

СОНОГРАФИЯ В СПИНАЛЬНОЙ ХИРУРГИИ

М.Н. Аслануков, С.А. Васильев, Р.С. Левин

Федеральное государственное бюджетное учреждение Российский Научный Центр Хирургии им. акад. Б.В. Петровского РАМН, Москва

В обзоре литературы проанализированы возможности применения ультразвукового исследования в спинальной хирургии. В частности, для навигации спинальных операций, интраоперационной визуализации, послеоперационного контроля.

Ключевые слова: интраоперационное ультразвуковое исследование, ультразвуковая анатомия позвоночника, чрескожные спинальные операции.

This literature review analyzed the possibilities of ultrasound examination in spinal surgery particularly for navigation during spinal surgery as well as for intraoperative visualization and postoperative control.

Key words: intraoperative ultrasound examination, ultrasound anatomy of vertebral column, transcutaneous spinal operations.

В спинальной минимально-инвазивной хирургии продолжают развиваться такие чрескожные операции, как вертебро- и кифопластика, дискэктомия и нуклеопластика, чрескожная транспедикулярная, межостистая и межтеловая стабилизация, введение лекарственных веществ в эпидуральное пространство, в межпозвоночные суставы. Чаще эти процедуры выполняют под рентгеновским контролем, реже используют безрамную нейронавигацию, интраоперационную КТ (МРТ). Между тем, навигацию с помощью ультразвуковых методов исследования (УЗИ) применяют анестезиологи и неврологи при выполнении нейроаксиальных, корешковых, внутрисуставных блокад. Очевидно, что подобная навигация могла бы быть использована и спинальными хирургами, открывая новые возможности в хирургии позвоночника.

Методы интраоперационной визуализации продолжают привлекать внимание спинальных хирургов, что обусловлено их стремлением к визуализации в реальном времени структур, недоступных прямому осмотру. Ультразвуковое сканирование является простым и доступным методом интраоперационной визуализации, имеет определенные преимущества перед безрамной нейронавигацией и интраоперационной КТ (МРТ) и применяется в хирургии объемных образований спинного мозга, спинномозговой травмы, аномалий развития нервной системы, дегенеративных заболеваний позвоночника.

Преимуществами использования УЗИ в спинальной хирургии являются: возможность визуализации в реальном времени структур, скрытых от прямого осмотра, отсутствие рентгеновского облучения, широкая доступность оборудования.

История использования УЗИ для выполнения спинальных вмешательств

Одной из первых научных работ по изучению ультразвука был труд британского физика John

Strutt (Baron Rayleigh) «Теория звука», опубликованный в 1887 г. В 1880 г. французскими физиками Pierre Curie и Paul-Jacques Curie был изучен пьезоэлектрический эффект. В 1937 г. австрийский невролог Karl Dussik пытался использовать 1,5 МГц датчик для диагностики опухоли головного мозга [48]. Первая спинальная инъекция под контролем УЗИ — поясничная пункция, была выполнена отечественными неврологами И.Н. Богинным и И.Д. Стулиным в 1971 г. [1]. В 1978 г. M. Reid первым применил УЗИ для интраоперационной визуализации в нейрохирургии [61]. В 1980 г. R. Corg одним из первых описал ультразвуковую анатомию позвоночника и спинномозговых нервов [10]. С 2001 по 2004 г. T. Grau и соавт. опубликовали ряд научных работ по проведению эпидуральной анестезии под контролем УЗИ [19–22, 67].

С помощью УЗИ можно визуализировать практически все структуры позвоночника. Информативность интраоперационного УЗИ сопоставима с данными МРТ. УЗИ имеет определенные преимущества перед МРТ и КТ. В отличие от МРТ, УЗИ доступнее и дешевле, нет таких ограничений, как большая масса тела пациента, наличие металлических имплантатов или осколков, тяжелое состояние пациента. А в отличие от КТ, при УЗИ нет рентгеновского облучения [2, 3, 5, 7, 9, 29, 52].

