

ХИРУРГИЯ СПИННОГО МОЗГА И НЕРВНЫХ КОРЕШКОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИНТРАОПЕРАЦИОННОГО УЛЬТРАЗВУКОВОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

Левин Р.С.¹, Васильев С.А.¹, Аслануков М.Н.¹, Зувев А.А.²

¹ФГБНУ «Российский научный центр хирургии им. академика Б.В. Петровского», 119991, Москва, Россия

²ФГБУ «Национальный медико-хирургический центр им. Н.И. Пирогова», 105203, Москва, Россия

Цель. Обзор литературы о клиническом применении ультразвуковой навигации в хирургическом лечении спинного мозга и нервных корешков.

Материалы и методы. Проведен анализ 79 публикаций международной базы данных Pubmed, в которых использован метод ультразвуковой навигации у пациентов с экстрамедуллярными и интрамедуллярными опухолями, сирингомиелией, арахноидальными кистами, аномалией Арнольда-Киари. Работы были опубликованы с 1984 г. до января 2017 г.

Результаты. Метод интраоперационного ультразвукового исследования позволяет проводить навигацию в режиме реального времени, предоставляя хирургу изображения структур не доступных прямой визуализации в высоком качестве, что позволяет оптимизировать хирургические манипуляции.

Заключение: Метод интраоперационного ультразвукового исследования в хирургии спинного мозга и нервных корешков является перспективным, простым в обучении, эффективным для интраоперационной визуализации, не требующим высоких экономических затрат.

Ключевые слова: интраоперационная сонография, опухоль спинного мозга, экстрамедуллярные опухоли, арахноидальные кисты, сирингомиелия, аномалия Арнольда-Киари.

Objective. Literature review dedicated to clinical usage of ultrasound navigation in surgical treatment of spinal cord and nerve roots.

Material and methods. Authors analyzed 79 papers from 1984 to 2017 of Pubmed database dedicating to ultrasound navigation in patients with extramedullary and intramedullary tumors, syringomyelia, arachnoid cysts, Arnold—Chiari malformation.

Results. Intraoperative ultrasound examination (IOUE) allows conducting navigation in real-time mode, providing images of those structures not available for direct visualization in high quality, that is allows optimizing the surgical manipulations.

Conclusions: IOUE in surgery of spinal cord and nerve roots is perspective method, which is simple in teaching and effective for intraoperative visualization not requiring high economical costs.

Key words: intraoperative sonography, tumor of spinal cord, extramedullary tumors, syringomyelia, arachnoid cysts, Arnold—Chiari malformation

В хирургическом лечении спинного мозга и нервных корешков спектр применимых систем интраоперационной визуализации и навигации значительно уже, по сравнению с хирургией головного мозга. Интраоперационная КТ не позволяет визуализировать спинной мозг должным образом, а применение интраоперационной МРТ, не говоря о его крайне высокой стоимости, в спинальной нейрохирургии находится на стадии эксперимента [27]. Смещение структур спинного мозга во время операции, наличие сегментарной нестабильности приводят к значительному снижению эффективности применения навигационных систем, базирующихся на дооперационных изображениях. Стоимость этих систем высока и использование их во всех клиниках, где проводятся нейрохирургические операции, затруднительно [54, 58].

Таким образом, в микрохирургии спинного мозга использование интраоперационного ультразвукового исследования (ИОУЗИ), как метода интраоперационной визуализации, на данный момент наиболее актуально.

В российской литературе практика применения ИОУЗИ в хирургическом лечении головного мозга (при удалении опухолей, гематом и т.д.) достаточно хорошо освещена рядом авторов [1-6, 9, 11, 12]. В хирургии спинного мозга и нервных корешков работы по данному вопросу единичны и основаны на малом количестве наблюдений [7, 8, 10].

Оборудование и техника проведения ИОУЗИ.

Могут применяться как линейные, так и конвексные датчики. Оптимальными характеристиками обладают небольшие датчики (от 1 до 3 см) с частотой 4-8 МГц и 10-15 МГц для глубины сканирования от 3 до 8 см и от 0,5 до 4 см соответственно [18, 54, 65, 71, 72]. В хирургии спинного мозга датчики с частотой более 9 МГц обеспечивают лучшее качество изображения [19, 79].

Качественная визуализация с помощью ИОУЗИ возможна после доступа к твердой мозговой обо-

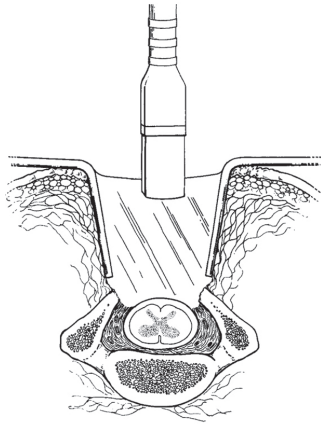


Рис. 1. Положение датчика при проведении интраоперационной сонографии во время операций на спинном мозге (по Dohrmann G. и соавт. 2001).

Fig. 1. The placement of probe during intraoperative sonography for spinal cord surgery (by Dohrmann G. et al. 2001).

лочке (ТМО). Полость доступа заполняют физиологическим раствором, через толщу которого осуществляется ИОУЗИ (рис. 1).

Положение пациента на животе при выполнении заднего доступа оптимально для проведения ИОУЗИ, так как, обеспечивая вертикальное расположение раневого канала, исключается истечение физиологического раствора и происходит элиминация пузырьков воздуха [72].

Зона интереса исследуется в двух взаимно перпендикулярных плоскостях, определяются размеры и положение очага поражения относительно анатомических структур. Далее производят оценку адекватности выполненного доступа на основании полученных данных УЗИ и предоперационных данных МРТ/КТ, в случае необходимости может быть выполнена дополнительная резекция костных структур и мобилизация мягких тканей в соответствии с интраоперационными данными УЗИ, что важно — до вскрытия ТМО. После вскрытия ТМО УЗИ позволяет визуализировать участок поражения относительно невралных структур на фоне дренирования ликвора, декомпрессии спинного мозга — факторов, вызывающих изменения полученных до операции данных, в случае отсутствия прямой визуализации очага поражения [60, 79].

Данные интраоперационной сонографии.

Нормальная анатомия спинного мозга и смежных структур

ТМО визуализируется как гиперэхогенная линейная структура, окружающая спинной мозг. Ткань спинного мозга гомогенная, умеренно гипоэхогенная. Внутри спинного мозга визуализируется яркий гиперэхогенный центральный канал в виде одной или двух параллельных линий, который расположен несколько вентральнее относительно центра спинного мозга. Деформация или разрушение центрального канала служит важным ориентиром даже при слабовыраженных патологических процессах, протекающих интрамедуллярно. Спинной мозг окружен гипоэхогенным ликвором, «подвешен» к дуральному мешку

зубчатыми связками, которые визуализируются как линейные гиперэхогенные структуры, отстоящие от ТМО к латеральным краям спинного мозга с обеих сторон (рис. 2). Нервные корешки также визуализируются как линейные гиперэхогенные структуры внутри субарахноидального пространства в вентролатеральной области; в области конского хвоста визуализируются в виде плотного скопления из линейных гиперэхогенных образований (рис. 3).

