

МУЛЬТИМОДАЛЬНЫЙ НЕЙРОМОНИТОРИНГ ПРИ КАРОТИДНОЙ ЭНДАРТЕРАКТОМИИ

В.А. Лукьянчиков^{1,2}, С.М. Чупаленков³

¹ФГБНУ «Научный центр неврологии»; Россия, 125367 Москва, Волоколамское шоссе, 80;

²ГБУЗ г. Москвы «Научно-исследовательский институт скорой помощи им. Н.В. Склифосовского Департамента здравоохранения г. Москвы»; Россия, 129090 Москва, Большая Сухаревская пл., 3;

³ФГБУЗ «Клиническая больница № 85 Федерального медико-биологического агентства»; Россия, 115409 Москва, ул. Москворечье, 16

Контакты: Сергей Михайлович Чупаленков Chupalenkovsm@gmail.com

Пациенты со стенозом сонных артерий входят в группу высокого риска развития ишемического инсульта. Каротидная эндартерэктомия – метод выбора хирургической профилактики ишемического инсульта у пациентов с симптомным и бессимптомным стенозом каротидных артерий. Такие этапы каротидной эндартерэктомии, как выделение, пережатие артерий и установка временного внутрипросветного шунта, могут сопровождаться ишемическими осложнениями вследствие эмболии и недостаточного коллатерального кровообращения. Мультиmodalный интраоперационный нейрофизиологический мониторинг, включающий церебральную оксиметрию, регистрацию соматосенсорных и моторных вызванных потенциалов, электроэнцефалографию и транскраниальную доплерографию, позволяет проводить прямой и косвенный мониторинг церебральной перфузии на протяжении всей операции и может быть использован для прогнозирования исходов хирургического лечения. Мультиmodalный подход к проведению интраоперационного нейрофизиологического мониторинга является наиболее чувствительным и специфичным для прогнозирования и минимизации послеоперационного неврологического дефицита.

Ключевые слова: каротидная эндартерэктомия, церебральная оксиметрия, электроэнцефалография, соматосенсорные вызванные потенциалы, моторные вызванные потенциалы, транскраниальная доплерография, ишемический инсульт, нейрофизиология, нейромониторинг

Для цитирования: Лукьянчиков В.А., Чупаленков С.М. Мультиmodalный нейромониторинг при каротидной эндартерэктомии. Нейрохирургия 2024;26(4):102–9.

DOI: <https://doi.org/10.17650/1683-3295-2024-26-4-102-109>

Multimodal monitoring in carotid endarterectomy

V.A. Lukyanchikov^{1,2}, S.M. Chupalenkov³

¹Research Center of Neurology; 80 Volokolamskoye Shosse, Moscow 125367, Russia;

²N.V. Sklifosovsky Research Institute for Emergency Medicine, Moscow Healthcare Department; 3 Bolshaya Sukharevskaya Sq., Moscow 129090, Russia;

³Clinical Hospital No. 85, Federal Medical and Biological Agency of Russia; 16 Moskvorechye St., Moscow 115409, Russia

Contacts: Sergey Mikhailovich Chupalenkov Chupalenkovsm@gmail.com

Patients with carotid artery stenosis have high risk of ischemic stroke. Carotid endarterectomy is the method of choice for ischemic stroke prevention in patients with symptomatic and asymptomatic carotid artery stenosis. Such stages of carotid endarterectomy as selection, artery clamping, and placement of a temporary intraluminal shunt can be accompanied by ischemic complications due to embolism and insufficient collateral blood flow. Multimodal intraoperative neurophysiological monitoring consisting of cerebral oximetry, somatosensory and motor evoked potentials monitoring, electroencephalography, and transcranial Doppler ultrasound allows to perform direct and indirect monitoring of cerebral perfusion during the whole surgery and can be used for prediction of surgical outcomes. Multimodal approach to intraoperative neurophysiological monitoring is the most sensitive and specific approach for predicting and minimizing postoperative neurologic deficit.

Keywords: carotid endarterectomy, cerebral oximetry, electroencephalography, somatosensory evoked potentials, motor evoked potentials, transcranial Doppler ultrasound, ischemic stroke, neurophysiology, neuromonitoring

For citation: Lukyanchikov V.A., Chupalenkov S.M. Multimodal monitoring in carotid endarterectomy. *Neurokhirurgiya = Russian Journal of Neurosurgery* 2024;26(4):102–9. (In Russ.).
DOI: <https://doi.org/10.17650/1683-3295-2024-26-4-102-109>

ВВЕДЕНИЕ

Инсульт остается одной из ведущих причин инвалидности и смертности во всем мире. В России ежегодно фиксируют около 500 тыс. инсультов, более 80 % из которых обусловлены нарушениями мозгового кровообращения по ишемическому типу [1, 2]. Показатели заболеваемости в настоящее время демонстрируют тенденцию к росту, поскольку распространенность инсульта и смертность от него увеличились на 19,3 и 5,3 % соответственно [3]. Современные статистические исследования показывают рост заболеваемости в возрастных группах старше 50 лет, особенно у пожилых женщин старше 75 лет, у которых вероятность инсульта более чем на 50 % выше, чем у мужчин той же возрастной группы. Однако инсульт может поражать и людей молодого возраста [3]. Каротидная эндартерэктомия (КЭЭ), предложенная в 50-х годах прошлого столетия, является операцией выбора для хирургической профилактики ишемического инсульта у пациентов с симптомным и бессимптомным стенозом внутренних сонных артерий (ВСА). Тем не менее эта операция также имеет определенные риски интраоперационных и послеоперационных осложнений. По данным некоторых исследований, послеоперационный инсульт, инфаркт миокарда или летальный исход в 30-дневный период после КЭЭ могут возникнуть у 3,0–3,4 % пациентов [4–6]. Послеоперационный ишемический инсульт может быть связан с эмболией из атеросклеротической бляшки на этапе выделения артерий, снятия зажимов и пуска кровотока, а также с длительным пережатием ВСА [6].

