

МЕТОДИКА ИНТРАОПЕРАЦИОННОГО МОНИТОРИРОВАНИЯ ЦЕЛОСТНОСТИ КОРТИКОСПИНАЛЬНОГО ТРАКТА ПРИ ПОМОЩИ ЭЛЕКТРОДА С ДИНАМИЧЕСКИМ БАЛЛОНОМ

В.В. Крылов¹⁻³, В.А. Лукьянчиков¹⁻³, В.А. Горожанин⁴, З.А. Барбакадзе³, М.В. Синкин³

¹Кафедра фундаментальной нейрохирургии факультета дополнительного профессионального образования ФГАОУ ВО «Российский национальный исследовательский медицинский университет им. Н.И. Пирогова»; Россия, 129010 Москва, Большая Сухаревская пл., 3;

²ФГБНУ «Научный центр неврологии»; Россия, 125367 Москва, Волоколамское шоссе, 80;

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

⁴Медицинский центр «УНИКЛИНИК»; Россия, 127543 Москва, ул. Мурановская, 5

Контакты: Вадим Александрович Горожанин vadikgor_27@mail.ru

Цель работы – представить методику непрерывного мониторинга целостности кортикоспинального тракта при помощи электрода с динамическим баллоном, выявить достоинства и недостатки выбранного и альтернативных вариантов мониторинга.

Материалы и методы. На 1-м этапе был подготовлен электрод, совмещенный с динамическим баллоном. На 2-м этапе проведено непрерывное мониторирование кортикоспинального тракта путем прямой стимуляции коры с использованием грид-баллона во время выполнения основного этапа церебральной операции. На 3-м этапе проведена интерпретация полученных нейрофизиологических ответов.

Результаты. Представленная методика непрерывного мониторинга целостности кортикоспинального тракта путем прямой стимуляции коры с применением разработанного устройства предотвращает ложное снижение амплитуды ответов, что значительно облегчает интерпретацию полученных результатов и повышает информативность метода. Описанная методика основана на клинических наблюдениях удаления внутримозговой опухоли, а также микрохирургического клипирования аневризмы с применением данной методики. Во время операции ложного снижения амплитуды нейрофизиологического сигнала отмечено не было, что было достигнуто за счет динамического раздувания баллона и поддержания плотного прилегания электрода к поверхности мозга. Операция, выполненная с использованием представленной методики, позволила достичь благоприятного неврологического исхода у пациента в послеоперационном периоде.

Заключение. Представленное устройство позволяет проводить непрерывный нейромониторинг с помощью метода прямой электростимуляции коры электродом-полоской при любой степени западения мозга. Методика снижает риск первичной или вторичной травматизации кортикоспинального и кортикобульбарного трактов, что повышает безопасность нейрохирургического вмешательства и снижает риски неврологических осложнений.

Ключевые слова: метод моторных вызванных потенциалов, прямая стимуляция коры, нейрофизиологический мониторинг, целостность кортикоспинального тракта, электрод-полоска

Для цитирования: Крылов В.В., Лукьянчиков В.А., Горожанин В.А. и др. Методика интраоперационного мониторинга целостности кортикоспинального тракта при помощи электрода с динамическим баллоном. Нейрохирургия 2023;25(4):96–103. DOI: <https://doi.org/10.17650/1683-3295-2023-25-4-96-103>

Technique for intraoperative monitoring of corticospinal tract integrity using an electrode with a dynamic balloon

V.V. Krylov¹⁻³, V.A. Lukianchikov¹⁻³, V.A. Gorozhanin⁴, Z.A. Barbakadze³, M.V. Sinkin³

¹Department of Fundamental Neurosurgery of the Faculty of Additional Professional Education, N.I. Pirogov Russian National Research Medical University; 3 Bolshaya Sukharevskaya Sq., Moscow 129010, Russia;

²Research Center of Neurology; 80, Volokolamskoye Shosse, Moscow 125367, Russia;

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

⁴Medical Center “UNIKLINIK”; 5 Muranovskaya St., Moscow 127543, Russia

Contacts: Vadim Aleksandrovich Gorozhanin vadikgor_27@mail.ru

Aim. To present a technique for continuous monitoring of corticospinal tract integrity using an electrode with a dynamic balloon, examine the advantages and disadvantages of the selected and alternative monitoring techniques.

Materials and methods. At the 1st stage, an electrode combined with a dynamic balloon was prepared. At the 2nd stage, continuous monitoring of the corticospinal tract using direct stimulation of the cortex using balloon grid during the main stage of cerebral surgery was performed. At the 3rd stage, interpretation of the obtained neurophysiological responses was performed.

Results. The presented technique of continuous monitoring of the integrity of the corticospinal tract through direct cortical stimulation using the developed device prevents false response decreases which significantly helps with the interpretation of the obtained results and increases information value of the technique. The described technique is based on the presented clinical observations of intracerebral tumor resection, as well as microsurgical aneurysm clipping using the technique. During surgery, no false decrease of the neurophysiological signal amplitude was observed due to dynamic balloon inflation and maintenance of close contact between the electrode and the surface of the brain. A surgery performed using this technique allowed to achieve a favorable neurological outcome in a patient in the postoperative period.

Conclusion. The presented device allows to perform continuous neuromonitoring using direct cortical electrostimulation with a strip electrode at any level of brain retraction. The technique decreases the risk of primary and secondary injury of the corticospinal and corticobulbar tracts which increases safety of neurosurgical intervention and decreases risks of neurological complications.