Размер и форма спинного мозга и дурального мешка различаются в зависимости от локализации. В грудном отделе спинной мозг наиболее тонкий, более округлый, в шейном отделе несколько толще, более овальный. В дистальном направлении спинной мозг постепенно сужается. Воздействие дыхания и сердцебиения на пульсацию спинного мозга и дурального мешка хорошо оцениваются интраоперационно [34, 59, 60].

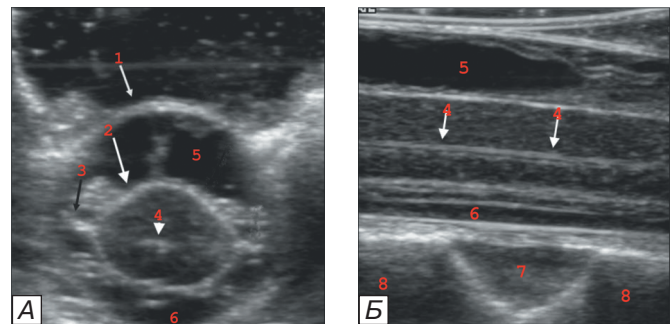


Рис. 2. Ультразвуковое изображение интактного спинного мозга в аксиальной (А) и сагиттальной (Б) плоскостях (Sosna J. и соавт., 2005): 1 — ТМО, 2 — поверхность спинного мозга, 3 — зубчатые связки, 4 — центральный канал, 5 — заднее субарахноидальное пространство, 6 — переднее субарахноидальное пространство, 7 — межпозвонковый диск, 8 — края тел смежных позвонков.

Fig. 2. Ultrasound image of intact spinal cord in axial (A) and sagittal (B) views (Sosna J. Et al., 2005): 1 — dura mater, 2 — surface of spinal cord, 3 — dentate ligaments, 4 — canalis centralis, 5- posterior subarachnoid space, 6 — anterior subarachnoid space, 7 — intervertebral disc, 8 — borders of adjacent vertebral bodies.

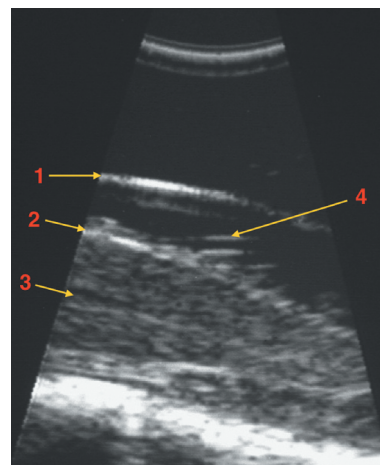


Рис. 3. Ультразвуковое изображение интактного спинного мозга в области конуса в сагиттальной плоскости (Kane R. и соавт., 2007): 1 — ТМО, 2 — поверхность спинного мозга, 3 — центральный канал, 4 — нервные корешки.

Fig. 3. Ultrasound image of intact spinal cord in the area of conus in sagittal view (Kane R. et al., 2007): 1 — dura mater, 2 — surface of spinal cord, 3 — canalis centralis, 4- nerve roots.

Данные ИОУЗИ при патологии.

Опухоли, поражающие невральные структуры позвоночного канала, имеют достаточно вариабельную УЗ-картину. Метастатические поражения, первичные опухоли спинного мозга имеют более высокую эхогенность, чем спинной мозг. Эпендимомы обычно гиперэхогенные и имеют четкие контуры, в 83% наблюдений имеют кисты размером более 5 мм, в 24% — отмечается ассоциированная сирингомиелия, распространяющаяся как в ростральном, так и каудальном направлениях. Микрокисты размером менее 5 мм встречаются в 79% наблюдений. Астроцитомы чаще изоэхогенные с плохо различимыми краями и наиболее хорошо определяются по расширению контуров спинного мозга и облитерации центрального канала. Имеют макрокисты (более 5 мм) и микрокисты (менее 5 мм) в 24% и 43% случаев соответственно. Очень сложно дифференцировать инфильтрирующую астроцитому от других поражений спинного мозга, таких как посттравматический отёк или поперечный миелит, и другие ишемические или инфекционные процессы. Эхогенность астроцитом сравнима с эхогенностью спинного мозга в 82% наблюдений. Дифференцировать границы данной опухоли также практически невозможно [21, 34, 36, 60, 68].

Кистозные изменения внутри спинного мозга обычно видны в ряде интрамедуллярных опухолей: гемангиобластомы, эпендимомы и астроцитомы. Кисты могут быть как компонентами опухолей, так и представлять собой сирингомиелическую полость, ассоциированную с опухолью. ИОУЗИ позволяет дифференцировать генез кист. Септы внутри кист, входящих в состав опухоли, толще и более плотно связаны с узлом, в отличие от тонких пиальных септ при сирингомиелии. Геморрагическое содержимое, сквамозные компоненты и другой белковый материал могут давать гиперэхогенный характер содержимому кистозных опухолей [34].

Некоторые интрамедуллярные опухоли имеют специфичную сонографическую картину, например, гемангиобластома. Опухоль часто прикрыта дорсальным корешком, и может быть не видна после вскрытия ТМО. Обычно гемангиобластома представлена хорошо васкуляризованным, умеренно гиперэхогенным узлом и гипоехогенной кистой, также может быть ассоциированной с сирингомиелией. В В-режиме сканирования в структуре опухоли визуализируются анэхогенные зоны, представленные сосудами, которые хорошо видны в цветовом режиме сканирования. После опорожнения кисты визуализация опухолевого узла ухудшается, в этом случае эффективно применение доплерографического режима [25, 79].

Интрамедуллярные опухоли зачастую имеют выраженный перифокальный отёк, что затрудняет УЗ-визуализацию их краев [79]. Каверномы, расположенные интрамедуллярно, имеют гиперэхогенную неоднородную структуру, хорошо визуализируются при УЗИ. Но недавнее кровоизлияние в анамнезе, отложения гемосидерина и

наличие выраженного перифокального отека значительно затрудняют дифференцировку их границ при сонографическом контроле резекции [19].

Экстрамедуллярные опухоли, такие как менингиомы, нейрофибромы, шванномы, параганглиомы, ганглионевромы, метастазы, липомы и дермоидные кисты, лучше различимы при ИОУЗИ, обычно имеют более высокую эхогенность в сравнении с интрамедуллярными образованиями. Благодаря тому, что они, хотя бы частично, окружены ликвором, их края хорошо визуализируются [51]. Перифокальный отек менее выражен [26, 46, 79]. Спинной мозг может быть оттеснен опухолью, поверхность его может быть неровной, но центральный канал будет сохранен, даже в области деформации. Эта особенность помогает дифференцировать интрамедуллярные новообразования от экстрамедуллярных.