Интраоперационный нейрофизиологический мониторинг (ИОНМ) включает регистрацию соматосенсорных вызванных потенциалов (ССВП), моторных вызванных потенциалов (МВП), церебральную оксиметрию, электроэнцефалографию (ЭЭГ), транскраниальную доплерографию (ТКДГ), которые могут использоваться как независимо, так и в сочетании друг с другом для надлежащего мониторинга церебральной перфузии и неврологической функции на всех этапах КЭЭ [7]. Также ИОНМ полезен для определения необходимости временного селективного шунтирования [7].

ОТБОР ПАЦИЕНТОВ

Согласно современным рекомендациям по лечению пациентов со стенозом ВСА выполнение КЭЭ необходимо пациентам с симптомным течением заболевания, перенесшим одну или несколько транзиторных ишемических атак или ишемический инсульт и имеющим выраженную степень стеноза ВСА (>70 % при методе измерения, использованном в исследова-

нии ECST (European Carotid Surgery Trial), >50 % при методе измерения, использованном в исследовании NASCET (North American Symptomatic Carotid Endarterectomy Trial)) [1, 8]. Однако у части пациентов заболевание протекает бессимптомно и часто выявляется в ходе диагностического поиска: для таких пациентов КЭЭ рекомендована только в том случае, если у них обнаружен стеноз высокой степени (>80 % – ECST, >60 % – NASCET; преимущественно мужчины не старше 75 лет, ожидаемая продолжительность жизни – не менее 5 лет) [1, 8].

ВРЕМЕННОЕ ПЕРЕЖАТИЕ СОННОЙ АРТЕРИИ

Временные зажимы накладывают по порядку на внутреннюю, общую и наружную сонные артерии. В случае выявления ишемии по данным ИОНМ после наложения зажима возможна установка временного внутрипросветного шунта. Критериями наложения временного шунта в настоящий момент являются снижение локальной скорости кровотока в средней мозговой артерии более чем на 60 % от исходной по данным ТКДГ, снижение ССВП более 50 % от исходных показателей по данным ЭЭГ, снижение показателей церебральной оксигенации (saturation of cerebral tissue with O_2 , $SctO_2$) на 55 % и более по данным церебральной оксиметрии и возникновение неврологического дефицита при использовании регионарной анестезии (РА) [8].

Хирурга уведомляют о значимых изменениях показателей во время непрерывного мониторинга, а также о любых изменениях после установки временных зажимов. Изменения следует сравнить с исходным уровнем, зарегистрированным до пережатия, чтобы определить необходимость внутрипросветного шунтирования. Пережатие артерий вызывает изменения в сигналах ССВП, МВП и ЭЭГ [9]. Согласно данным, представленным в рекомендациях Американского общества нейрофизиологического мониторинга (ASNM), примерно 69 % изменений сигнала после пережатия происходят в течение 20 с. После наложения зажима 80 % изменений происходят менее чем за 1 мин, а 99 % любых возможных изменений происходят в течение 2 мин [10].

МЕТОД АНЕСТЕЗИИ

Наиболее надежным мониторингом церебральной ишемии является прямая и непрерывная оценка когнитивной и моторной функций у бодрствующего пациента, когда возможно определение чувствительности мозга даже к очень короткому периоду церебральной ишемии и гипоксии [11, 12]. Блокада поверхностного

шейного сплетения с блокадой глубокого шейного сплетения или без нее является распространенным методом РА во время КЭЭ. Оценка нейрокогнитивной функции во время операции включает определение нейropsychологического статуса, оценку ориентации в месте и времени, речевой функции, мышечной силы и чувствительности. Преимуществом РА является возможность оценки двигательной функции методом «игрушки-пищалки», когда в контралатеральную кисть пациента помещают резиновую игрушку. В ходе операции пациент сжимает игрушку в руке, тем самым вызывая звуковой сигнал. Исчезновение звукового сигнала может свидетельствовать о возникновении ишемии коры головного мозга на стороне операции, что может потребовать установки временного внутрипросветного шунта [13, 14]. Данный метод также используют для невербальной связи с пациентом [13].

Потенциальные недостатки РА включают возбуждение или стресс у пациентов, обструкцию дыхательных путей и повреждение близлежащих структур во время блокады шейного сплетения, а также осложнения, связанные с блокадой близлежащих крупных нервных стволов на стороне анестезии — блуждающего, диафрагмального, симпатического. Например, по данным международного многоцентрового рандомизированного исследования GALA, сравнивающего общую анестезию (ОА) с местной при операциях на сонных артериях, у 4,4 % пациентов, оперированных с использованием РА, произошла травматизация шейного сплетения при инъекции анестетика [12]. Важно отметить, что в этом исследовании не удалось выявить различий в результатах (включая качество жизни, продолжительность пребывания в стационаре, возникновение инсульта, инфаркта миокарда и смерть) между группами пациентов, оперированных с использованием РА (4,5 %) и ОА (4,8 %) [12]. Однако исследование показало, что в группе РА частота использования внутрипросветного шунта меньше, чем в группе ОА (14 % против 43 %) [12].