Keywords: motor evoked potentials, direct cortical stimulation, neurophysiological monitoring, corticospinal tract integrity, strip electrode

For citation: Krylov V.V., Lukianchikov V.A., Gorozhanin V.A. et al. Technique for intraoperative monitoring of corticospinal tract integrity using an electrode with a dynamic balloon. *Neyrokhirurgiya = Russian Journal of Neurosurgery* 2023;25(4):96–103. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.17650/1683-1683-3295-2023-25-4-96-103>

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время проведение нейрофизиологического мониторинга является неотъемлемой частью современных церебральных операций с высоким риском повреждения пирамидных трактов или моторной коры. Для контроля функционального состояния первичной двигательной коры головного мозга и проводящих путей кортикоспинального тракта используется метод моторных вызванных потенциалов (МВП). Данный метод проводится путем стимуляции первичной моторной коры головного мозга с одномоментной регистрацией потенциала действия, возникающего при сокращении мышц противоположных конечностей. Это позволяет выявить как прямую хирургическую травму проводящих путей (кортиспинального тракта), так и ишемические нарушения данной зоны вследствие нарушения проходимости «функционального» сосуда. Среди различных способов данного метода прямая электростимуляция коры (ПСК-МВП) зарекомендовала себя как наиболее эффективная, особенно при осуществлении путем стимуляции прецентральной извилины электродом-полоской (стрип-ПСК) (от англ. strip – тонкая полоска ткани, бумаги), для длительного интраоперационного мониторинга. Одним из недостатков метода стрип-ПСК, влияющим на его достоверность, является нарушение плотного прилегания электродов к коре головного мозга, а также миграция электродов. Это происходит в результате западения мозга во время операции (“brain shift”), что приводит к увеличению расстояния между корой головного мозга и твердой мозговой оболочкой

(ТМО), а также при механическом смещении электрода во время манипуляции в операционной ране. Уменьшение плотности контакта между электродом и корой головного мозга, а также его миграция приводят к уменьшению количества электроэнергии, возбуждающей мотонейроны двигательной коры, снижая интенсивность нервных импульсов, нисходящих по кортикоспинальному тракту, что становится причиной получения ложных результатов, связанных с падением амплитуды МВП.

Нами предложены способ и устройство для интраоперационного мониторинга целостности кортикоспинального тракта с помощью гибкой электрод-полоски в сочетании с динамическим баллоном. Данное устройство обеспечивает достаточную фиксацию электрода-полоски в заданной области и, как следствие, получение устойчивого сигнала для электрической стимуляции коры головного мозга. Данная методика была апробирована интраоперационно и показала свою эффективность во время хирургического лечения пациентов с онкологическими и сосудистыми заболеваниями головного мозга.

Цель работы – представить методику непрерывного мониторинга целостности кортикоспинального тракта при помощи электрода с динамическим баллоном, выявить достоинства и недостатки выбранного и альтернативных вариантов мониторинга.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Методика операции. Способ операции с использованием предложенного устройства состоит из следующих

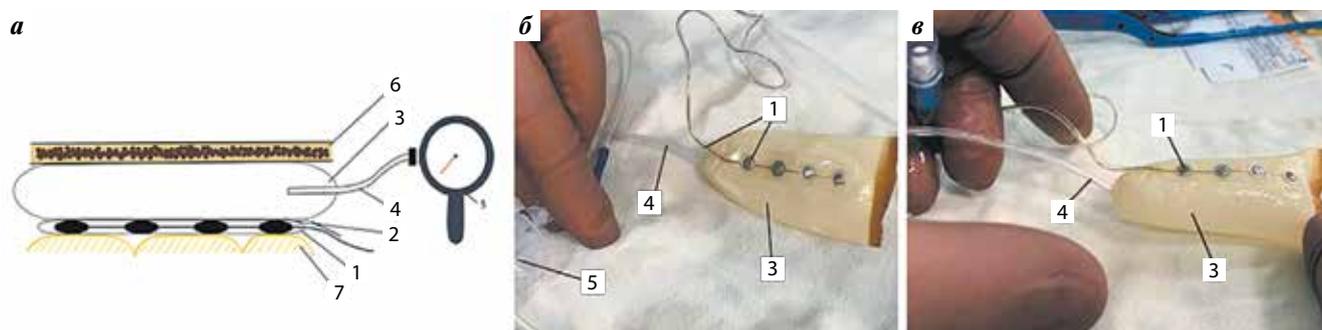


Рис. 1. Подготовка к использованию предложенного устройства: а – схема интраоперационного мониторинга; б, в – интраоперационные фотографии подготовки устройства. 1 – электрод-полоска, 2 – адгезивная композиция, 3 – баллон, 4 – катетер, 5 – устройство для нагнетания воздуха с манометром, 6 – костный дефект, 7 – кора головного мозга

Fig. 1. Preparation for using the proposed device: а – diagram of intraoperative monitoring; б, в – interoperative photos of device preparation. 1 – strip electrode, 2 – adhesive composition, 3 – balloon, 4 – catheter, 5 – blower device with a manometer, 6 – bone defect, 7 – cerebral cortex

этапов: подготовка устройства перед операцией и приведение его в рабочее состояние, выполнение краниотомии, установка электрода в область первичной моторной коры, проверка сигнала, проведение операции с одновременной стимуляцией и сравнительный анализ результатов стимуляции на разных этапах вмешательства.

