepsy. *J Nucl Med*. 2013; 54 (10): 1775–81. <https://doi.org/10.2967/jnumed.112.114397>.
 19. Setoain X., Campos F., Donaire A., et al. How to inject ictal SPECT? From manual to automated injection. *Epilepsy Res*. 2021; 175: 106691. <https://doi.org/10.1016/j.epilepsyres.2021.106691>.
 20. Setoain X., Pavia J., Serés E., et al. Validation of an automatic dose injection system for ictal SPECT in epilepsy. *J Nucl Med*. 2012; 53 (2): 324–9. <https://doi.org/10.2967/jnumed.111.093211>.
 21. Thomsen G., de Nijs R., Hogh-Rasmussen E., et al. Required time delay from 99mTc-HMPAO injection to SPECT data acquisition: healthy subjects and patients with rCBF pattern. *Eur J Nucl Med Mol Imaging*. 2008; 35 (12): 2212–9. <https://doi.org/10.1007/s00259-008-0836-8>.
 22. Jaszczak R.J. The early years of single photon emission computed tomography (SPECT): an anthology of selected reminiscences. *Phys Med Biol*. 2006; 51 (13): R99–115. <https://doi.org/10.1088/0031-9155/51/13/R07>.
 23. O'Brien T.J., So E.L., Mullan B.P., et al. Subtraction ictal SPECT co-registered to MRI improves clinical usefulness of SPECT in localizing the surgical seizure focus. *Neurology*. 1998; 50 (2): 445–54. <https://doi.org/10.1212/wnl.50.2.445>.
 24. Devous M.D. Sr., Thisted R.A., Morgan G.F., et al. SPECT brain imaging in epilepsy: a meta-analysis. *J Nucl Med*. 1998; 39 (2): 285–93.
 25. O'Brien T.J., So E.L., Mullan B.P., et al. Subtraction SPECT co-registered to MRI improves postictal SPECT localization of seizure foci. *Neurology*. 1999; 52 (1): 137–46. <https://doi.org/10.1212/wnl.52.1.137>.
 26. Chen T., Guo L. The role of SISCOM in preoperative evaluation for patients with epilepsy surgery: a meta-analysis. *Seizure*. 2016; 41: 43–50. <https://doi.org/10.1016/j.seizure.2016.06.024>.
 27. Spanaki M.V., Spencer S.S., Corsi M., et al. Sensitivity and specificity of quantitative difference SPECT analysis in seizure localization. *J Nucl Med*. 1999; 40 (5): 730–6.
 28. Desai A., Bekelis K., Thadani V.M., et al. Interictal PET and ictal subtraction SPECT: sensitivity in the detection of seizure foci in patients with medically intractable epilepsy. *Epilepsia*. 2013; 54 (2): 341–50. <https://doi.org/10.1111/j.1528-1167.2012.03686.x>.
 29. Aungaroon G., Trout A., Radhakrishnan R., et al. Impact of radiotracer injection latency and seizure duration on subtraction ictal SPECT co-registered to MRI (SISCOM) performance in children. *Clin Neurophysiol*. 2018; 129 (9): 1842–8. <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2018.06.010>.
 30. von Oertzen T.J., Mormann F., Urbach H., et al. Prospective use of subtraction ictal SPECT coregistered to MRI (SISCOM) in presurgical evaluation of epilepsy. *Epilepsia*. 2011; 52 (12): 2239–48. <https://doi.org/10.1111/j.1528-1167.2011.03219.x>.
 31. Kaur K., Garg A., Tripathi M., et al. Comparative contribution of magnetoencephalography (MEG) and single-photon emission computed tomography (SPECT) in pre-operative localization for epilepsy surgery: a prospective blinded study. *Seizure*. 2021; 86: 181–8. <https://doi.org/10.1016/j.seizure.2021.02.005>.
 32. Prener M., Drejer V., Ziebell M., et al. Ictal and interictal SPECT with 99mTc-HMPAO in presurgical epilepsy. I: Predictive value and methodological considerations. *Epilepsia Open*. 2023; 8 (3): 1064–74. <https://doi.org/10.1002/epi4.12786>.
 33. Engel J. Jr. (Ed.) Surgical treatment of the epilepsies. 2nd ed. New York: Raven Press; 1993: 786 pp.
 34. Cho E.B., Joo E.Y., Seo D.W., et al. Prognostic role of functional neuroimaging after multilobar resection in patients with localization-related epilepsy. *PLoS One*. 2015; 10 (8): e0136565. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0136565>.
 35. Foidelli T., Lagae L., Goffin K., et al. Subtraction Ictal SPECT coregistered to MRI (SISCOM) as a guide in localizing childhood epilepsy. *Epilepsia Open*. 2019; 5 (1): 61–72. <https://doi.org/10.1002/epi4.12373>.
 36. Kim J.T., Bai S.J., Choi K.O., et al. Comparison of various imaging modalities in localization of epileptogenic lesion using epilepsy surgery outcome in pediatric patients. *Seizure*. 2009; 18 (7): 504–10. <https://doi.org/10.1016/j.seizure.2009.04.012>.
 37. Perissinotti A., Setoain X., Aparicio J., et al. Clinical role of subtraction ictal SPECT coregistered to MR imaging and (18)F-FDG PET in pediatric epilepsy. *J Nucl Med*. 2014; 55 (7): 1099–105. <https://doi.org/10.2967/jnumed.113.136432>.
 38. Schneider F., Irene Wang Z., Alexopoulos A.V., et al. Magnetic source imaging and ictal SPECT in MRI-negative neocortical epilepsies: additional value and comparison with intracranial EEG. *Epilepsia*. 2013; 54 (2): 359–69. <https://doi.org/10.1111/epi.12004>.
 39. Sachdev H.S., Patel B., McManis M., et al. Comparing single-photon emission computed tomography (SPECT), electroencephalography (EEG), and magneto-encephalography (MEG) seizure localizations in pediatric cases of laser ablation. *J Child Neurol*. 2019; 34 (6): 303–8. <https://doi.org/10.1177/0883073818822353>.
 40. El Tahry R., Wang Z.I., Thandar A., et al. Magnetoencephalography and ictal SPECT in patients with failed epilepsy surgery. *Clin Neurophysiol*. 2018; 129 (8): 1651–7. <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2018.05.010>.