Невриномы изо- или гипоехогенные, часто имеют большие или мелкие кисты, их поверхность гладкая, форма округлая. У невринома отмечаются колебательные движения, синхронные с сердечной пульсацией, т.к. они не фиксированы к ТМО. Менингиомы обычно гиперэхогенные, не имеют кист, поверхность их более неровная и они плотно сращены с ТМО, неподвижны, могут содержать гипер- и гипоехогенные участки [46, 51, 79].

Сирингомиелия представлена расширением центрального канала. По данным УЗИ визуализируется как интрамедуллярная гомогенная анэхогенная ликворная полость различной протяженности и формы, по своей внутренней структуре может быть цельной или многокамерной — с лакунами и септами [18, 34, 65].

Травма спинного мозга может вызывать интрамедуллярные гематомы и области посттравматической миеломалации, которые визуализируются как области неспецифического отека, гетерогенности и иногда как участки кистозной дегенерации. Другие воспалительные состояния, такие как поперечный миелит и некротическая миелопатия, могут визуализироваться как интрамедуллярные образования, часто плохо отграниченные, но различимые [34].

Артериовенозные мальформации (АВМ) и фистулы (АВФ) хорошо визуализируются в доплерографическом режиме ИОУЗИ как сосуды с высокоскоростным и высокотурбулентным кровотоком [64].

Хирургические вмешательства, выполняемые под контролем ИОУЗИ.

Проведение ИОУЗИ позволяет максимально точно адаптировать протяженность доступа, необходимого для удаления опухоли. Данная методика предотвращает необходимость дальнейшей резекции костных структур и мобилизации мягких тканей после вскрытия ТМО. Это позволяет избежать ряда неблагоприятных последствий: раннего дренирования цереброспинальной жидкости (ЦСЖ) и содержимого кист, дополнительного

истечения крови в открытое субарахноидальное пространство с развитием менингеальной симптоматики, компрессии отекающего и пролабирующего в дефект ТМО спинного мозга [60].

В случаях выполнения повторных операций при рецидивах опухолей, когда отсутствуют костные ориентиры после выполненной ламинэктомии, на этапе доступа затрудняется определение расстояния до ТМО и структур позвоночного канала. Также затруднительно определить протяженность и локализацию опухоли. При рассечении рубцовой ткани ИОУЗИ позволяет определить расстояние до ТМО, когда остается несколько миллиметров, следует продолжить диссекцию под увеличением микроскопа. Ротра-каудальная протяженность доступа может быть уточнена с помощью ИОУЗИ [31].

В ситуации, когда опухоль не выходит на поверхность спинного мозга и недоступна для прямой визуализации, ИОУЗИ является высокоточным методом для определения удобного и безопасного участка миелотомии, особенно, если спинной мозг деформирован. Авторы предлагают вариант определения задней срединной борозды с использованием режима доплерографии, при котором визуализируются идущие в борозде сосуды. В сагиттальной проекции определяется кранио-каудальное распространение опухоли и, соответственно, протяженность миелотомии [31].

ИОУЗИ в большинстве случаев обеспечивает ясную и объективную дифференцировку между опухолью и здоровой тканью, базирующуюся на различных сонографических признаках, помогая оценивать радикальность резекции [69, 79]. Выраженный перифокальный отек значительно затрудняет сонографическую дифференцировку тканей при проведении контроля резекции опухоли [19].

В случаях, когда опухоль недостаточно отграничена и изоэхогенна спинному мозгу, авторы предлагают достаточно простую методику сравнения ультразвуковых изображений в аксиальных плоскостях, полученных до удаления опухоли и на различных этапах. Это дает более объективную оценку объема удаленной опухолевой ткани, т.к. хирурги зачастую склонны переоценивать объем удаленной опухоли и недооценивать объем остаточной патологической ткани, что связано с работой под большим увеличением микроскопа и визуальной схожестью опухоли с интактной нервной тканью [31].

Slin'ko and Al-Qashqish описали 360 случаев интрадуральных экстрamedулярных опухолей, 33 из которых располагались вентрально, 107 — вентро-латерально. Образования данной локализации прикрыты спинным мозгом, и их прямая визуализация затруднительна, что усложняет их хирургическое удаление. Хирургу приходится с целью полноценной ревизии смещать на большом протяжении спинной мозг для прямой визуализации новообразования, значительно увеличивая риск травматизации невральных структур. Визуализация опухолей данной категории по данным УЗИ также хорошо достижима [34, 79].

Описаны случаи миграции невринома в ротра-каудальном направлении относительно первичного положения, определенного при предоперационной МРТ [13, 22, 23, 31, 39, 40, 45, 62, 67]. Значительно более редко встречается миграция эпендимом [52]. Данная особенность интрадуральных экстрamedулярных опухолей может повлечь за собой ошибку в уровне доступа с необходимостью выполнения многоуровневой ламинэктомии. Поэтапно выполняемая ИОУЗИ во время костной резекции позволяет безошибочно определить уровень и протяженность доступа.

Есть наблюдения возникновения «псевдоотека» спинного мозга при удалении интрамедуллярных опухолей. Данная ситуация возникает, когда ликвор, скапливаясь в переднем субарахноидальном пространстве, вытесняет спинной мозг дорсально. При этом спинной мозг, пролабируя в дефект ТМО, может быть поврежден о ее края. Ушивание ТМО в таких случаях может быть небезопасным. УЗИ позволяет отличить «псевдоотек» от истинного отека спинного мозга, выявив деформирующее его скопление ЦСЖ в вентральных отделах позвоночного канала. Дренирование ЦСЖ в этих случаях позволяет устранить выхождение спинного мозга [31].

В 2016 г. Ivanov M. и соавт. описали серию из 158 пациентов с интрадуральными опухолями, в хирургическом лечении которых применяли ИОУЗИ. На основании их 10-летнего опыта представлены выводы о высокой эффективности ИОУЗИ при данной патологии, в 100% наблюдений опухоли хорошо визуализировались по данным сонографии и были отличимы от нормальной ткани спинного мозга [31].

В последние годы в литературе появляются описания применения УЗИ-контраста при хирургии интрадуральных опухолей. G. Vetrano и соавт. применили УЗИ с контрастом, как метод дополнительной интраоперационной дифференциальной диагностики и визуализации, позволивший интраоперационно дифференцировать отдельные узлы гемангиобластомы, хотя при дооперационном МРТ-исследовании опухоль расценивалась как диффузная инфильтративная многоочаговая [73]. Учитывая, что особенностью данного вида контраста является его только внутрисосудистое накопление, в отличие от внутрисосудистого и интерстициального характера распространения контраста, применяемого для МРТ, визуализация гемангиобластом, как хорошо васкуляризованных опухолей, значительно улучшается. Также эта группа авторов описывает применение контраста для ИОУЗИ при удалении невриномы, сочетающейся с сирингомиелией и кистами. В представленном клиническом наблюдении по данным дооперационного МРТ с контрастом опухоль была определена как интрамедуллярная. ИОУЗИ предоставило дополнительную информацию о экстрamedулярной природе опухоли. Перспективно дальнейшее изучение применения УЗ-контраста в хирургии опухолей спинного мозга и нервных корешков как средства улучшения визуализации и оценки особенностей перфузии [74].