Вначале проводят подготовку устройства: соединяют свободный конец катетера для подачи воздуха с манометром, проверяют герметичность баллона путем его пробного наполнения, подсоединяют электрод к нейрофизиологической установке с проверкой работы всех электродов (рис. 1).

На 2-м этапе после выполнения краниотомии вскрывают ТМО и электрод-полоску с баллоном (баллон-электрод) заводят под край костного дефекта так, чтобы она находилась в проекции двигательной коры головного мозга. Обеспечивается плотное прилегание электрод-полоски к мозгу, после чего выполняют визуальный контроль ее положения. В случае отсутствия контакта электрод-полоски по всей ее поверхности с ТМО осуществляют подачу воздуха в баллон для обеспечения такого контакта с регистрацией значения давления в баллоне (которое считают оптимальным). В случае плотного прилегания электрод-полоски к ТМО подачу воздуха в баллон не проводят. После достижения плотного прилегания электродов электрод-полоски к мозгу осуществляют подачу контрольного сигнала с регистрацией амплитуды ответного сигнала (A_{\max}). Далее проводят операцию под нейрофизиологическим контролем, в процессе которой по мере западения мозга постепенно надувают баллон с обеспечением плотного прилегания электродов устройства к коре головного мозга при контроле значения амплитуды ответного сигнала (A) с обеспечением условия $A \leq A_{\max}$. Если в процессе выполнения операции наблюдают существенное снижение амплитуды сигнала A по сравнению с A_{\max} (более чем на 15 % от значения A_{\max}), проводят визуальный контроль

наличия контакта электрод-полоски по всей ее поверхности с ТМО, при выявлении отсутствия такого контакта осуществляют подачу воздуха в баллон с возможным превышением величины давления в баллоне для его фиксации относительно оптимального давления, но не более чем на 10 см вод. ст. При этом характерным признаком устранения ложного снижения амплитуды (в результате неплотного прилегания электрод-полоски к коре мозга) является увеличение значения амплитуды при нагнетании воздуха в баллон. В случае выявления динамики, при которой при увеличении давления в баллоне увеличения амплитуды сигнала не происходит, делают вывод о возможном нарушении целостности кортикоспинального тракта.

Оптимальным давлением в баллоне является давление, при котором получают максимальную амплитуду сигнала, измеренную при стимуляции коры головного мозга в процессе контроля положения электрода перед выполнением основного этапа операции. Проведенные исследования показали, что в большинстве случаев при раздувании баллона после установки баллон-электрода в субдуральном пространстве до давления 17–23 см вод. ст. обеспечивается максимальный контакт электродов с корой головного мозга по мере западения мозга, что позволяет восстановить показатели амплитуды ответа до уровня базового показателя МВП – «максимальной» амплитуды сигнала (A_{\max}) – без риска компрессионного нарушения кровоснабжения в области контакта электродов с корой головного мозга (рис. 2–5). Таким образом, по мере западения мозга в процессе хирургического вмешательства постепенно надувают баллон, поддерживая постоянное оптимальное давление с обеспечением плотного прилегания электродов устройства к коре головного мозга. При выполнении основного этапа операции возможно увеличение давления в баллоне по сравнению с давлением, характерным для контролируемой максимальной

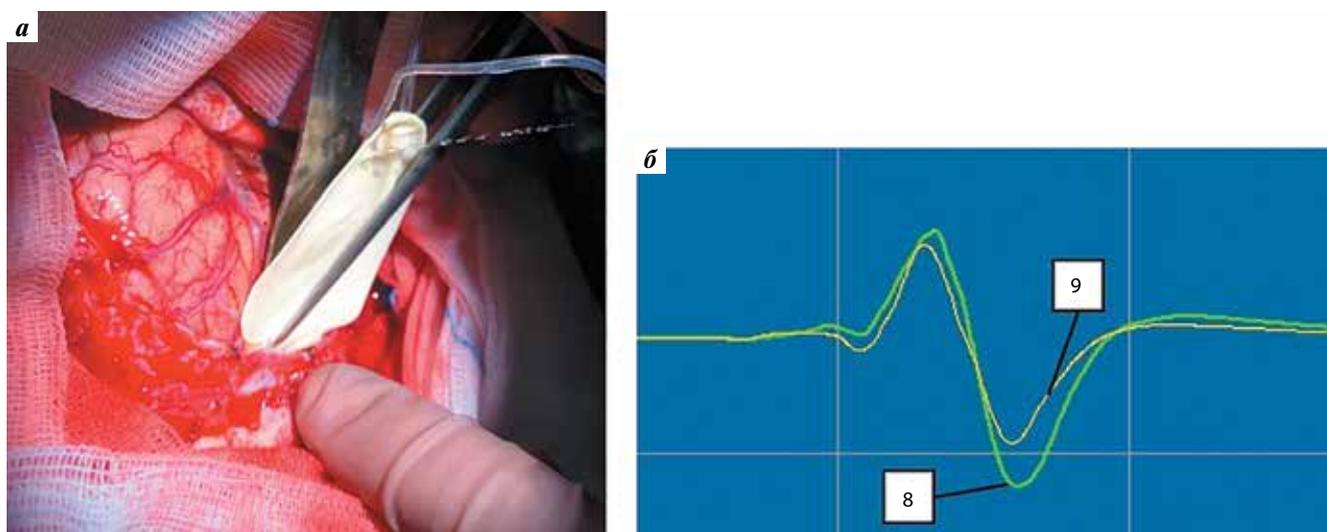


Рис. 2. Интраоперационные фотографии установки устройства и процесса мониторинга после вскрытия твердой мозговой оболочки: а – процесс установки электрода-полоски с динамическим баллоном в субдуральное пространство по шпателью; б – моторные вызванные потенциалы (МВП) от *m. abductor pollicis brevis* на мониторе нейрофизиологической установки после установки электрода-полоски с динамическим баллоном: 8 – кривая, отражающая базовую линию МВП; 9 – кривая, отражающая текущее значение МВП