REFERENCES:

1. Fisher R.S., Acevedo C., Arzimanoglou A., et al. ILAE official report: a practical clinical definition of epilepsy. *Epilepsia*. 2014; 55 (4): 475–82. <https://doi.org/10.1111/epi.12550>.
2. Pittau F., Grouiller F., Spinelli L., et al. The role of functional neuroimaging in pre-surgical epilepsy evaluation. *Front Neurol*. 2014; 5: 31. <https://doi.org/10.3389/fneur.2014.00031>.
3. Engel J. Jr. Multimodal approaches in the evaluation of epilepsy patients for surgery. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol Suppl*. 1999; 50: 40–52.
4. Lüders H.O., Najm I., Nair D., et al. The epileptogenic zone: general principles. *Epileptic Disord*. 2006; 8 (Suppl. 2): S1–9.
5. Kobulashvili T., Kuchukhidze G., Brigo F., et al. Diagnostic and prognostic value of noninvasive long-term video-electroencephalographic monitoring in epilepsy surgery: a systematic review and meta-analysis from the E-PILEPSY consortium. *Epilepsia*. 2018; 59 (12): 2272–83. <https://doi.org/10.1111/epi.14598>.
6. Rados M., Mouthaan B., Barsi P., et al. Diagnostic value of MRI in the presurgical evaluation of patients with epilepsy: influence of field strength and sequence selection: a systematic review and meta-analysis from the E-PILEPSY Consortium. *Epileptic Disord*. 2022; 24 (2): 323–42. <https://doi.org/10.1684/epd.2021.1399>.
7. Wang I., Bernasconi A., Bernhardt B., et al. MRI essentials in epileptology: a review from the ILAE Imaging Taskforce. *Epileptic Disord*. 2020; 22 (4): 421–37. <https://doi.org/10.1684/epd.2020.1174>.
8. So E.L. Role of neuroimaging in the management of seizure disorders. *Mayo Clin Proc*. 2002; 77 (11): 1251–64. <https://doi.org/10.4065/77.11.1251>.
9. Thadani V.M., Williamson P.D., Berger R., et al. Successful epilepsy surgery without intracranial EEG recording: criteria for patient selection. *Epilepsia*. 1995; 36 (1): 7–15. <https://doi.org/10.1111/j.1528-1157.1995.tb01658.x>.
10. Ayvazyan S.O. Pre-surgical examination of children with pharmacoresistant focal epilepsy. Moscow; 2017. Available at: <https://irbis.rmapo.ru/UploadsFilesForIrbis/d4c19dc84b79d9f0422f6e7e5c0a6e33.pdf> (in Russ.) (accessed 15.10.2023).
11. Ergün E.L., Salanci B.V., Erbas B., Saygi S. SPECT in periodic lateralized epileptiform discharges (PLEDs): a case report on PLEDs. *Ann Nucl Med*. 2006; 20 (3): 227–31. <https://doi.org/10.1007/BF03027435>.
12. la Fougère C., Rominger A., Förster S., et al. PET and SPECT in epilepsy: a critical review. *Epilepsy Behav*. 2009; 15 (1): 50–5. <https://doi.org/10.1016/j.yebeh.2009.02.025>.