В целом основными преимуществами прямого нейрокогнитивного мониторинга у бодрствующих пациентов являются его специфичность и чувствительность. Тем не менее имеющиеся данные, касающиеся результатов лечения пациентов, не свидетельствуют о превосходстве РА над ОА.

Для обеспечения оптимальной анестезии при мультимодальном ИОНМ рекомендуется использовать ОА по протоколу тотальной внутривенной анестезии. Это обеспечивает снижение количества артефактов и влияния анестезии на корковые ССВП, МВП и ЭЭГ, что позволяет провести более качественный мониторинг [9].

СОМАТОСЕНСОРНЫЕ ВЫЗВАННЫЕ ПОТЕНЦИАЛЫ

Соматосенсорный вызванный потенциал измеряет корковый ответ на периферическую стимуляцию

через соматосенсорные пути, что позволяет, в отличие от ЭЭГ, отслеживать неврологическую функцию более глубоких структур мозга.

При регистрации ССВП с верхних конечностей поверхностные электроды размещают на запястье с целью стимуляции срединного нерва, а при регистрации ССВП с нижних конечностей — на медиальной лодыжке с целью стимуляции большеберцового нерва. Ширина импульса стимуляции должна быть 0,2–0,3 мс, частота повторения — 2,79–4,79 Гц, сила — 25–30 мА для срединного нерва и 45–100 мА — для большеберцового нерва [15].

Перед хирургическим разрезом следует сделать базовую запись с целью сравнения и обеспечения оптимальной интенсивности стимуляции. Мониторинг ССВП следует выполнять непрерывно на протяжении всей операции. Критические периоды для мониторинга ССВП включают период перед разрезом, перед пережатием ВСА, после установки временного шунта (если шунтирование необходимо) и снятия зажима с ВСА [16]. Общими критериями для сигналов тревоги при использовании ССВП (N20/P30) являются снижение амплитуды на 50 % и более или возрастание латентности на 10 % и более от исходных значений [6, 9].

По данным метаанализа, проведенного E.L. Nwachuku и соавт., включившего ретроспективные и проспективные когортные исследования, чувствительность и специфичность ССВП при КЭЭ составили 58 и 91 % соответственно [17].

Регистрация ССВП охватывает только сенсорные пути, а остальная часть нервной системы не мониторируется. В исследовании P.D. Thirumala и соавт. максимальная чувствительность и специфичность нейромониторинга были получены при мультимодальном мониторинге с одновременным использованием ЭЭГ и ССВП и составили 50 и 93,95 % соответственно [18].

ТРАНСКРАНИАЛЬНЫЕ МОТОРНЫЕ ВЫЗВАННЫЕ ПОТЕНЦИАЛЫ

Транскраниальная электростимуляция — метод получения МВП при стимуляции моторной зоны коры головного мозга и двигательных проводников, включающих пирамидный тракт в целом, область внутренней капсулы.

В ходе операции регистрацию МВП проводят с целью оценки состояния кортикоспинального тракта, что необходимо для прогнозирования возможного появления неврологического дефицита в послеоперационном периоде [19]. При нарушении функции пирамидного тракта или моторной коры головного мозга вследствие ишемии снижается амплитуда МВП, что является предупреждающим сигналом для хирурга. В настоящее время критерием опасности при мониторинге МВП является падение амплитуды на 50 % и более от базовой линии [20].

Поскольку данная методика основана на регистрации суммарного потенциала действия мышц, интраоперационное введение миорелаксантов может исказить или блокировать МВП. Кроме того, суммарный потенциал действия мышц зависит и от возбудимости α -мотонейрона, которая может уменьшаться под воздействием анестетиков, что также влияет на качество получения ответа.

Недостатком метода также является то, что стимуляция глубинных структур не позволяет выявить ишемические изменения коры головного мозга. При проведении транскраниальной электростимуляции не регистрируются транзиторные ишемические изменения, которые могут привести к развитию ишемического инсульта и грубому неврологическому дефициту в послеоперационном периоде.

Некоторые авторы рекомендуют использовать метод транскраниальных МВП в дополнение к ССВП с целью повышения чувствительности нейромониторинга [21]. В многоцентровом ретроспективном обсервационном исследовании M.J. Malcharek и соавт. оценивали эффективность применения метода транскраниальных МВП в дополнение к регистрации ССВП во время КЭЭ. Согласно полученным результатам у 9 (1,5 %) пациентов выявлена церебральная гипоперфузия по данным транскраниальной стимуляции, в то время как по данным ССВП изменения сигналов не было. Авторы пришли к выводу, что комбинация методов мониторинга позволяет снизить вероятность возникновения ложноотрицательных результатов, тем самым улучшая послеоперационный исход [22].

По данным исследования Y.U. Vin и соавт., чувствительность и специфичность метода ССВП в выявлении возникновения интраоперационной ишемии головного мозга составили 79 и 92 % соответственно, при использовании только МВП — 86 и 89 %, а при совместном использовании 2 методов нейромониторинга — 79 и 99 %. Авторы пришли к выводу, что метод ССВП с высокой специфичностью прогнозирует возникновение церебральной ишемии, в то время как метод МВП обладает высокой чувствительностью. Комбинированный мониторинг позволяет повысить эффективность, восполнить недостатки изолированного мониторинга [23].