Fig. 2. Intraoperative photos of device installation and monitoring process after dissection of the dura mater: а – installation of the strip electrode with a dynamic balloon into the subdural space using a spatula; б – motor evoked potentials (MEP) from *m. abductor pollicis brevis* on the monitor of the neurophysiological system after installation of the strip electrode with a dynamic balloon; 8 – curve reflecting baseline MEP value; 9 – curve reflecting current MEP value

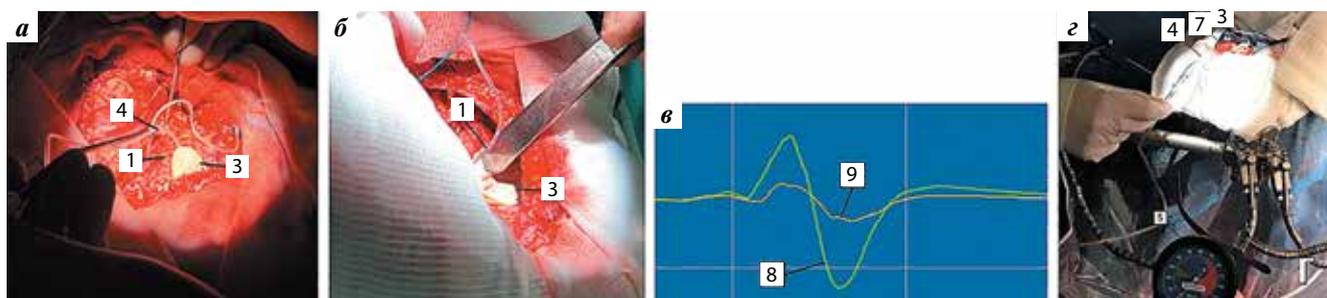


Рис. 3. Интраоперационные фотографии устройства и процесса мониторинга в момент и после внутренней декомпрессии мозга: а – процесс внутренней декомпрессии мозга – пункционное дренирование внутримозговой кисты. Электрод-полоска с динамическим баллоном установлена в область прецентральной извилины; б – западение мозга после удаления опухоли и дренирования кисты. Расстояние между корой головного мозга и твердой мозговой оболочкой около 1,5 см. Электрод-полоска с динамическим баллоном в сдутом состоянии; в – моторные вызванные потенциалы (МВП), полученные от *m. abductor pollicis brevis* на мониторе нейрофизиологической установки. Отмечается ложноположительное снижение амплитуды МВП (9) в результате неплотного прилегания электрода-полоски с динамическим баллоном к коре головного мозга по сравнению с базовой линией (8); г – измерение давления в баллоне манометром. Баллон в сдутом состоянии, давление в манометре 0 см вод. ст. 1 – электрод-полоска; 3 – баллон; 4 – катетер; 5 – устройство для нагнетания воздуха с манометром; 6 – костный дефект; 7 – кора головного мозга

Fig. 3. Intraoperative photos of the device and monitoring process at the moment of internal brain decompression and after it: а – process of internal brain decompression – puncture draining of the intracerebral cyst. The strip electrode with a dynamic balloon is installed near the precentral gyrus; б – brain retraction after tumor resection and cyst draining. The distance between cerebral cortex and dura mater is about 1.5 cm. The strip electrode with a dynamic balloon in the deflated state; в – motor evoked potentials (MEP) from *m. abductor pollicis brevis* on the monitor of the neurophysiological system. False positive MEP amplitude decrease is observed (9) due to a gap between the strip electrode with a dynamic balloon and the cerebral cortex compared to the baseline (8); г – measurement of pressure in the balloon using a manometer. Inflated balloon, pressure in the manometer 0 cm H₂O. 1 – strip electrode; 3 – balloon; 4 – catheter; 5 – blower device with a manometer; 6 – bone defect; 7 – cerebral cortex

амплитуды ответного сигнала, но не более чем на 10 см вод. ст. Раздувание баллона происходит по его продольной оси, за счет чего увеличивается площадь его контакта с ТМО и корой головного мозга (см. рис. 5, а, б). Поскольку баллон выполнен из эластичного материала, при надувании он повторяет все неровности внутренней поверхности кости черепа (см. рис. 5, в).

Динамическое поддержание стабильного давления в баллоне позволяет избежать смещения электрода с моторной коры и получения ложных результатов мониторинга.

После окончания основного этапа операции эвакуируют воздух из баллона и устройство удаляют.

Приводим клиническое наблюдение, демонстрирующее применение описанной методики.