В хирургии синингомиелии ИОУЗИ позволяет определить ростра-каудальную протяженность синингомиелической кисты, визуализировать ее внутреннюю структуру, септы, лакуны. При необходимости шунтирования позволяет выбрать точку установки шунта и оценить адекватность дренирования [18, 57].

ИОУЗИ успешно зарекомендовало себя при оценке адекватности декомпрессии спинного мозга и нервных корешков при дегенеративных заболеваниях и травме позвоночника, экстрамедуллярных новообразованиях. КТ и МРТ оценивают спинной мозг как статичную структуру, ИОУЗИ же позволяет визуализировать его при пульсации. Эта особенность метода позволяет объективно оценить адекватность декомпрессии спинного мозга по его пульсации, наличию ликворных пространств и их размеру [14, 24, 37, 41, 42, 48, 53, 55, 56, 61, 63, 76]. Колебания спинного мозга, визуализируемые при ИОУЗИ, вызванные сердечными сокращениями и дыхательными движениями, обычно меньше в области компрессии. Но Р. Jokich и соавт. выявили, что колебания спинного мозга в области сдавления его вентральных отделов опухолью, обусловленные пульсацией компримированной передней спинальной артерии, могут быть более выраженными, и уменьшаются после декомпрессии. В исследовании отмечено, что пульсация ТМО не всегда коррелирует с пульсацией спинного мозга. Этот параметр важно учитывать при выполнении декомпрессии невральных структур. Колебания спинного мозга, вызванные дыхательными движениями, имеют большую амплитуду и меньшую частоту, по сравнению с пульсацией, вызванной сердечными сокращениями [32].

В 2015 г. R. Harel и соавт. описали серию из 78 пациентов с разными спинальными патологиями (44 интрадуральных экстрамедуллярных, 11 интрамедуллярных и 10 экстрадуральных опухолей, 10 грыж грудного отдела позвоночника, 2 аномалии Арнольда-Киари), в хирургическом лечении которых ИОУЗИ применялось рутинно. В 49 (63%) наблюдениях данные ИОУЗИ внесли коррективы в течение хирургического вмешательства. Авторы подчеркивают удобство и простоту метода, сообщают об отсутствии осложнений, связанных с ИОУЗИ [28]. Время исследования занимало не более нескольких минут, даже при необходимости его повторного выполнения.

Допплерографический режим ИОУЗИ успешно применяется в хирургии различных сосудистых аномалий (АВМ, АВФ, варикозно измененные вены) и хорошо васкуляризованных опухолей. ИОУЗИ позволяет облегчить их идентификацию и проводить контроль радикальности удаления или эффективность клипирования питающих сосудов [15, 17, 30, 64, 66, 73]. S. Glasker и соавт. описали серию из 64 пациентов, оперированных по поводу гемангиобластом различной локализации, из которых у 27 пациентов опухоль располагалась в спинном мозге. Использование доплерографического режима сонографии привело к снижению частоты рецидива до 3,5%, в то время как другие

исследования сообщают о частоте рецидива от 3 до 10% [25].

ИОУЗИ может быть использовано при визуализации грыж межпозвонковых дисков, инородных тел (пули, дробь, ятрогенные поражения — цемент для вертебропластики и т.д.); помогает выполнению интраоперационного дренирования эпи- и интрадуральных абсцессов [34].

ЦСЖ содержит небольшое количество клеток и молекул белков, движение которых может фиксироваться в доплерографическом режиме УЗИ. В 1999 г. учеными впервые была предпринята попытка исследовать ликвороток с помощью УЗИ [47].

Ранние исследования подтвердили, что применение доплерографического режима УЗИ позволяет регистрировать скоростные показатели ликворотока, в свою очередь, предоставляя хирургам информацию для выбора индивидуальной для пациента операционной тактики. Несовершенство приборов отложило на время широкое применение данной техники [20].

При выполнении декомпрессии структур краниовертебрального перехода при аномалии Арнольда-Киари нет общепринятых объективных методов оценки адекватности выполненной декомпрессии. Нет единого протокола, утверждающего необходимость проведения этапа пластики ТМО после костной резекции [20, 38, 47, 71]. Использование ИОУЗИ в комбинации с цветным доплерографическим режимом рассматривается как метод объективной оценки состояния ликвородинамики и адекватности декомпрессии на краниовертебральном уровне, что может позволить корректировать объем резекции костных структур и определять необходимость выполнения пластики ТМО [20, 78]. На уровне краниовертебрального перехода нормальная скорость ликворотока составляет 3-5 см/с [49]. В отличие от тока крови, ликвороток двунаправленный, зависит от сердечного цикла — во время систолы устремляется с большей скоростью в каудальном направлении, во время диастолы — с меньшей скоростью направляется к головному концу. Ликвороток также подчиняется дыхательному циклу. При вдохе ЦСЖ направляется к головному концу, при выдохе — в позвоночный канал [20].

Z. Litvack и соавт. описывают серию из 113 пациентов с ААК I типа, 63 из которых выполняли экстрадуральную декомпрессию в виде расслоения ТМО без ее вскрытия. Для всех пациентов этой группы ИОУЗИ было использовано в качестве метода контроля адекватности декомпрессии. Оценивали пульсацию миндалик мозжечка и расширение большой затылочной цистерны [43].

При хирургическом устранении интрадуральных арахноидальных кист ИОУЗИ, как метод визуализации, наиболее эффективен [29, 75]. Miyashita T. и соавт. описывают применение ИОУЗИ для выявления патофизиологической картины динамической компрессии спинного мозга интрадуральной арахноидальной кистой [50]. Отмечается, что УЗИ позволяет визуализировать кисту как динамическую структуру, учитывая ее пульсацию вследствие сердечных сокращений,

расширение и сужение в связи с дыхательным циклом, в то время как кардиосинхронизированная фазоконтрастная МРТ позволяет визуализировать ликвородинамику и пульсацию кисты, вызванную только сердечными сокращениями [16]. Таким образом, до вскрытия ТМО ИОУЗИ позволяет уточнить диагноз, детально оценить арахноидальную кисту, ее истинные размеры, планировать дальнейшую операционную тактику [78].

Оценку ликворотока в доплерографическом режиме ИОУЗИ применяют в хирургии арахноидальных экстрадуральных кист при поиске участка шунтирования ЦСЖ из эпидурального пространства [35].

После ушивания ТМО контроль гемостаза в субдуральном пространстве может быть выполнен с помощью ИОУЗИ, и в случае выявления гематомы (область гиперэхогенного сигнала) на раннем этапе выполнить ее удаление и гемостаз [31].

Преимущества метода ИОУЗИ.