ЭЛЕКТРОЭНЦЕФАЛОГРАФИЯ

Электроэнцефалография определяет суммарную электрическую активность нейронов коры головного мозга и уже более 50 лет используется для выявления церебральной ишемии при операциях на сонных артериях [24]. В случае возникновения ишемии форма волны ЭЭГ изменяется в виде ипсилатерального замедления, затухания и даже потери сигнала. По данным некоторых исследований, чувствительность этого метода составляет 46–70 %, а специфичность — 84–96 % [25–27].

Регистрирующие электроды размещают на коже головы в соответствии с международной системой «10–20», при мультимодальном подходе с регистрацией ССВП используют минимум 8 каналов записи, а при изолированном применении ЭЭГ требуется минимум 16 каналов [10]. Параметры записи: фильтр низких частот — 0,3–1,0 Гц, фильтр высоких частот — 70 Гц, но не ниже 35 Гц без использования режекторного фильтра [10].

Запись исходной ЭЭГ должна быть сделана до разреза в области хирургического вмешательства и продолжена на протяжении всей операции для выявления изменений в церебральной перфузии. Количественный анализ результата ЭЭГ, получаемый с использованием сжатого массива спектра и цветного массива спектральной мощности, может обеспечить дополнительные преимущества для мониторинга с применением ЭЭГ, визуализации данных и обеспечения их более качественной интерпретации. Общие критерии тревоги — снижение амплитуды быстрых (альфа) волн ЭЭГ на 50 % или выраженное ипсилатеральное либо двустороннее изменение фоновой частоты (дельта) — могут указывать на церебральную ишемию [9, 29]. Также на ишемию могут указывать такие изменения при ЭЭГ, как увеличение частоты медленных волн (тета или дельта) более чем на 50 % [6].

Мониторинг с использованием ЭЭГ имеет преимущества прямой оценки электрической активности головного мозга и должен осуществляться непрерывно в ходе операции. Однако ЭЭГ отражает процессы только в коре головного мозга, не выявляет электрическую активность в более глубоких его структурах и может зависеть от предшествующих ишемических изменений головного мозга, что является недостатком данного метода. Кроме того, большие дозировки анестетиков подавляют электрическую активность коры головного мозга, что снижает диагностическую значимость ЭЭГ, поэтому следует особенно тщательно регулировать их дозировку. Поддержание стабильной центральной температуры тела и глубины анестезии является обязательным условием использования ЭЭГ для мониторинга церебральной ишемии во избежание возникновения артефактов в ходе мониторинга [28]. Сложность и зачатую субъективность интерпретации исходных данных также ограничивают широкое использование ЭЭГ в клинической практике.

ТРАНСКРАНИАЛЬНАЯ ДОППЛЕРОГРАФИЯ

Транскраниальная доплерография позволяет измерить скорость кровотока в крупных церебральных артериях, таких как средняя мозговая артерия, путем установки датчика с частотой 2 МГц в область акустического темпорального окна. Снижение линейной скорости кровотока в средней мозговой артерии предполагает уменьшение мозгового кровотока и церебральной перфузии. Тем не менее в различных

исследованиях были предложены разные пороговые значения (от 50 до 90 % от исходного) как признак значимой церебральной ишемии [30]. J. Guay и соавт. сообщают о чувствительности 81 % и специфичности 92 % при использовании ТКДГ для выявления церебральной ишемии при КЭЭ [25]. Однако по данным метаанализа R. Udesi и соавт., включившего 25 исследований с общей выборкой 4705 пациентов, чувствительность этого метода исследования составила 56,1 %, а специфичность — 72,7 % [31].

На долю эмболии приходится 80 % интраоперационных ишемических изменений, которые встречаются в 4 раза чаще у пациентов, перенесших инсульт, по сравнению с теми, у кого инсульта в анамнезе не было. В исследовании M. Skjelland и соавт. продемонстрирована способность ТКДГ обнаруживать сигнал от микроэмболов у пациентов при КЭЭ, что особенно важно, поскольку большинство периоперационных инсультов вызваны твердыми и газообразными микроэмболами [32]. В настоящее время ТКДГ является единственным методом нейромониторинга, способным непрерывно контролировать мозговой кровоток и выявлять микроэмболы [33].

Транскраниальную доплерографию также можно использовать для оценки физиологического состояния сосудистой системы путем измерения реакции кровотока на изменения артериального давления (церебральная ауторегуляция), изменения концентрации CO_2 в конце выдоха (церебральная вазореактивность) или мышечной активации сосудистой стенки (нейроваскулярная связь или функциональная гиперемия) [34, 35].

Появление переходных сигналов высокой интенсивности (high-intensity transient signal, HITS) свидетельствует о появлении микроэмболов в бассейне средней мозговой артерии. Наличие более 1 переходного сигнала высокой интенсивности в минуту может быть предиктором надвигающегося инсульта, о чем хирург должен быть оповещен незамедлительно [35]. Проведенные ранее исследования свидетельствуют о том, что выявление 10 и более эмболов по данным ТКДГ повышает риск возникновения пери- и послеоперационных церебральных осложнений, поэтому следует уведомить хирурга о данном событии в случае его возникновения [35]. Ограничениями данного метода являются сложность его использования у пациентов с анатомически узким акустическим окном и необходимость наличия опытного специалиста.