Технология навигации с помощью УЗИ чрескожных спинальных операций

Для выполнения пункции под контролем УЗИ врачу необходимы знания ультразвуковой анатомии позвоночника, владение основами УЗИ, отработка техники пункции на фантоме. Традиционно используют низкочастотные конвексные ультразвуковые датчики с частотой 2–5 МГц, потому что они дают возможность широкого обзора и большой глубины сканирования (до 20–

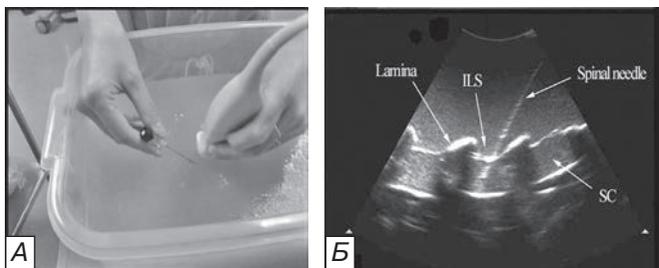


Рис. 1. А — отработка техники поясничной нейроаксиальной блокады с помощью желатин-агарового фантома поясничного отдела позвоночника. В — соответствующий скан УЗИ в сагиттальной парамедианной плоскости. Lamina — дуга позвонка, ILS — междужковый промежуток, Spinal needle — спиальная игла, SC — позвоночный канал.

Источник — Li J.W., Phil M., Karmakar M.K., Li X., Kwok W.H., Kee W.D.N. Gelatin-Agar Lumbosacral Spine Phantom. A Simple Model for Learning the Basic Skills Required to Perform Real-time Sonographically Guided Central Neuraxial Blocks// J. Ultrasound Med. — 2011. — Vol. 30. — P. 263–272.

Fig. 1. A — the training of lumbar neuroaxial blocks technique using the gelatin-agar lumbosacral spine phantom. B — the corresponding ultrasound scan in sagittal paramedian plane. Lamina — vertebral arch, ILS — interlamine space, Spinal needle — spinal needle, SC — spinal canal.

Origin — Li J.W., Phil M., Karmakar M.K., Li X., Kwok W.H., Kee W.D.N. Gelatin-Agar Lumbosacral Spine Phantom. A Simple Model for Learning the Basic Skills Required to Perform Real-time Sonographically Guided Central Neuraxial Blocks// J. Ultrasound Med.-2011.-Vol. 30.-P. 263–272.

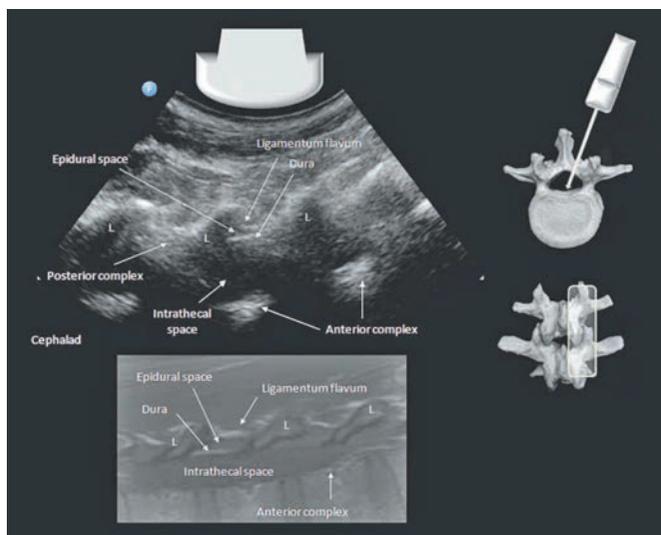


Рис. 2. УЗИ поясничного отдела позвоночника задним парамедиальным сагиттальным косым доступом. Скан УЗИ (вверху) в сопоставлении с аналогичным срезом МРТ в T1 режиме (внизу). Справа показано положение датчика УЗИ. Ligamentum flavum — желтая связка, dura — твердая мозговая оболочка, epidural space — эпидуральное пространство, posterior complex — задний комплекс, intrathecal space — интракостальное пространство, anterior complex — передний комплекс, cephalad — краниально.