1. Интраоперационное УЗИ, в отличие от безрамных навигационных систем, позволяет проводить навигацию в режиме реального времени [34, 63, 65, 72, 76].

2. В настоящее время ИОУЗИ в хирургии образований спинного мозга, как методу интраоперационной визуализации структур, находящихся вне зоны прямого видения (интрамедуллярные и вентрально расположенные экстрамедуллярные объемные образования, положение шунта в сирингомиелических кистах и т.д.), не существует альтернативы.

3. Учитывая относительную простоту метода, проблем с установкой оборудования и подготовкой его к работе практически не бывает. Какая-либо специфическая предоперационная подготовка не требуется. Загрузка и настройка аппарата происходит за несколько минут. Возможность работы от аккумулятора исключает проблемы в случае перебоев с электроэнергией. Потеря данных не вызывает существенных затруднений при использовании ИОУЗИ, т.к. получение новых изображений не занимает много времени и легко выполнимо [28].

4. ИОУЗИ проводится непосредственно хирургом и не требует наличия дополнительного штата специалистов. Дополнительного оснащения операционной не требуется. Благодаря мобильности и компактности аппарата УЗИ исследования можно проводить в разных операционных. В сравнении с другими системами интраоперационной визуализации имеет низкую стоимость [28, 71, 72].

5. На этапе костной резекции ИОУЗИ позволяет адаптировать хирургический доступ к интрадуральным структурам, что значительно уменьшает вероятность ошибки уровнем доступа и последующей многоуровневой ламинэктомии [33, 44].

6. При повторных операциях и отсутствии костных структур после ламинэктомии ИОУЗИ позволяет визуализировать структуры позвоноч-

ного канала, делая хирургический доступ через рубцовую ткань более безопасным и точным [31].

7. ИОУЗИ позволяет визуализировать спинной мозг как динамичную структуру, оценивая его пульсацию [32].

8. Есть перспективы использования доплерографического режима ИОУЗИ в оценке скоростных показателей ликвородинамики [20].

9. Применение препаратов для контрастного усиления при ультразвуковых исследованиях позволяет улучшить визуализацию опухолей [73, 74].

10. УЗИ позволяет во время операции проводить контроль радикальности выполнения хирургического вмешательства (выявление остаточной ткани опухоли, адекватности шунтирования кист, степень декомпрессии невральных структур позвоночного канала) [14, 18, 20, 34, 51, 63, 69, 76, 79].

11. Качество изображения, получаемого при УЗИ, сопоставимо, либо превосходит качество изображений предоперационного МРТ [72].

12. ИОУЗИ позволяет проводить ревизию субдурального пространства после ушивания ТМО [31].

В хирургии спинного мозга и нервных корешков метод ИОУЗИ представляет собой конкурентоспособную и перспективную альтернативу другим видам интраоперационной визуализации и навигации, но на данный момент в широких кругах нейрохирургов остается недооцененным, и в российской литературе опыт его применения практически не отражен [27, 31, 54]. Усовершенствование трехмерной ультразвуковой безрамной навигации, применение УЗ-контрастных веществ, режима инверсии пульсации тканей повысит применимость данной методики [54, 72, 74]. Тем не менее, анализ зарубежной литературы и опыт нашей работы показывают, что ИОУЗИ позволяет значительно повысить качество интраоперационной визуализации. Учитывая соотношение простоты, доступности ИОУЗИ и объема предоставляемого им информации, дальнейшее изучение данного вопроса является актуальным и перспективным.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Левин Руслан Салаудиевич, врач-нейрохирург нейрохирургического отделения ФГБУ «РНЦХ им. акад. Б.В. Петровского» РАМН. 119991, Москва, Абрикосовский переулок, д.2, e-mail: dr.levin.neuro@yandex.ru

Васильев Сергей Амурабиевич, заведующий нейрохирургическим отделением ФГБУ «РНЦХ им. акад. Б.В. Петровского» РАМН, д.м.н. 119991, Москва, Абрикосовский переулок, д.2, e-mail: 2481129@mail.ru

Аслануков Марат Назирович, врач-нейрохирург нейрохирургического отделения ФГБУ «РНЦХ им. акад. Б.В. Петровского» РАМН. 119991, Москва, Абрикосовский переулок, д.2, e-mail: dr-aslan@rambler.ru

Зуев Андрей Александрович, заведующий нейрохирургическим отделением ФГБУ «Национальный медико-хирургический центр им. Н.И. Пирогова», к.м.н., e-mail: mosbrain@gmail.com,