ЦЕРЕБРАЛЬНАЯ ОКСИМЕТРИЯ

Метод церебральной оксиметрии основан на спектроскопии в ближней инфракрасной области и позволяет измерять насыщение гемоглобина кислородом в артериальной, капиллярной и венозной крови (SctO_2). SctO_2 , исследуемое на ипсилатеральной поверхности лба, снижается, если пережатие сонной артерии при-

водит к снижению ипсилатеральной церебральной перфузии [36]. В многочисленных исследованиях было показано, что снижение SctO_2 коррелирует с изменениями показателей ЭЭГ, ТКДГ, МВП, ССВП и послеоперационным неврологическим дефицитом [37, 38]. В некоторых исследованиях продемонстрированы различные чувствительность (30–80 %) и специфичность (77–98 %) использования церебральной оксиметрии для выявления ишемии головного мозга у пациентов, оперированных с использованием РА и ОА [36, 38, 39], тогда как в других исследованиях показана надежность метода с высокой чувствительностью (100 %) и специфичностью (82–96 %) [36, 40]. Согласно данным проведенных ранее исследований снижение значения SctO_2 на 25 % и более от исходного уровня считается критическим и может свидетельствовать о возникновении церебральной ишемии [36, 40–42]. Церебральная оксиметрия обладает преимуществами неинвазивности, непрерывности и простоты интерпретации. Тем не менее данный метод нейромониторинга позволяет контролировать только конвекситальную поверхность лобной доли, не охватывая такие области, как теменная доля, которая, вероятно, наиболее подвержена ишемии в ходе КЭЭ. Искажение сигнала кожей головы — еще одно ограничение метода, однако новые алгоритмы церебральной оксиметрии способны свести к минимуму эту погрешность.

МУЛЬТИМОДАЛЬНЫЙ НЕЙРОМОНИТОРИНГ

Целью КЭЭ является удаление атеросклеротической бляшки для профилактики ишемического инсульта и улучшения кровоснабжения головного мозга. Однако существует повышенный риск интраоперационных и послеоперационных осложнений, возникающих в результате эмболии или изменений церебральной перфузии во время операций. В некоторых случаях возможно использование временного внутрипросветного шунта с целью поддержки церебральной перфузии во время пережатия ВСА [7, 10, 43]. Однако временное внутрипросветное шунтирование несет в себе риски, такие как возможная эмболия бляшки, расслоение сонной артерии, неадекватный шунтирующий поток или тромбоз шунта. Поэтому, согласно современным рекомендациям Европейского общества сосудистых хирургов, решение о постановке временного шунта остается на усмотрение оперирующего хирурга [44]. Настороженность также вызывают транзиторные ишемические атаки, которые составляют 87 % ишемических поражений головного мозга и могут эволюционировать в ишемический инсульт [35]. Крайне важно как можно раньше распознать изменения ишемического характера с помощью мультимодального нейромониторинга. Мультимодальный ИОНМ выявляет изменения церебральной перфузии и функции в режиме реального времени, что позволяет снизить риск ишемических осложнений и улучшить исход хирургического лечения [15].

При проведении вмешательства необходимо учитывать вариабельность ответа, метод анестезии, сопутствующие заболевания, скорость изменения ответа и хирургическое событие, которое произошло во время изменения ответа, что говорит о необходимости слаженной работы нейрохирурга, анестезиолога и нейрорезиолога.

Мультимодальный церебральный мониторинг обладает наибольшей чувствительностью и специфичностью в выявлении церебральной ишемии во время операции, позволяя проводить непрерывный мониторинг церебральной перфузии [10]. Прямая оценка нейрокогнитивной функции у бодрствующих пациентов обладает высокой чувствительностью и специфичностью в выявлении церебральной ишемии, однако ее положительное влияние на общий результат лечения еще не доказано [12]. Согласно действующим рекомендациям Европейского общества сосудистых хирургов выбор метода анестезии при КЭЭ остается на усмотрение оперирующего хирурга или анестезиолога и должен основываться на опыте врача, предпочтениях пациента и используемой антикоагулянтной терапии (класс IIa, уровень B) [44]. У пациентов, оперированных с использованием ОА, мониторинг церебральной ишемии во время операций на сонных артериях должен быть основан на методах, включающих ЭЭГ, регистрацию вызванных потенциалов, церебральную оксиметрию, ТКДГ [10, 15].

Из-за высокого риска церебральной ишемии непрерывный и надежный мониторинг имеет решающее

значение во время операций на сонных артериях. Мультимодальный подход превосходит мономодальный в качестве инструмента для раннего выявления и уменьшения риска интраоперационного и послеоперационного неврологического дефицита. Таким образом, мультимодальный подход при ИОНМ в хирургии стеноза и других манипуляций на сонных артериях обеспечивает надежные средства определения необходимости селективного шунтирования, оценки эффективности шунта и прогнозирования осложнений, которые могут привести к послеоперационному неврологическому дефициту.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Интраоперационные методы нейромониторинга, которые позволяют определять показатели церебральной перфузии и функции, такие как церебральная оксиметрия, регистрация ССВП, МВП, ЭЭГ и ТКДГ, важны для минимизации периоперационного риска неврологического дефицита, предупреждая о критическом снижении мозгового кровотока. Каждый метод имеет свои преимущества и недостатки при мониторинге церебральной ишемии во время операции и в настоящее время ни один из них не демонстрирует явного превосходства над другими. Таким образом, рекомендуется сочетание различных методов мониторинга с целью раннего выявления церебральной ишемии и прогнозирования периоперационного риска неврологического дефицита.