Источник — Chin K.J., Karmakar M.K., Peng P. Ultrasonography of the Adult Thoracic and Lumbar Spine for Central Neuraxial Blockade// Anesthesiology. — 2011. — Vol. 114, № 6. — P. 1466.

Fig. 2. The ultrasound examination of lumbar spine using the posterior paramedian sagittal oblique approach. The ultrasound scan (at the top) is in comparison with the analogous MRI scan in T1 regime (at the bottom). The position of ultrasound probe is shown at the right. Ligamentum flavum, dura, epidural space, posterior complex, intrathecal space, anterior complex, cephalad. Origin — Chin K.J., Karmakar M.K., Peng P. Ultrasonography of the Adult Thoracic and Lumbar Spine for Central Neuraxial Blockade// Anesthesiology. — 2011. — Vol. 114, № 6. — P. 1466.

25 см). При изучении ультразвуковой анатомии исследователь сопоставляет анатомию модели позвоночника, погруженной в воду, с ультразвуковой картиной этой модели, учитывая положение и плоскость сканирования датчика УЗИ [33, 51, 65]. Для отработки техники пункции под контролем УЗИ используют фантом позвоночника, залитый водной смесью желатина и агар-агара (рис. 1) [38].

Используют различные плоскости ультразвукового сканирования (доступы), которые определяются положением ультразвукового датчика: парамедиальный сагиттальный доступ на уровне поперечных отростков, парамедиальный сагиттальный доступ на уровне суставных отростков, парамедиальный сагиттальный косой доступ, поперечный доступ на уровне остистых отростков, поперечный межпозвоночный доступ [23].

Край затылочной кости, раздвоенные концы остистых отростков C2 и С6 являются хорошими ориентирами для их верификации [39].

При сканировании грудного отдела позвоночника задним поперечным доступом удается визуализировать остистые и поперечные отростки, дуги, ребра и плевру. При парамедиальном сагиттальном положении датчика видны гиперэхогенные линии задних поверхностей ребер с акустической тенью под ними. Наличие ребра является важным признаком для дифференциации T12 и L1 позвонков [11].

При сканировании пояснично-крестцового отдела позвоночника задним парамедиальным сагиттальным косым доступом видна характерная зигзагообразная линия от дуг поясничных позвонков. Через междужковые промежутки визуализируются желтая связка, эпидуральное пространство, задний листок твердой мозговой оболочки (ТМО), субдуральное пространство, передний листок ТМО, задняя продольная связка, задняя поверхность тела позвонка (рис. 2) [11, 25, 32].

При смещении датчика в каудальном направлении появляется горизонтальная гиперэхогенная линия от крестца. Промежуток между этой линией и тенью дуги пятого поясничного позвонка будет являться межпозвоночным промежутком L5-S1 [11, 26]. При заднем поперечном межпозвоночном поясничном доступе визуализируются межостистый и междужковый промежутки, содержимое позвоночного канала (рис. 3) [11].

При сканировании крестцового отдела позвоночника задним доступом визуализируются срединный, промежуточные и латеральные крестцовые гребни, задние крестцовые отверстия, подвздошно-крестцовые сочленения, крестцово-копчиковый сустав, крестцовые рога и крестцовая шель [39].

Ряд факторов влияют на точность инъекции под контролем УЗИ: правильная ориентация в ультразвуковой анатомии с определением анатомических ориентиров и маркировкой их проекций на коже; точное определение места пункции кожи, траектории движения иглы, глубины инъекции, положения иглы относительно датчика УЗИ; хорошая визуализация иглы в ходе