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Амбарцумян А.М., Амбарцумян А.А. Возможности ультрасонографии головного мозга у взрослых. Нейрохирургия. 2004;4:31-33.[Ambarcumjan A.M., Ambarcumjan A.A. Vozmozhnosti ul'trasonografii golovno mozga u vzroslykh. Neurokhirurgiya. 2008;2:8-13. (In Russian)]
2. Благодатский М.Д., Онысько О.В., Александров Ю.А. Нейросонография в диагностике патологии головного мозга при тяжелой ЧМТ. Вопросы нейрохирургии им. Н. Н. Бурденко. 1995;4:19-22.[Blagodatskij M. D., Onys'ko O. V., Aleksandrov Ju. A. Neirosonografija v diagnostike patologii golovno mozga pri tjazhelej ChMT. Voprosy neirokhirurgii im. N.N. Burdenko. 1995;4:19-22. (In Russian)]
3. Васильев С.А., Песня-Прасолов С.Б., Фисенко Е.П. Интраоперационный контроль криодеструкции глиальных опухолей головного мозга. Медицинская визуализация. 2015;2:15-22.[Vasil'ev S.A., Pesnya-Prasolov S.B., Fisenko E.P. Intraoperative Monitoring of Glial Brain Tumors Cryodestruction. Meditsinskaya vizualizatsiya. 2015;2:15-22. (In Russian)]
4. Васильев С.А., Зуев А.А., Фисенко Е.П., Ветшева Н.Н. Хирургическое лечение опухолей головного мозга с использованием интраоперационной сонографии. Хирургия. Журнал им. Н.И. Пирогова. 2010;2:38-43.[Vasil'ev S.A., Zuev A.A., Fisenko E.P., Vetsheva N.N. The use of intraoperative sonography by surgical treatment of brain tumors. Khirurgiya. Zhurnal im. N.I. Pirogova. 2010;2:38-43. (In Russian)]
5. Васильев С.А., Зуев А.А. Ультразвуковая навигация в хирургии опухолей головного мозга. Часть 1. Нейрохирургия. 2010;3:9-13.[Vasil'ev S.A., Zuev A.A. Ultrasound navigation in surgery of brain tumors. Part 1. Neurokhirurgiya. 2010;3:9-13. (In Russian)]
6. Васильев С.А., Зуев А.А. Ультразвуковая навигация в хирургии опухолей головного мозга. Часть 2. Нейрохирургия. 2010;4:16-23.[Vasil'ev S.A., Zuev A.A. Ultrasound navigation in surgery of brain tumors. Part 2. Neurokhirurgiya. 2010;4:16-23. (In Russian)]
7. Гринь А.А., Григорьева Е.В. Лучевая диагностика позвоночно-спинномозговой травмы. Часть 2. Нейрохирургия. 2013;1:7-21.[Grin' A.A., Grigor'eva E.V. The radiology diagnostics of vertebral and spinal trauma. Part 2. Neurokhirurgiya. 2013;1:7-21. (In Russian)]
8. Зубарев А.Р., Древалъ О.Н., Ким Ю.Е., Рынков И.П., Тарасенко Т.Д. Интраоперационная ультразвуковая диагностика опухолей головного спинного мозга. Практика применения интраоперационной трехмерной реконструкции. Медицинская визуализация. 2005;2:28-33.[Zubarev A.R., Dreval' O.N., Kim Yu.E., Rynkov I.P., Tarasenko T.D. Intraoperating ultrasonography in the diagnosis of tumors of a brain and a spinal cord. an experience of application of a three-dimensional reconstruction. Meditsinskaya vizualizatsiya. 2005;2:28-33. (In Russian)]
9. Комков Д.Ю. Интраоперационная ультразвуковая навигация объемных образований головного мозга. Дис. на соиск. уч. ст. к.м.н. Санкт-Петербург; 2004.[Komkov D.Yu. Intraoperatsionnaya ul'trazvukovaya navigatsiya ob'emnykh obrazovanii golovno mozga. [dissertation] Saint Petersburg; 2004. (In Russian)]
10. Курамшин А.Ф., Сафин Ш.М., Валишин Р.А., Аверцев Г.Н., Васильева Н.К. Интраоперационное ультразвуковое исследование спинного мозга при острой позвоночно-спинномозговой травме. Хирургия позвоночника. 2007;4:14-20.[Kuramshin A.F., Safin Sh.M., Valishin R.A., Avertsev G.N., Vasil'eva N.K. Intraoperative Ultrasonography of the Spinal Cord in Acute Spinal Cord Injury. 2007;4:14-20. (In Russian)]
11. Лебедев В.В., Сарибекян А.С., Евзиков Г.Ю. Методика стереотаксической аспирации внутримозговых гематом с использованием данных ультразвукового сканирования. Вопросы нейрохирургии им. Н. Н. Бурденко. 1994;2:32-34.[Lebedev V.V., Saribekyan A.S., Evzikov G.Yu. Metodika stereotaksicheskoi aspiratsii vnutrimozgovykh gematom s ispol'zovaniem dannykh ul'trazvukovogo skanirvaniya. Voprosy neirokhirurgii im. N.N. Burdenko. 1994;2:32-34. (In Russian)]
12. Николаев А. Г. Ультразвуковое сканирование головного мозга в неотложной нейрохирургии: Дис. на соиск. уч. ст. к.м.н. М.; 1997. Доступно по: <http://search.rsl.ru/ru/record/01000127373> Ссылка активна на 05.05.2017.[Nikolaev A. G. Ul'trazvukovoe skanirovanie golovno mozga v neotlozhnoi neirokhirurgii. [dissertation] Moscow; 1997. (In Russian) Available at: <http://search.rsl.ru/ru/record/01000127373> Accessed 05.05.2017.]
13. Шулев Ю.А., Рычков В.Л., Трашин А.В., Шаманин В.А. Мигрирующая невринома конского хвоста (случай из практики). Российский нейрохирургический журнал имени профессора А.Л. Поленова. 2012;4(1):76-78.[Shulev Yu.A., Rychkov V.L., Trashin A.V., Shamanin V.A. Mobile schwannoma of the cauda equina (case report). Rossiiskii neirokhirurgicheskii zhurnal imeni professora A.L. Polenova. 2012;4(1):76-78. (In Russian)]
14. Aoyama T., Hida K., Akino M., et al. Detection of residual disc hernia material and confirmation of nerve root decompression at lumbar disc herniation surgery by intraoperative ultrasound. Ultrasound in Medicine & Biology. 2009;35(6):920-927. doi:10.1016/j.ultrasmedbio.2008.12.014.
15. Aoyama T., Hida K., Akino M. et al. Radiculopathy Caused by Lumbar Epidural Venous Varix. Neurologia medico-chirurgica. 2008;48(8):367-371. doi:10.2176/nmc.48.367.
16. Baba T., Koyanagi I., Yoshifuji K., et al. Pulsatile wall movement of spinal arachnoid cyst deteriorates spinal cord symptoms: report of three cases. Acta Neurochirurgica. 2009;152(7):1245-1249. doi:10.1007/s00701-009-0571-3.
17. Baskan O., Durdag E., Geyik S., Elmaci I. Spinal arteriovenous malformation: use of intraoperative color Doppler ultrasonography guidance for surgical resection. Case report. Medical Ultrasonography. 2014;16(4). doi:10.11152/mu.2013.2066.164.ozbl.
18. Bonsanto M., Metzner R., Aschoff A., et al. 3D ultrasound navigation in syrinx surgery — a feasibility study. Acta Neurochirurgica. 2005;147(5):533-541. doi:10.1007/s00701-005-0505-7.
19. Bozinov O., Burkhardt J., Woernle C., et al. Intraoperative high frequency ultrasound improves surgery of intramedullary cavernous malformations. Neurosurgical Review. 2011;35(2):269-275. doi:10.1007/s10143-011-0364-z.
20. Cui L., Jiang L., Zhang H. et al. Monitoring of cerebrospinal fluid flow by intraoperative ultrasound in patients with Chiari I malformation. Clinical Neurology and Neurosurgery. 2011;113(3):173-176. doi:10.1016/j.clineuro.2010.10.011.
21. Epstein F., Farmer J., Schneider S. Intraoperative ultrasonography: an important surgical adjunct for intramedullary tumors. Journal of Neurosurgery. 1991;74(5):729-733. doi:10.3171/jns.1991.74.5.0729.
22. Friedman J., Atkinson J., Lane J. Migration of an intraspinal schwannoma documented by intraoperative ultrasound: case report. Surgical Neurology. 2000;54(6):455-457. doi:10.1016/s0090-3019(00)00314-1.
23. Friedman J., Wetjen N. D., Atkinson J. utility of intraoperative ultrasound for tumors of the cauda equina. Spine. 2003;28(3):288-290. doi:10.1097/01.brs.0000042271.75392.e4
24. Fritz T., Klein A., Kriegelstein C. et al. Teaching model for intraoperative spinal sonography in spinal fractures. Archives of Orthopaedic and Trauma Surgery. 2000;120(3-4):183-187. doi:10.1007/s004020050040.
25. Gldsker S., Shah M., Hippchen B., et al. Doppler-Sonographically Guided Resection of Central Nervous System Hemangioblastomas. Operative Neurosurgery. 2011;68:ons267-ons275. doi:10.1227/neu.0b013e3182124677.
26. Gottfried O., Gluf W., Quinones-Hinojosa A., et al. Spinal meningiomas: surgical management and outcome. Neurosurgical Focus. 2003;14(6):1-7. doi:10.3171/foc.2003.14.6.2
27. Hall W., Nimsky C., Truwit C. Intraoperative MRI-Guided Neurosurgery. 1st ed. New York: Thieme; 2011.
28. Harel R., Knoller N. Intraoperative spine ultrasound: application and benefits. European Spine Journal. 2015;25(3):865-869. doi:10.1007/s00586-015-4222-5.
29. Holly L., Batzdorf U. Syringomyelia associated with intradural arachnoid cysts. Journal of Neurosurgery: Spine. 2006;5(2):111-116. doi:10.3171/spi.2006.5.2.111.
30. Iacopino D., Giusa M., Conti A., Cardali S., Tomasello F. Intraoperative microvascular Doppler monitoring of blood