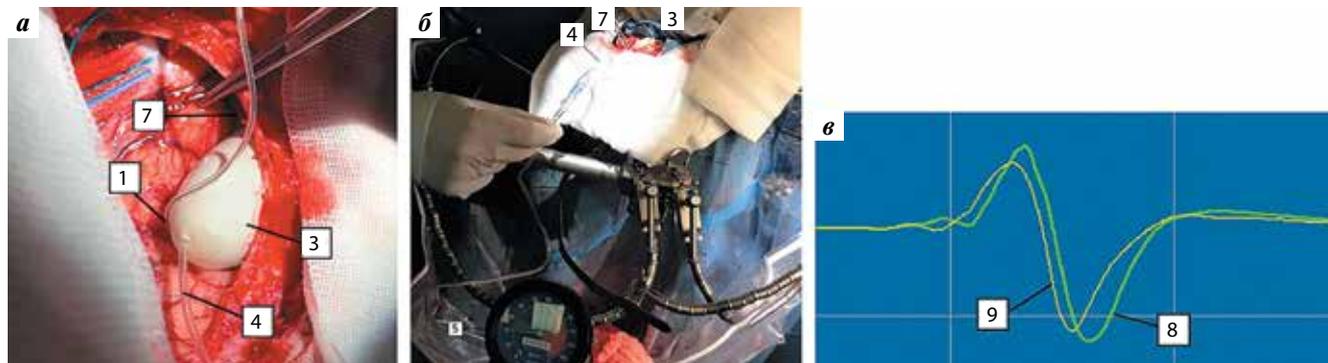


Рис. 4. Интраоперационные фотографии устройства после раздувания баллона и процесса мониторинга: а – электрод с динамическим баллоном в раздутом состоянии; б – измерение давления манометром в баллоне. Баллон в раздутом состоянии, давление в манометре 20 см вод. ст.; в – увеличение амплитуды ответов с ноги и руки на мониторе нейрофизиологической установки после раздувания баллона. Кривая 9, отражающая значения моторных вызванных потенциалов, и кривая 8, отражающая их изначальные значения, совпадают. 1 – электрод-полоска; 3 – баллон; 4 – катетер; 5 – устройство для нагнетания воздуха с манометром; 7 – кора головного мозга

Fig. 4. Intraoperative photos of the device after balloon inflation and monitoring process: а – strip electrode with a dynamic balloon in the inflated state; б – measurement of pressure in the balloon using a manometer. Inflated balloon, pressure in the manometer 20 cmH₂O; в – increased response amplitude from an arm and a leg on the monitor of the neurophysiological system after balloon inflation. Curve 9 reflecting current values of the motor evoked potentials and curve 8 reflecting their baseline values are the same. 1 – strip electrode; 3 – balloon; 4 – catheter; 5 – blower device with a manometer; 7 – cerebral cortex

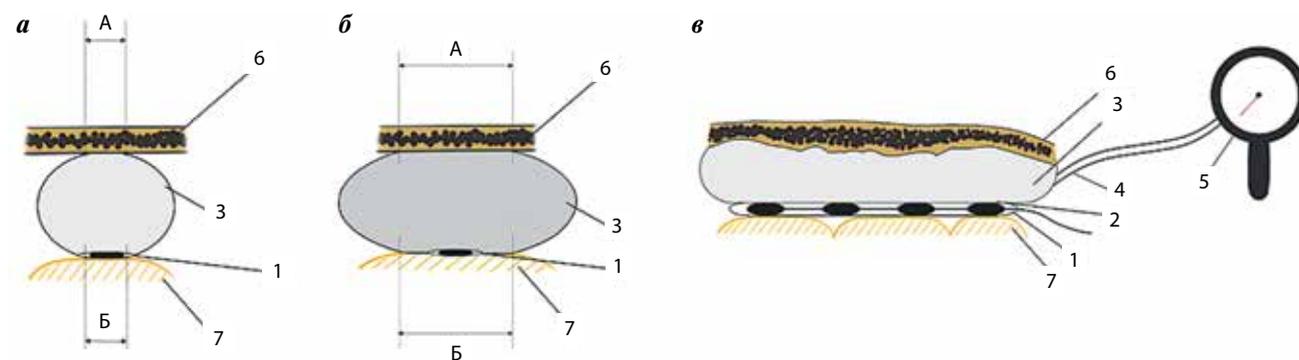


Рис. 5. Схема интраоперационного мониторинга с помощью электрода с динамическим баллоном: а – баллон в рабочем состоянии после получения «максимальной» амплитуды ответа (фронтальный срез); б – баллон в рабочем состоянии после достижения оптимального давления и фиксации устройства (фронтальный срез); в – в рабочем состоянии баллон демонстрирует способность заполнять пространство согласно неровностям внутренней кортикальной пластинки кости. Расстояние А показывает площадь соприкосновения баллона с твердой мозговой оболочкой; расстояние Б показывает площадь соприкосновения баллона с головным мозгом. По сравнению с рис. а на рис. б расстояния А и Б больше, соответственно, пятно контакта и фиксация устройства выше

Fig. 5. Diagram of intraoperative monitoring using the electrode with a dynamic balloon: а – balloon in the working state after receiving “maximal” response amplitude (frontal section); б – balloon in the working state after optimal pressure and device fixation were achieved (frontal section); в – in the working state the balloon demonstrates its ability to fill the space following the irregularities of the internal cortical plate of the bone. Distance A shows the area of balloon contact with the dura mater; distance Б shows the area of balloon contact with the brain. Compared to Fig. а, on Fig. б the distances A and Б are larger, therefore contact patch is larger and fixation of the device is better