13. Lequin M.H., Blok D., Pauwels E.K.J. Radiopharmaceuticals for functional brain imaging with SPECT. In: Freeman L.M. (Ed.): Nuclear medicine annual. New York: Raven Press; 1991: 37–65.
14. Kapucu O.L., Nobili F., Varrone A., et al. EANM procedure guideline for brain perfusion SPECT using 99mTc-labelled radiopharmaceuticals, version 2. *Eur J Nucl Med Mol Imaging*. 2009; 36 (12): 2093–102. <https://doi.org/10.1007/s00259-009-1266-y>.
15. Karpov O.E., Bronov O.Yu., Vakhromeeva M.N., et al. SISCO protocol in diagnostics of epilepsy. First results. *Bulletin of Pirogov National Medical & Surgical Center*. 2018; 13 (3): 75–8 (in Russ.). <https://doi.org/10.25881/BPNMSC.2018.33.29.016>.
16. Ergün E.L., Saygi S., Yalnizoglu D., et al. SPECT-PET in epilepsy and clinical approach in evaluation. *Semin Nucl Med*. 2016; 46 (4): 294–307. <https://doi.org/10.1053/j.semnuclmed.2016.01.003>.
17. Engel J. Jr. Introduction to temporal lobe epilepsy. *Epilepsy Res*. 1996; 26 (1): 141–50. [https://doi.org/10.1016/s0920-1211\(96\)00043-5](https://doi.org/10.1016/s0920-1211(96)00043-5).
18. Kumar A., Chugani H.T. The role of radionuclide imaging in epilepsy, Part 1: Sporadic temporal and extratemporal lobe epilepsy. *J Nucl Med*. 2013; 54 (10): 1775–81. <https://doi.org/10.2967/jnumed.112.114397>.
19. Setoain X., Campos F., Donaire A., et al. How to inject ictal SPECT? From manual to automated injection. *Epilepsy Res*. 2021; 175: 106691. <https://doi.org/10.1016/j.eplepsyres.2021.106691>.
20. Setoain X., Pavia J., Serés E., et al. Validation of an automatic dose injection system for ictal SPECT in epilepsy. *J Nucl Med*. 2012; 53 (2): 324–9. <https://doi.org/10.2967/jnumed.111.093211>.
21. Thomsen G., de Nijs R., Hogh-Rasmussen E., et al. Required time delay from 99mTc-HMPAO injection to SPECT data acquisition: healthy subjects and patients with rCBF pattern. *Eur J Nucl Med Mol Imaging*. 2008; 35 (12): 2212–9. <https://doi.org/10.1007/s00259-008-0836-8>.
22. Jaszczak R.J. The early years of single photon emission computed tomography (SPECT): an anthology of selected reminiscences. *Phys Med Biol*. 2006; 51 (13): R99–115. <https://doi.org/10.1088/0031-9155/51/13/R07>.
23. O'Brien T.J., So E.L., Mullan B.P., et al. Subtraction ictal SPECT co-registered to MRI improves clinical usefulness of SPECT in localizing the surgical seizure focus. *Neurology*. 1998; 50 (2): 445–54. <https://doi.org/10.1212/wnl.50.2.445>.
24. Devous M.D. Sr., Thisted R.A., Morgan G.F., et al. SPECT brain imaging in epilepsy: a meta-analysis. *J Nucl Med*. 1998; 39 (2): 285–93.
25. O'Brien T.J., So E.L., Mullan B.P., et al. Subtraction SPECT co-registered to MRI improves postictal SPECT localization of seizure foci. *Neurology*. 1999; 52 (1): 137–46. <https://doi.org/10.1212/wnl.52.1.137>.
26. Chen T., Guo L. The role of SISCO in preoperative evaluation for patients with epilepsy surgery: a meta-analysis. *Seizure*. 2016; 41: 43–50. <https://doi.org/10.1016/j.seizure.2016.06.024>.
27. Spanaki M.V., Spencer S.S., Corsi M., et al. Sensitivity and specificity of quantitative difference SPECT analysis in seizure localization. *J Nucl Med*. 1999; 40 (5): 730–6.
28. Desai A., Bekelis K., Thadani V.M., et al. Interictal PET and ictal subtraction SPECT: sensitivity in the detection of seizure foci in patients with medically intractable epilepsy. *Epilepsia*. 2013; 54 (2): 341–50. <https://doi.org/10.1111/j.1528-1167.2012.03686.x>.
29. Augaroon G., Trout A., Radhakrishnan R., et al. Impact of radiotracer injection latency and seizure duration on subtraction ictal SPECT co-registered to MRI (SISCO) performance in children. *Clin Neurophysiol*. 2018; 129 (9): 1842–8. <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2018.06.010>.