- flow within a spinal dural arteriovenous fistula: a precious surgical tool. *Neurosurgical Focus*. 2001;10(2):1-5. doi:10.3171/foc.2001.10.2.6.
31. Ivanov M., Budu A., Sims-Williams H., Poeta I. Using intraoperative ultrasonography for spinal cord tumor surgery. *World Neurosurgery*. 2017;97:104-111. doi:10.1016/j.wneu.2016.09.097.
32. Jokich P., Rubin J., Dohrmann G. Intraoperative ultrasonic evaluation of spinal cord motion. *Journal of Neurosurgery*. 1984;60(4):707-711. doi:10.3171/jns.1984.60.4.0707.
33. Juthani R., Bilsky M., Vogelbaum M. Current management and treatment modalities for intramedullary spinal cord tumors. *Current Treatment Options in Oncology*. 2015;16(8).
34. Kane R., Kruskal J. Intraoperative Ultrasonography of the Brain and Spine. *Ultrasound Quarterly*. 2007;23(1):23-39. doi:10.1097/01.ruq.00000263840.92560.72.
35. Kanetaka M., Sugita S., Chikuda H., et al. Use of Doppler ultrasonography to detect an elusive communication of a spinal extradural arachnoid cyst. *Journal of Clinical Neuroscience*. 2011;18(6):863-864. doi:10.1016/j.jocn.2010.10.013.
36. Kawakami N., Mimatsu K., Kato F. Intraoperative sonography of intramedullary spinal cord tumours. *Neuroradiology*. 1992;34(5):436-439. doi:10.1007/bf00596511.
37. Kimura A., Seichi A., Inoue H. et al. Ultrasonographic quantification of spinal cord and dural pulsations during cervical laminoplasty in patients with compressive myelopathy. *European Spine Journal*. 2012;21(12):2450-2455. doi:10.1007/s00586-012-2430-9.
38. Kennedy B., Kelly K., Phan M., et al. Outcomes after suboccipital decompression without dural opening in children with Chiari malformation type I. *Journal of Neurosurgery: Pediatrics*. 2015;16(2):150-158. doi:10.3171/2014.12.peds14487.
39. Khan R., Rahman A., Bhandari P., Khan S. Double migration of a schwannoma of thoracic spine. *Case Reports*. 2013;2013(jan23) doi:10.1136/bcr-2012-008182.
40. Kim S., Kim H., Jang J., Lee S. Mobility of intradural extramedullary schwannoma at spine : report of three cases with literature review. *Journal of Korean Neurosurgical Society*. 2010;47(1):64. doi:10.3340/jkns.2010.47.1.64.
41. Lazennec J., Saillant G., Hansen S., Ramare S. Intraoperative ultrasonography evaluation of posterior vertebral wall displacement in thoracolumbar fractures. *Neurologia medico-chirurgica*. 1999;39(1):8-15. doi:10.2176/nmc.39.8.
42. Lerch K., Vulk M., Heers G., Baer W., Nerlich M. Ultrasound-guided decompression of the spinal canal in traumatic stenosis. *Ultrasound in Medicine & Biology*. 2002;28(1):27-32. doi:10.1016/s0301-5629(01)00489-6.
43. Litvack Z., Lindsay R., Selden N. Dura Splitting decompression for Chiari I malformation in pediatric patients. *Neurosurgery*. 2013;72(6):922-929. doi:10.1227/neu.0b013e31828caled.
44. Manzano G., Green B., Vanni S., Levi A. Contemporary management of adult intramedullary spinal tumors—pathology and neurological outcomes related to surgical resection. *Spinal Cord*. 2008;46(8):540-546. doi:10.1038/sc.2008.51.
45. Marin Sanabria E.A., Sih I.M., Tan K.K., Tan J.S. Mobile cauda equina schwannomas. *Singapore Med J*. 2007;48(2): 53-56.
46. Matsuzaki H., Tokuhashi Y., Wakabayashi K., et al. Differences on intraoperative ultrasonography between meningioma and neurilemmoma. *Neuroradiology*. 1998;40(1):40-44. doi:10.1007/s002340050536.
47. McGirt M., Attenello F., Dato G., et al. Intraoperative ultrasonography as a guide to patient selection for duraplasty after suboccipital decompression in children with Chiari malformation Type I. *Journal of Neurosurgery: Pediatrics*. 2008;2(1):52-57. doi:10.3171/ped/2008/2/7/052.
48. Mihara H., Kondo S., Takeguchi H., et al. Spinal cord morphology and dynamics during cervical laminoplasty. *Spine*. 2007;32(21):2306-2309. doi:10.1097/brs.0b013e318155784d.
49. Milhorat T., Bolognese P. Tailored Operative technique for Chiari type I malformation using intraoperative color doppler ultrasonography. *Neurosurgery*. 2003;53(4):899-906. doi:10.1227/01.neu.0000083591.22113.cb.
50. Miyashita T., Ataka H., Tanno T. Animated respiratory movement of a spinal intradural arachnoid cyst visualized by intraoperative ultrasonography. *Neurosurgical Review*. 2014;38(2):391-393. doi:10.1007/s10143-014-0598-7.
51. Mimatsu K., Kawakami N., Kato F., et al. Intraoperative ultrasonography of extramedullary spinal tumours. *Neuroradiology*. 1992;34(5):440-443. doi:10.1007/bf00596512.
52. Moon K., Filis A., Cohen A. Mobile spinal ependymoma. *Journal of Neurosurgery: Pediatrics*. 2010;5(1):85-88. doi:10.3171/2009.7.peds09244.
53. Montalvo B., Quencer R., Brown M., et al. Lumbar disk herniation and canal stenosis: value of intraoperative sonography in diagnosis and surgical management. *American Journal of Roentgenology*. 1990;154(4):821-830. doi:10.2214/ajr.154.4.2107683.
54. Moiyadi A., Shetty P. Objective assessment of utility of intraoperative ultrasound in resection of central nervous system tumors: A cost-effective tool for intraoperative navigation in neurosurgery. *Journal of Neurosciences in Rural Practice*. 2011;2(1):4. doi:10.4103/0976-3147.80077.
55. Naruse T., Yanase M., Takahashi H., et al. Prediction of Clinical Results of Laminoplasty for Cervical Myelopathy Focusing on Spinal Cord Motion in Intraoperative Ultrasonography and Postoperative Magnetic Resonance Imaging. *Spine*. 2009;34(24):2634-2641. doi:10.1097/brs.0b013e3181b46c00.
56. Nishimura Y., Thani N., Tochigi S., Ahn H., Ginsberg H. Thoracic discectomy by posterior pedicle-sparing, transfacet approach with real-time intraoperative ultrasonography. *Journal of Neurosurgery: Spine*. 2014;21(4):568-576. doi:10.3171/2014.6.spine13682.
57. O'Toole J., Eichholz K., Fessler R. Minimally invasive insertion of syringosubarachnoid shunt for posttraumatic syringomyelia. *Operative Neurosurgery*. 2007;61:E331-E332. doi:10.1227/01.neu.0000303990.03235.81.
58. Quencer R., Montalvo B., Green B., Eismont F. Intraoperative spinal sonography of soft-tissue masses of the spinal cord and spinal canal. *American Journal of Roentgenology*. 1984;143(6):1307-1315. doi:10.2214/ajr.143.6.1307.
59. Quencer R., Montalvo B. Normal intraoperative spinal sonography. *American Journal of Roentgenology*. 1984;143(6):1301-1305. doi:10.2214/ajr.143.6.1301.
60. Regelsberger J., Fritzsche E., Langer N., Westphal M. Intraoperative sonography of intra — and extramedullary tumors. *Ultrasound in Medicine & Biology*. 2005;31(5):593-598. doi:10.1016/j.ultrasmedbio.2005.01.016.
61. Sakanishi H., Hoshi K., Nakajima S., et al. Vertebral hemangioma compressing the thoracic spinal cord: application of computer-aided navigation and intraoperative spinal sonography for surgery through anterior and posterior approaches. *Journal of Orthopaedic Science*. 2006;11(3):294-297. doi:10.1007/s00776-005-1010-9.
62. Sasaki M., Aoki M., Yoshimine T. Mobile schwannoma of the cauda equina incarcerated following caudal migration after trauma. *Neurologia medico-chirurgica*. 2011;51(10):710-712. doi:10.2176/nmc.51.710.
63. Seichi A., Chikuda H., Kimura A. et al. Intraoperative ultrasonographic evaluation of posterior decompression via laminoplasty in patients with cervical ossification of the posterior longitudinal ligament: correlation with 2-year follow-up results. *Journal of Neurosurgery: Spine*. 2010;13(1):47-51. doi:10.3171/2010.3.spine09680.
64. Seki T., Hida K., Lee J., Yano S., Iwasaki Y. Intraoperative color doppler sonography in the surgical treatment of perimedullary arteriovenous fistula. *Neurologia medico-chirurgica*. 2005;45(2):100-103. doi:10.2176/nmc.45.100.
65. Sosna J., Barth M., Kruskal J., Kane R. Intraoperative Sonography for Neurosurgery. *Journal of Ultrasound in Medicine*. 2005;24(12):1671-1682. doi:10.7863/jum.2005.24.12.1671.
66. Sure U., Benes L., Bozinov O., et al. Intraoperative landmarking of vascular anatomy by integration of duplex and Doppler ultrasonography in image-guided surgery. *Technical note. Surgical Neurology*. 2005;63(2):133-142.
67. Terada Y., Toda H., Yokote A., Iwasaki K. A mobile schwannoma of the cervical spinal cord. *Neurosurgery*. 2016;78(1):E156-E159. doi:10.1227/neu.0000000000000975.
68. Tobin M., Geraghty J., Engelhard H., et al. Intramedullary spinal cord tumors: a review of current and future treatment strategies. *Neurosurgical Focus*. 2015;39(2):E14. doi:10.3171/2015.5.focus15158.
69. Toktas O., Sahin S., Koban O., et al. Is intraoperative ultrasound required in cervical spinal tumors ? a prospective study. *Turkish Neurosurgery*. 2012. doi:10.5137/1019-5149.jtn.7199-12.1.