КЛИНИЧЕСКОЕ НАБЛЮДЕНИЕ

Пациентка Р., 62 лет, поступила в нейрохирургическое отделение с картиной общемозговой симптоматики, эпизодами подъемов артериального давления до 180 мм рт. ст. По данным компьютерной томографической ангиографии была выявлена аневризма бифуркации левой средней мозговой артерии (рис. 6). Пациентка подготовлена по стандартной методике к операции – микрохирургическое клипирование аневризмы с нейрофизиологическим мониторингом. Во время операции западение мозга отмечалось за счет дренирования ликвора после вскрытия базальных цистерн. Проведенное мониторирование МВП с коры при помощи заявляемого

устройства обеспечило надежную фиксацию электрода, что позволило достичь устойчивого нейрофизиологического сигнала на протяжении основного этапа операции и избежать ложного изменения амплитуды. Исключение данного феномена помогло при дифференциальной диагностике истинного снижения амплитуды сигнала за счет пережатия клипсом перфорирующей артерии (рис. 7, а), что повлияло на хирургическую тактику – клипс был переустановлен после освобождения функционально важной артерии (рис. 7, б, в). В послеоперационном периоде ухудшения в неврологическом статусе не отмечалось, сила в конечностях была симметрична (рис. 8, а). При контрольном исследовании (компьютерной томографии

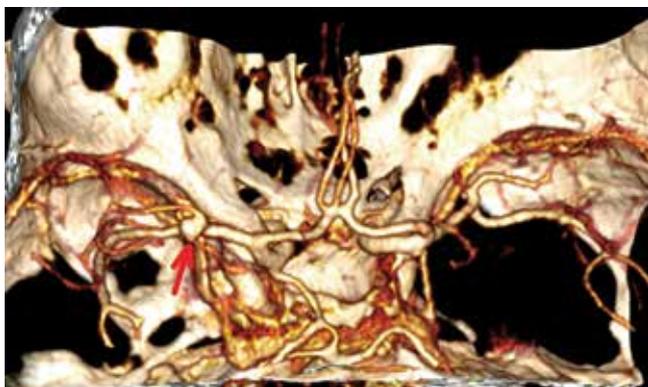


Рис. 6. Мультиспиральная компьютерная томографическая ангиография до операции. Красной стрелкой указана аневризма бифуркации средней мозговой артерии слева

Fig. 6. Multispiral computed tomography-angiography prior to surgery. Red arrow shows an aneurysm of the middle cerebral artery bifurcation

головного мозга) ишемических осложнений не выявлено (рис. 8, б, в).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В настоящее время известны несколько способов электрической стимуляции коры головного мозга для получения МВП: транскраниальная электростимуляция (ТЭС-МВП), когда импульс подают через кости черепа от электродов, расположенных на поверхности скальпа; прямая стимуляция коры головного мозга – ПСК-МВП, которую можно осуществлять моно- или биполярным зондом (зонд-ПСК), а также с помощью стрип-ПСК – электрода-полоски, или стрип-электрода, уложенного вдоль прецентральной извилины [1].

Метод ПСК-МВП является более информативным по сравнению с ТЭС-МВП и считается «золотым стандартом», поскольку стимуляцию коры головного мозга осуществляют под визуальным контролем и вероят-

ность побочной стимуляции глубинных проводящих структур отсутствует [2]. Использование ПСК-МВП в модификации стрип-ПСК максимально удобно для длительного интраоперационного мониторинга кортикоспинального и кортикобульбарного трактов, поскольку не требует переключения внимания хирурга на электростимуляцию зондов, как при использовании зонд-ПСК. При использовании ТЭС-МВП высокая сила стимула вызывает клонические сокращения мышц скальпа, приводя к резким движениям операционного поля.

Интерпретацию результатов проводят на основании анализа динамики изменения амплитуды МВП относительно значений, полученных в начале операции. При непрерывном проведении стрип-ПСК снижение амплитуды МВП на 50 % и более относительно базовых показателей свидетельствует о начале развития ишемии нейронов прецентральной извилины и требует немедленного изменения хода оперативного вмешательства или применения интенсивного медикаментозного воздействия [3]. Однако к снижению амплитуды могут привести также и другие побочные факторы.

Как отмечено выше, одним из недостатков метода стрип-ПСК, влияющим на воспроизводимость МВП при длительном монтировании и, соответственно, на снижение достоверности его результатов, является нарушение плотного прилегания электродов к коре головного мозга и, как следствие, миграция электродов в процессе хирургического вмешательства. Это происходит в результате западения мозга во время операции (“brain shift”), которое приводит к увеличению расстояния между корой головного мозга и ТМО, а также при механическом смещении электрода во время манипуляции в операционной ране. Вследствие уменьшения плотности контакта между электродом и корой головного мозга, а также его миграции