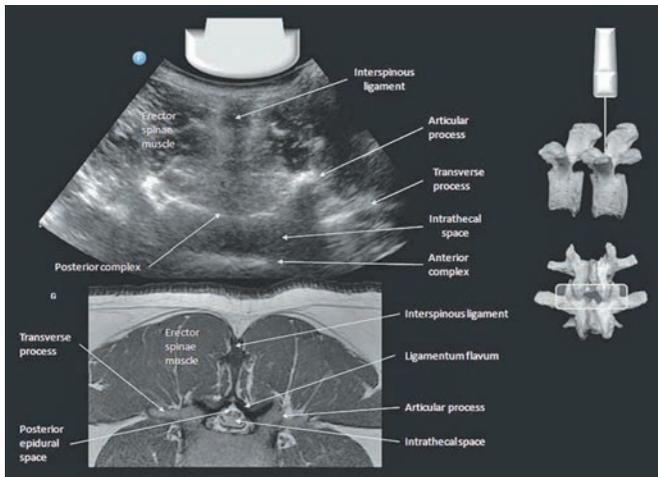


Рис. 3. УЗИ поясничного отдела позвоночника задним поперечным межпозвоночным доступом. Скан УЗИ (вверху) и соответствующий скан МРТ в режиме T1 (внизу). Справа отмечено положение датчика УЗИ. Interspinous ligament — межостистая связка, articular process — суставной отросток, transverse process — поперечный отросток, intrathecal space — интратекальное пространство, anterior complex — передний комплекс, posterior complex — задний комплекс, erector spinae muscle — мышца, выпрямляющая спину, ligamentum flavum — желтая связка, posterior epidural space — заднее эпидуральное пространство.

Источник — Chin K.J., Karmakar M.K., Peng P. Ultrasonography of the Adult Thoracic and Lumbar Spine for Central Neuraxial Blockade// Anesthesiology.-2011. — Vol. 114, № 6. — P. 1470.

Fig. 3. The ultrasound examination of lumbar spine using posterior transverse intervertebral approach. The ultrasound scan (at the top) is in comparison with the analogous MRI scan in T1 regime (at the bottom). The position of ultrasound probe is shown at the right. Interspinous ligament, articular process, transverse process, intrathecal space, anterior complex, posterior complex, erector spinae muscle, ligamentum flavum, posterior epidural space.

Origin — Chin K.J., Karmakar M.K., Peng P. Ultrasonography of the Adult Thoracic and Lumbar Spine for Central Neuraxial Blockade// Anesthesiology. — 2011. — Vol. 114, № 6. — P. 1470.

инъекции [63, 64]. Для визуализации иглы на УЗИ необходимо, чтобы она находилась в зоне сканирования датчика. Обычная ширина ультразвукового луча составляет 1 мм, поэтому техника визуализации иглы сложна. Даже при незначительных отклонениях датчика УЗИ или иглы последняя легко теряется из вида [12]. Качество визуализации иглы зависит от угла, под которым на неё попадают ультразвуковые лучи. Чем ближе этот угол к 90 градусам, тем больше отражающая способность иглы для ультразвука и тем лучше её визуализация. Также для улучшения визуализации игл используют такие технологии как 4D-УЗИ, полимерные покрытия игл, рифление кончика иглы, иглы с вибрирующим стилетом, контрастные агенты [13, 34, 41, 49, 50, 66].

Возможности интраоперационного УЗИ в спинальной хирургии

Традиционно используют высокочастотные датчики УЗИ. Сканирование проводят в различных плоскостях. Кроме серотональной ви-

зуализации в В-режиме, используют также режим цветового доплеровского картирования. Цереброспинальная жидкость (ЦСЖ) на ультразвуковых изображениях эхонегативная и однородная. ТМО спинного мозга видна как тонкая гиперэхогенная линейная структура. Корешки, спинномозговые нервы и конский хвост представлены линейными образованиями с ровными гиперэхогенными внешними контурами и гипоэхогенной внутренней структурой. Спинной мозг изоэхогенный с мелкозернистыми эхопозитивными сигналами, причем периферические его отделы более эхогенные, чем центральные [4, 62].

Применение УЗИ в хирургии опухолей спинного мозга позволяет на операции уточнить локализацию опухоли и оценить особенности её взаимоотношения со спинным мозгом. По УЗИ можно предполагать характер опухоли. Например, такие интрамедуллярные новообразования, как глиомы и метастазы, обычно гиперэхогенны, а эпендимомы, астроцитомы и дермоидные кисты могут содержать гиперэхогенные области кальцификации [35, 44, 60].