70. Tubbs R., Webb D., Oakes W. Persistent syringomyelia following pediatric Chiari I decompression: radiological and surgical findings. *Journal of Neurosurgery: Pediatrics*. 2004;100(5):460-464. doi:10.3171/ped.2004.100.5.0460.
71. Unsgaard G., Gronningsaeter A., Ommedal S., Nagelhus Hernes T. Brain operations guided by real-time two-dimensional ultrasound: new possibilities as a result of improved image quality. *Neurosurgery*. 2002;51(2):402-412. doi:10.1227/00006123-200208000
72. Unsgaard G., Rygh O., Selbekk T., et al. Intra-operative 3D ultrasound in neurosurgery. *Acta Neurochirurgica*. 2006;148(3):235-253. doi:10.1007/s00701-005-0688-y.
73. Vetrano I., Prada F., Nataloni I., et al. Discrete or diffuse intramedullary tumor? Contrast-enhanced intraoperative ultrasound in a case of intramedullary cervicothoracic hemangioblastomas mimicking a diffuse infiltrative glioma: technical note and case report. *Neurosurgical Focus*. 2015;39(2):E17. doi:10.3171/2015.5.focus15162.
74. Vetrano I., Prada F., Erbetta A., DiMeco F. Intraoperative ultrasound and contrast-enhanced ultrasound (CEUS) features in a case of intradural extramedullary dorsal schwannoma mimicking an intramedullary lesion. *Ultraschall in der Medizin — European Journal of Ultrasound*. 2015. doi:10.1055/s-0034-1399669.
75. Wang M., Levi A., Green B. Intradural spinal arachnoid cysts in adults. *Surgical Neurology*. 2003;60(1):49-55. doi:10.1016/s0090-3019(03)00149-6.
76. Wang Y.Q., Liu X.G., Jiang L., et al. Intraoperative ultrasonography in “cave-in” 360° circumferential decompression for thoracic spinal stenosis. *Chinese medical journal*. 2011; 124(23): 3879-3885.
77. Yeh D., Koch B., Crone K. Intraoperative ultrasonography used to determine the extent of surgery necessary during posterior fossa decompression in children with Chiari malformation Type I. *Journal of Neurosurgery: Pediatrics*. 2006;105(1):26-32. doi:10.3171/ped.2006.105.1.26.
78. Zhang D., Papavassiliou E. Spinal Intradural arachnoid webs causing spinal cord compression with inconclusive preoperative imaging: a report of 3 cases and a review of the literature. *World Neurosurgery*. 2017;99:251-258. doi:10.1016/j.wneu.2016.12.015.
79. Zhou H., Miller D., Schulte D., et al. Intraoperative ultrasound assistance in treatment of intradural spinal tumours. *Clinical Neurology and Neurosurgery*. 2011;113(7):531-537. doi:10.1016/j.clineuro.2011.03.006.