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Операции ревазуляризации головного мозга в сосудистой нейрохирургии. Под ред. В.В. Крылова, В.Л. Леменева. М.: БИНОМ, 2014. 272 с.
Brain revascularization operations in vascular neurosurgery. Ed. by V.V. Krylov, V.L. Lemenev. Moscow: BINOM, 2014. 272 p. (In Russ.).
2. Усачев Д.Ю., Лукшин В.А., Яковлев С.Б. и др. Двадцатилетний опыт хирургического лечения стенозирующей и окклюзирующей патологии брахиоцефальных артерий в ФГАУ «Национальный медицинский исследовательский центр нейрохирургии им. акад. Н.Н. Бурденко». Журнал «Вопросы нейрохирургии им. Н.Н. Бурденко» 2020;84(3):6–20. DOI: 10.17116/neiro2020840316
Usachev D.Yu., Lukshin V.A., Yakovlev S.B. et al. A 20-year experience in surgical treatment of steno-occlusive lesion of craniocervical arteries at the Burdenko Neurosurgical Center. Zhurnal Voprosy neyrokhirurgii im. N.N. Burdenko = Burdenko's Journal of Neurosurgery 2020;84(3):6–20. (In Russ., In Engl.). DOI: 10.17116/neiro2020840316
3. Saini V., Guada L., Yavagal D.R. Global epidemiology of stroke and access to acute ischemic stroke interventions. Neurology 2021;97(20 Suppl 2):S6–S16. DOI: 10.1212/WNL.00000000000012781
4. Bennett K.M., Scarborough J.E., Shortell C.K. Predictors of 30-day postoperative stroke or death after carotid endarterectomy using the 2012 carotid endarterectomy-targeted American College of Surgeons National Surgical Quality Improvement Program database. J Vasc Surg 2015;61(1):103–11. DOI: 10.1016/j.jvs.2014.05.100
5. Хайрутдинов А.И., Тарасов Ю.В., Валиуллин Д.Х. и др. Эффективность и безопасность каротидной эндартерэктомии в остром периоде ишемического инсульта. Медицинский совет 2021;(10):10–20. DOI: 10.21518/2079-701X-2021-10-10-20
Khayrutdinov A.I., Tarasov Y.V., Valiullin D.Kh. et al. Efficacy and safety of carotid endarterectomy in the acute phase of ischemic stroke. Meditsinskiy sovet = Medical Council 2021;(10):10–20. (In Russ.). DOI: 10.21518/2079-701X-2021-10-10-20
6. Huibers A., Calvet D., Kennedy F. et al. Mechanism of procedural stroke following carotid endarterectomy or carotid artery stenting within the International Carotid Stenting Study (ICSS) randomised trial. Eur J Vasc Endovasc Surg 2015;50(3):281–8. DOI: 10.1016/j.ejvs.2015.05.017
7. Sridharan N.D., Thirumala P., Chaer R. et al. Predictors of cross-clamp-induced intraoperative monitoring changes during carotid endarterectomy using both electroencephalography and somatosensory evoked potentials. J Vasc Surg 2018;67(1):191–8. DOI: 10.1016/j.jvs.2017.04.064