30. von Oertzen T.J., Mormann F., Urbach H., et al. Prospective use of subtraction ictal SPECT coregistered to MRI (SISCO) in presurgical evaluation of epilepsy. *Epilepsia*. 2011; 52 (12): 2239–48. <https://doi.org/10.1111/j.1528-1167.2011.03219.x>.
31. Kaur K., Garg A., Tripathi M., et al. Comparative contribution of magnetoencephalography (MEG) and single-photon emission computed tomography (SPECT) in pre-operative localization for epilepsy surgery: a prospective blinded study. *Seizure*. 2021; 86: 181–8. <https://doi.org/10.1016/j.seizure.2021.02.005>.
32. Prener M., Drejer V., Ziebell M., et al. Ictal and interictal SPECT with 99mTc-HMPAO in presurgical epilepsy. I: Predictive value and methodological considerations. *Epilepsia Open*. 2023; 8 (3): 1064–74. <https://doi.org/10.1002/epi4.12786>.
33. Engel J. Jr. (Ed.) Surgical treatment of the epilepsies. 2nd ed. New York: Raven Press; 1993: 786 pp.
34. Cho E.B., Joo E.Y., Seo D.W., et al. Prognostic role of functional neuroimaging after multilobar resection in patients with localization-related epilepsy. *PLoS One*. 2015; 10 (8): e0136565. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0136565>.
35. Foidelli T., Lagae L., Goffin K., et al. Subtraction Ictal SPECT coregistered to MRI (SISCO) as a guide in localizing childhood epilepsy. *Epilepsia Open*. 2019; 5 (1): 61–72. <https://doi.org/10.1002/epi4.12373>.
36. Kim J.T., Bai S.J., Choi K.O., et al. Comparison of various imaging modalities in localization of epileptogenic lesion using epilepsy surgery outcome in pediatric patients. *Seizure*. 2009; 18 (7): 504–10. <https://doi.org/10.1016/j.seizure.2009.04.012>.
37. Perissinotti A., Setoain X., Aparicio J., et al. Clinical role of subtraction ictal SPECT coregistered to MR imaging and (18)F-FDG PET in pediatric epilepsy. *J Nucl Med*. 2014; 55 (7): 1099–105. <https://doi.org/10.2967/jnumed.113.136432>.
38. Schneider F., Irene Knowlton Z., Alexopoulos A.V., et al. Magnetic source imaging and ictal SPECT in MRI-negative neocortical epilepsies: additional value and comparison with intracranial EEG. *Epilepsia*. 2013; 54 (2): 359–69. <https://doi.org/10.1111/epi.12004>.
39. Sachdev H.S., Patel B., McManis M., et al. Comparing single-photon emission computed tomography (SPECT), electroencephalography (EEG), and magneto-encephalography (MEG) seizure localizations in pediatric cases of laser ablation. *J Child Neurol*. 2019; 34 (6): 303–8. <https://doi.org/10.1177/0883073818822353>.
40. El Tahry R., Wang Z.I., Thandar A., et al. Magnetoencephalography and ictal SPECT in patients with failed epilepsy surgery. *Clin Neurophysiol*. 2018; 129 (8): 1651–7. <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2018.05.010>.

Сведения об авторах

Ишмуратов Евгений Валерьевич – врач-невролог неврологического отделения Центра нейрохирургии ФГБУ «Национальный медико-хирургический центр им. Н.И. Пирогова» Минздрава России (Москва, Россия). ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-8480-2814>; РИНЦ SPIN-код: 4555-0715. E-mail: ei-doc@yandex.ru.

Зуев Андрей Александрович – заведующий нейрохирургического отделения ФГБУ «Национальный медико-хирургический центр им. Н.И. Пирогова» Минздрава России (Москва, Россия). ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-2974-1462>; Scopus Author ID: 26424155600; РИНЦ SPIN-код: 9377-4574.

About the authors

Evgeny V. Ishmuratov – Neurologist, Neurological Department, Neurosurgery Center, Pirogov National Medical and Surgical Center (Moscow, Russia). ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-8480-2814>; RSCI SPIN-code: 4555-0715. E-mail: ei-doc@yandex.ru.

Andrey A. Zuev – Head of Neurosurgical Department, Pirogov National Medical and Surgical Center (Moscow, Russia). ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-2974-1462>; Scopus Author ID: 26424155600; RSCI SPIN-code: 9377-4574.