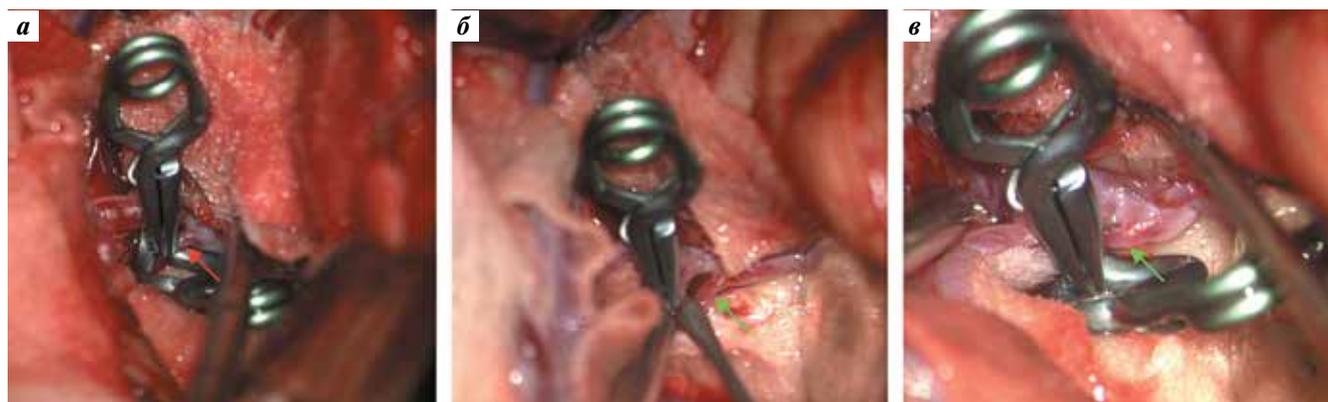


Рис. 7. Интраоперационные фотографии клипирования аневризмы: а – ревизия сосудов после первого наложения клипсов на аневризму. Красной стрелкой обозначена компримированная клипсом перфорирующая артерия; б, в – после репозиции клипса. Зеленой стрелкой обозначена свободная перфорирующая артерия, вне клипса

Fig. 7. Intraoperative photos of aneurysm clipping: а – revision of the vessels after first installation of clips on the aneurysm. Red arrow shows the perforating artery compromised by the clip; б, в – after clip reposition. Green arrow shows the free perforating artery outside of the clip

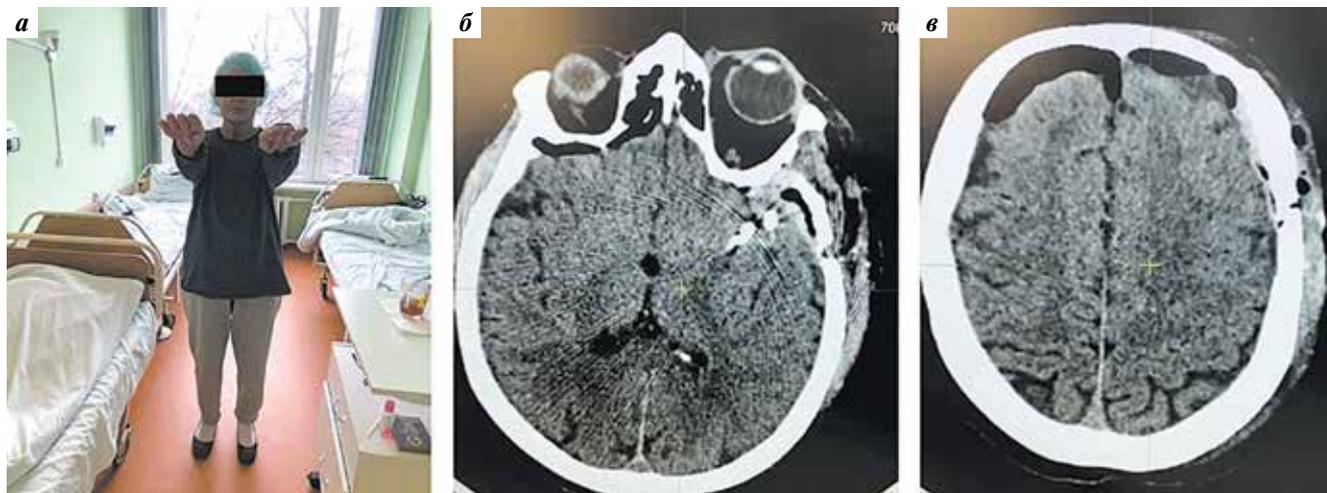


Рис. 8. Послеоперационный период: а – фотография пациентки на 3-и сутки после операции; б, в – компьютерная томография головного мозга на 1-е сутки после операции

Fig. 8. Postoperative period: а – patient's photo on day 3 after surgery; б, в – computed tomography of the brain on day 1 after surgery

происходит уменьшение количества электроэнергии, возбуждающей мотонейроны двигательной коры, и снижение интенсивности нервных импульсов, нисходящих по кортикоспинальному тракту, что приводит к получению ложных результатов, связанных с падением амплитуды МВП. Феномен западения мозга во время операции встречается при удалении больших внутримозговых опухолей, а также во время сосудистых операций по поводу клипирования аневризм в результате опорожнения крупных ликворных цистерн. Раздувание баллона в такой ситуации после выполненной внутренней декомпрессии мозга не приводит к увеличению внутричерепного давления выше исходного уровня, так как баллон в рабочем состоянии не приводит к значимому масс-эффекту в связи с использованием манометрического контроля.

Из уровня техники известны различные способы фиксации электродов в эпидуральных пространствах, которые можно подразделить на безбаллонные фиксирующие системы и системы с баллоном.