8. Хирургическое лечение стенозирующих поражений магистральных артерий головного мозга в условиях нейрохирургического стационара. Клинические рекомендации Ассоциации нейрохирургов России. Под ред. Д.Ю. Усачева, В.А. Лукшина, С.Б. Яковлева и др. М., 2014.
Surgical treatment of stenosing lesions of the main arteries of the brain in a neurosurgical hospital. Clinical recommendations of the Association of Neurosurgeons of Russia. Ed. by D.Y. Usachev, V.A. Lukshin, S.B. Yakovlev et al. Moscow, 2014. (In Russ.).
9. Pescador A.M., Lorensu P.J., González Á.S. et al. Anaesthesia and multimodality intraoperative neuromonitoring in carotid endarterectomy. Chronological evolution and effects on intraoperative neurophysiology. *J Clin Monit Comput* 2021;35(6):1429–36. DOI: 10.1007/s10877-020-00621-9
10. Isley M.R., Edmonds H.L. Jr., Stecker M. Guidelines for intraoperative neuromonitoring using raw (analog or digital waveforms) and quantitative electroencephalography: a position statement by the American Society of Neurophysiological Monitoring. *J Clin Monit Comput* 2009;23(6):369–90. DOI: 10.1007/s10877-009-9191-y
11. Ali A.M., Green D., Zayed H. et al. Cerebral monitoring in patients undergoing carotid endarterectomy using a triple assessment technique. *Interact Cardiovasc Thorac Surg* 2011;12(3):454–7. DOI: 10.1510/icvts.2010.235598
12. GALA Trial Collaborative Group, Lewis S.C., Warlow C.P., Bodenham A.R. et al. General anaesthesia *versus* local anaesthesia for carotid surgery (GALA): a multicentre, randomised controlled trial. *Lancet* 2008;372(9656):2132–42. DOI: 10.1016/S0140-6736(08)61699-2
13. Симонов О.В., Прямыков А.Д., Лолуев Р.Ю. и др. Регионарная анестезия при каротидной эндартерэктомии у пациентов в остром периоде ишемического инсульта (пилотное исследование). *Общая реаниматология* 2022;18(6):4–11. DOI: 10.15360/1813-9779-2022-6-4-11
Simonov O.V., Pryamikov A.D., Loluev R.Yu. et al. Regional anesthesia for carotid endarterectomy in patients with acute ischemic stroke (pilot study). *Obshchaya reanimatologiya = General Reanimatology* 2022;18(6):4–11. (In Russ., In Engl.). DOI: 10.15360/1813-9779-2022-6-4-11
14. Spielberger L., Turndorf H., Culliford A., Imparato A. Hand-held toy squeaker during carotid endarterectomy in the awake patient. *Arch Surg*. 1979;114(1):103–4. DOI: 10.1001/archsurg.1979.01370250105023
15. Jahangiri F.R., Liang M., Huckabey M. et al. Carotid endarterectomy surgeries: a multimodality intraoperative neurophysiological monitoring approach. *Cureus* 2022;14(7):e26556. DOI: 10.7759/cureus.26556
16. Müller M.D., Seidel K., Peschi G. et al. Arterial collateral anatomy predicts the risk for intra-operative changes in somatosensory evoked potentials in patients undergoing carotid endarterectomy: a prospective cohort study. *Acta Neurochir (Wien)* 2021;163(6):1799–805. DOI: 10.1007/s00701-020-04624-y
17. Nwachuku E.L., Balzer J.R., Yabes J.G. et al. Diagnostic value of somatosensory evoked potential changes during carotid endarterectomy: a systematic review and meta-analysis. *JAMA Neurol* 2015;72(1):73–80. DOI: 10.1001/jamaneurol.2014.3071
18. Thirumala P.D., Natarajan P., Thiagarajan K. et al. Diagnostic accuracy of somatosensory evoked potential and electroencephalography during carotid endarterectomy. *Neurol Res* 2016;38(8):698–705. DOI: 10.1080/01616412.2016.1200707
19. Яковлева Д.В., Канышина Д.С., Подгурская М.Г. и др. Прогностическая значимость моторных вызванных потенциалов при оперативных вмешательствах по поводу устранения спинального стеноза на цервикальном уровне. *Нервно-мышечные болезни* 2020;10(3):42–8. DOI: 10.17650/2222-8721-2020-10-3-42-48
Yakovleva D.V., Kanshina D.S., Podgurskaya M.G. et al. Prognostic significance of motor evoked potentials in surgical interventions to eliminate spinal stenosis at the cervical level. *Nervno-myshechnye bolezni = Neuromuscular Diseases* 2020;10(3):42–8. (In Russ.). DOI: 10.17650/2222-8721-2020-10-3-42-48
20. Malcharek M.J., Hesse J., Hesselbarth K. et al. Warning criteria for MEP monitoring during carotid endarterectomy: a retrospective study of 571 patients. *J Clin Monit Comput* 2019;34(3):589–95. DOI: 10.1007/s10877-019-00345-5
21. Marinò V., Aloj F., Vargas M. et al. Intraoperative neurological monitoring with evoked potentials during carotid endarterectomy versus cooperative patients under general anesthesia technique: a retrospective study. *J Neurosurg Anesthesiol* 2018;30(3):258–64. DOI: 10.1097/ANA.0000000000000430
22. Malcharek M.J., Kulpok A., Deletis V. et al. Intraoperative multimodal evoked potential monitoring during carotid endarterectomy: a retrospective study of 264 patients. *Anesth Analg* 2015;120(6):1352–60. DOI: 10.1213/ANE.0000000000000337
23. Bin Y.U., Yunzhen W.A.N.G., Ruquan H.A.N. Somatosensory evoked potential and motor evoked potential in detecting the occurrence of intraoperative cerebral ischemia in patients undergoing carotid endarterectomy. *J Clin Anesthesiol* 2017;12(12):434–7.
24. Jordan K.G. Emergency EEG and continuous EEG monitoring in acute ischemic stroke. *J Clin Neurophysiol* 2004;21(5):341–52.
25. Guay J., Kopp S. Cerebral monitors *versus* regional anesthesia to detect cerebral ischemia in patients undergoing carotid endarterectomy: a meta-analysis. *Can J Anaesth* 2013;60(3):266–79. DOI: 10.1007/s12630-012-9876-4
26. Thirumala P.D., Thiagarajan K., Gedela S. et al. Diagnostic accuracy of EEG changes during carotid endarterectomy in predicting perioperative strokes. *J Clin Neurosci* 2016;25:1–9. DOI: 10.1016/j.jocn.2015.08.014
27. Chang R., Reddy R.P., Sudadi S. et al. Diagnostic accuracy of various EEG changes during carotid endarterectomy to detect 30-day perioperative stroke: a systematic review. *Clin Neurophysiol* 2020;131(7):1508–16. DOI: 10.1016/j.clinph.2020.03.037
28. Sloan T.B. Anesthetic effects on electrophysiologic recordings. *J Clin Neurophysiol* 1998;15(3):217–26. DOI: 10.1097/00004691-199805000-00005
29. Michels D.M., Van Dijk L.C., Tavy D.L.J. Perioperative stroke during carotid endarterectomy: benefits of multimodal neuromonitoring – a case report. *BMC Neurol* 2022;22(1):325. DOI: 10.1186/s12883-022-02835-7
30. McCarthy R.J., McCabe A.E., Walker R., Horrocks M. The value of transcranial Doppler in predicting cerebral ischaemia during carotid endarterectomy. *Eur J Vasc Endovasc Surg* 2001;21(5):408–12. DOI: 10.1053/ejvs.2001.1341
31. Udesch R., Natarajan P., Thiagarajan K. et al. Transcranial Doppler monitoring in carotid endarterectomy: a systematic review and meta-analysis. *J Ultrasound Med* 2017;36(3):621–30. DOI: 10.7863/ultra.16.02077
32. Skjelland M., Krohg-Sørensen K., Tennøe B. et al. Cerebral microemboli and brain injury during carotid artery endarterectomy and stenting. *Stroke* 2009;40(1):230–4. DOI: 10.1161/STROKEAHA.107.513341
33. Moppett I.K., Mahajan R.P. Transcranial Doppler ultrasonography in anaesthesia and intensive care. *Br J Anaesth* 2004;93(5):710–24. DOI: 10.1093/bja/ae205
34. Howell S.J. Carotid endarterectomy. *Br J Anaesth* 2007;99(1):119–31. DOI: 10.1093/bja/aem137
35. Razumovsky A.Y., Jahangiri F.R., Balzer J., Alexandrov A.V. ASN and ASN joint guidelines for transcranial Doppler ultrasonic monitoring: an update. *J Neuroimaging* 2022;32(5):781–97. DOI: 10.1111/jon.13013
36. Pedrini L., Magnoni F., Sensi L. et al. Is near-infrared spectroscopy a reliable method to evaluate clamping ischemia during carotid surgery? *Stroke Res Treat* 2012;2012:156975. DOI: 10.1155/2012/156975
37. Shang Y., Cheng R., Dong L. et al. Cerebral monitoring during carotid endarterectomy using near-infrared diffuse optical spectroscopies and electroencephalogram. *Phys Med Biol* 2011;56(10):3015–32. DOI: 10.1088/0031-9155/56/10/008