Экстрамедуллярные новообразования, такие как менингиомы, нейрофибромы, метастазы рака, липомы, дермоидные кисты, как правило, гиперэхогенны по отношению к спинному мозгу, смещают и сдавливают его [42]. Масс-эффект может быть вызван неопухолевым процессом: костным фрагментом, грыжей диска, гематомой, кистой, абсцессом. УЗИ помогает избежать ранения сосудов и ткани спинного мозга, выбрать оптимальное место миелотомии, контролировать радикальность удаления опухоли [16, 39, 43, 57]. Интраоперационное УЗИ также используют для точной и безопасной пункционной биопсии опухоли, аспирации кист [40]. Актуально использовать УЗИ в хирургии объемных образований конского хвоста, учитывая вероятность их миграции во время операции [17, 18].

При сирингомиелических кистах на предоперационных МРТ оценивают локализацию, величину и распространенность кисты, выявляют наличие в ней перемычек, определяют сопутствующую патологию. УЗИ помогает точно локализовать кисту и избежать излишне широкого доступа, делает видимым и контролируемым процесс заведения катетера в кисту и в субарахноидальное пространство, помогает оценить состоятельность декомпрессии, исключить формирование гематомы или ликвореи [15, 53, 54].

Рядом исследований показана высокая эффективность интраоперационного УЗИ и доплерографии при острой позвоночно-спинномозговой травме в оценке локальных поражений и гемодинамических нарушений в области травматических изменений спинного мозга. Возможно выявить компримирующие спинной мозг субстраты, недоступные прямой визуализации (костные отломки, секвестр грыжи диска, гематому, инородное тело), оценить радикальность декомпрессии, обнаружить патологическую подвижность в позвоночно-двигательном сегменте. Методика проста, доступна, не увеличивает время проведения

операции, сопоставима по информативности с данными МРТ [4, 45, 55, 58].

На этапе до вскрытия ТМО УЗИ позволяет оценить степень компрессии спинного мозга, размеры переднего и заднего субарахноидальных пространств и скорость ликворотока в них, определить локализацию и размеры кисты. Во время кисто-субарахноидального шунтирования УЗИ помогает выбрать место пункции кисты и адекватно расположить концы шунта. После пластики ТМО по УЗИ можно оценить состоятельность декомпрессии спинного мозга, степень улучшения ликворотока, изменения размеров кисты [28, 30, 69].

Интраоперационную сонографию применяют на операциях по поводу грыжи диска, стеноза позвоночного канала, спондилолистеза [36, 46]. Актуальность интраоперационной визуализации в реальном времени в спинальной хирургии обусловлена довольно частыми случаями неполной хирургической декомпрессии нервных структур [8]. При поясничной микродискэктомии, декомпрессии поясничного стеноза по УЗИ можно дифференцировать такие ткани позвоночника, как кость, диск, секвестр грыжи, эпидуральный жир,

эпидуральные вены, нервные корешки, ЦСЖ, оценить их анатомические взаимоотношения. На этапе декомпрессии нервных структур УЗИ позволяет локализовать секвестр грыжи, оценить степень и характер стеноза позвоночного канала, а после декомпрессии выявить неудаленные секвестры грыжи диска, определить адекватность декомпрессии нервных структур (рис. 4) [47, 56].