К особенностям представленного устройства, в отличие от аналогов, относится обеспечение возможности плотного прилегания всей рабочей поверхности электрода к поверхности коры головного мозга. В заявляемом изобретении это достигается за счет использования гибкой электрод-полоски, содержащей не менее 4 точечных электродов, закрепленных на гибкой подложке, которая при размещении на поверхности коры головного мозга повторяет рельеф ее поверхности. Кроме того, использование нескольких точечных

электродов обеспечивает бесперебойную подачу сигнала. В случае, если один из электродов не будет обеспечивать требуемый контакт с поверхностью коры головного мозга, устойчивый сигнал может быть обеспечен оставшимися электродами. Кроме того, в устройстве отсутствует жесткий каркас, который создает равномерное давление по длине электрода и, как следствие, равномерное распределение передаточного давления от электрода на кору головного мозга, что предотвращает компрессионное нарушение кровоснабжения данной зоны (центральной). По нашему опыту, раздувание баллона до оптимального давления не приводит к значимому локальному снижению перфузии функциональной коры в данной области (интраоперационно снижение амплитуды ответов не отмечается).

В изобретении могут быть использованы известные из уровня техники электрод-полоски для стрип-ПСК, содержащие разное количество электродов [4], которые могут быть выполнены из различных металлов или их сплавов, в том числе из золота [5], с различным эластичным покрытием из биосовместимых полимеров [6–8].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, представленное устройство позволяет уменьшить риски повреждения кортикоспинального и кортико-бульбарного трактов при оперативных вмешательствах на головном мозге, что повышает безопасность нейрохирургического вмешательства и снижает риски неврологических осложнений.

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

1. MacDonald D.B., Skinner S., Shils J. et al. Intraoperative motor evoked potential monitoring – a position statement by the American Society of Neurophysiological Monitoring. *Clin Neurophysiol* 2013;124(12):2291–316. DOI: 10.1016/j.clinph.2013.07.025
2. Ritaccio A.L., Brunner P., Schalk G. Electrical stimulation mapping of the brain: basic principles and emerging alternatives. *J Clin Neurophysiol* 2018;35(2):86–97. DOI: 10.1097/WNP.0000000000000440
3. Sudhakar T.D., Rahme R., Alimi M. et al. Intraoperative neurophysiologic monitoring in brain aneurysm surgery. In: *Intracranial aneurysms*. Ed. by A.J. Ringer. Academic Press, 2018. Pp. 249–263. DOI: 10.1016/B978-0-12-811740-8.00016-2
4. Крылов В.В. Нейрохирургия и нейрореаниматология. М.: АБВ-пресс, 2018. 792 с.
5. Krylov V.V. Neurosurgery and neuro-intensive care. Moscow: ABV-Press, 2018. 792 p.
5. Yeager J.D., Phillips D.J., Rector D.M., Bahr D.F. Characterization of flexible ECoG electrode arrays for chronic recording in awake rats. *J Neurosci Methods* 2008;173(2):279–85. DOI: 10.1016/j.jneumeth.2008.06.024
6. Stieglitz T., Meyer J.U. Implantable microsystems. Polyimide-based neuroprostheses for interfacing nerves. *Med Device Technol* 1999;10(6):28–30.
7. Hollenberg B.A., Richards C.D., Richards R. et al. A MEMS fabricated flexible electrode array for recording surface field potentials. *J Neurosci Methods* 2006;153(1):147–53. DOI: 10.1016/j.jneumeth.2005.10.016
8. Hetke J.F., Najafi K., Wise K.D. Flexible miniature cables for long-term connection to implantable sensors. *Sensors and Actuators* 1990;A21–A23:999–1002.

Вклад авторов

В.В. Крылов: разработка концепции и дизайна исследования, научное редактирование текста статьи;
 В.А. Лукьянчиков: разработка концепции и дизайна исследования, разработка и тестирование устройства для интраоперационного мониторинга целостности кортикоспинального тракта, написание текста статьи;
 В.А. Горожанин: разработка концепции и дизайна исследования, разработка и тестирование устройства для интраоперационного мониторинга целостности кортикоспинального тракта, написание текста статьи;
 З.А. Барбакадзе: разработка концепции и дизайна исследования, написание текста статьи;
 М.В. Синкин: разработка концепции и дизайна исследования, разработка и тестирование устройства для интраоперационного мониторинга целостности кортикоспинального тракта, написание текста статьи.

Authors' contribution

V.V. Krylov: development of the concept and design of the study, scientific editing of the article;
 V.A. Lukianchikov: development of the concept and design of the study, development and testing of a device for intraoperative monitoring of corticospinal tract integrity, article writing;
 V.A. Gorozhanin: development of the concept and design of the study, development and testing of a device for intraoperative monitoring of corticospinal tract integrity, article writing;
 Z.A. Barbakadze: development of the concept and design of the study, article writing;
 M.V. Sinkin: development of the concept and design of the study, development and testing of a device for intraoperative monitoring of corticospinal tract integrity, article writing.

ORCID авторов / ORCID of authors

В.В. Крылов / V.V. Krylov: <https://orcid.org/0000-0001-5256-0905>
 В.А. Лукьянчиков / V.A. Lukianchikov: <https://orcid.org/0000-0003-4518-9874>
 В.А. Горожанин / V.A. Gorozhanin: <https://orcid.org/0000-0002-7629-7934>
 З.А. Барбакадзе / Z.A. Barbakadze: <https://orcid.org/0000-0003-3835-4317>
 М.В. Синкин / M.V. Sinkin: <https://orcid.org/0000-0001-5026-0060>

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

Финансирование. Исследование проведено без спонсорской поддержки.
Funding. The study was performed without external funding.

Статья поступила: 19.10.2022. **Принята к публикации:** 24.10.2023.
Article received: 19.10.2022. **Accepted for publication:** 24.10.2023.