38. Giustiniano E., Alfano A., Battistini G.M. et al. Cerebral oximetry during carotid clamping: is blood pressure raising necessary? *J Cardiovasc Med (Hagerstown)* 2010;11(7):522–8. DOI: 10.2459/jcm.0b013e32833246e7
39. Mille T., Tachimiri M.E., Klersy C. et al. Near infrared spectroscopy monitoring during carotid endarterectomy: which threshold value is critical? *Eur J Vasc Endovasc Surg* 2004;27(6):646–50. DOI: 10.1016/j.ejvs.2004.02.012
40. Ritter J.C., Green D., Slim H. et al. The role of cerebral oximetry in combination with awake testing in patients undergoing carotid endarterectomy under local anaesthesia. *Eur J Vasc Endovasc Surg* 2011;41(5):599–605. DOI: 10.1016/j.ejvs.2010.12.009
41. Гавриленко А.В., Караваев Б.И., Бондаренко А.В. и др. Оценка адекватности каротидной эндартерэктомии методом церебральной оксиметрии. Бюллетень НЦССХ им. А.Н. Бакулева РАМН. Сердечно-сосудистые заболевания 2002;3(2):6–9. Gavrilenko A.V., Karavaev B.I., Bondarenko A.V. et al. Assessment of the adequacy of carotid endarterectomy by cerebral oximetry. *Bulleten NTSSKh im. A.N. Bakuleva RAMN. Serdechno-sosudistyie zabolevaniya = the Bulletin of Bakoulev Center. Cardiovascular Diseases* 2002;3(2):6–9. (In Russ.).
42. Гавриленко А.В., Караваев Б.И., Бондаренко А.В., Скрылев С.И. Церебральная оксиметрия и каротидная эндартерэктомия: контроль уровня оксигенации головного мозга в период оперативного вмешательства и оценка его эффективности. *Ангиология и сосудистая хирургия* 2002;8(1):67–71. Gavrilenko A.V., Karavaev B.I., Bondarenko A.V., Skrylev S.I. Cerebral oximetry and carotid endarterectomy: monitoring the level of brain oxygenation during surgery and evaluating of its effectiveness. *Angiologiya i sosudistaya khirurgiya = Angiology and Vascular Surgery* 2002;8(1):67–71. (In Russ.).
43. Гавриленко А.В., Куклин А.В., Скрылев С.И., Агафонов И.Н. Показания для использования внутрипросветного временного шунта при операциях на сонных артериях. *Ангиология и сосудистая хирургия* 2007;13(4):105–12. Gavrilenko A.V., Kuklin A.V., Skrylev S.I., Agafonov I.N. Indications for the use of an intraluminal temporary shunt during operations on carotid arteries. *Angiologiya i sosudistaya khirurgiya = Angiology and Vascular Surgery* 2007;13(4):105–12. (In Russ.).
44. Naylor R., Rantner B., Ancetti S. et al. Editor's choice – European Society for Vascular Surgery (ESVS) 2023 Clinical Practice Guidelines on the management of atherosclerotic carotid and vertebral artery disease. *Eur J Vasc Endovasc Surg* DOI: 10.1016/j.ejvs.2022.04.011

Вклад авторов

В.А. Лукьянчиков, С.М. Чупаленков: сбор и анализ данных, обзор литературы по теме статьи, написание текста статьи.

Authors' contributions

V.A. Lukyanchikov, S.M. Chupalnikov: data collection and analysis, a review of the literature on the topic of the article, article writing.

ORCID авторов / ORCID of authors

В.А. Лукьянчиков / V.A. Lukyanchikov: <https://orcid.org/0000-0003-4518-9874>

С.М. Чупаленков / S.M. Chupalnikov: <https://orcid.org/0000-0001-5994-3124>

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.