Ткань секвестра грыжи диска на УЗИ имеет вид плотной структуры с ровными и четкими границами, в котором могут определяться яркие сигналы от кальциатов. Выявляется выбухание диска, деформирующее контур дурального мешка и корешка. Боковые и фораминальные грыжи диска визуализируются хуже срединных и парамедианных, в связи с затененностью костными структурами. Эпидуральный жир находится симметрично по периферии дурального мешка и имеет при УЗИ вид мягкотканной структуры с гиперэхогенными характеристиками. Эпидуральные вены при УЗИ имеют вид гипозоногенных структур внутри эпидурального пространства и верифицируются в режиме доплера. Эпидуральный рубец бывает сложно дифференцировать с эпидуральным жиром или секвестром грыжи, поскольку он может иметь сигнал различной интенсивности. Отличительной особенностью рубца является то, что он сливается с ТМО, не имея с ней границы. Если рубец располагается позади ТМО, то он может ослаблять луч и мешать визуализации дурального мешка и диска. Отечный нервный корешок выглядит круглой структурой с ровными краями, однако его легко можно спутать с грыжей диска, поскольку он может иметь такую же эхогенность и иметь четкие границы. Верификации дурального мешка и нервного корешка также помогает их пульсация, видимая на УЗИ. Смещения тел позвонков относительно друг друга можно выявить при сканировании в сагиттальной плоскости [6, 27].

При передней декомпрессии спинного мозга на шейном уровне во время микродискэктомии или переднего спондилодеза хирургу не удается визуализировать спинной мозг и оценить его пульсацию, поскольку он скрыт за задней продольной связкой, в связи с чем приходится её иссекать. Так же сложно исключить компрессию спинного мозга мигрировавшим фрагментом грыжи диска или задними остеофитами [31]. Интраоперационное УЗИ на этапе до декомпрессии позволяет визуализировать межпозвоночный диск, непосредственно грыжу диска, передние и задние остеофиты тел позвонков, а также спинной мозг и нервные корешки, оценить степень их компрессии, выявить очаговые изменения в спинном мозге. После декомпрессии оценивают её адекватность, наличие дополнительных субстратов компрессии, состояние спинного мозга [37, 59, 70].

При операции задней декомпрессии спинного мозга и ламинопластики на шейном уровне аналогично используют УЗИ до и после декомпрессии [43].

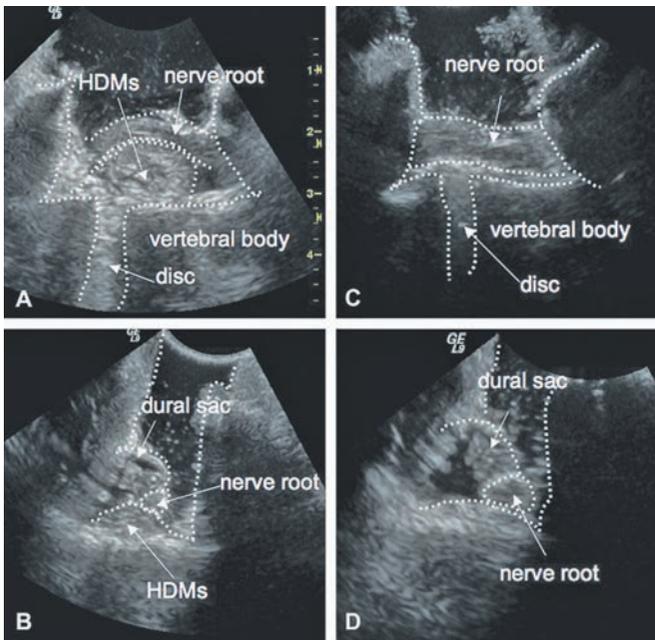


Рис. 4. Интраоперационная ультразвуковая картина при поясничной микродискэктомии в сагиттальной (А) и аксиальной (В) плоскостях до удаления грыжи диска и после (С, D). HDMs — секвестр грыжи, nerve root — нервный корешок, vertebral body — тело позвонка, disc — межпозвоночный диск. Источник — Aoyama T., Hida K., Akino M., Yano S., Iwasaki Y. 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. — Vol. 35, № 6. — P. 920-927.

Fig. 4. The intraoperative ultrasound image during lumbar microdiscectomy in sagittal (A) and axial (B) planes before and after hernia removal (C, D). HDMs — hernial sequester, nerve root, vertebral body, disc — intervertebral disc. Origin — Aoyama T., Hida K., Akino M., Yano S., Iwasaki Y. 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. — Vol. 35, № 6. — P. 920-927.

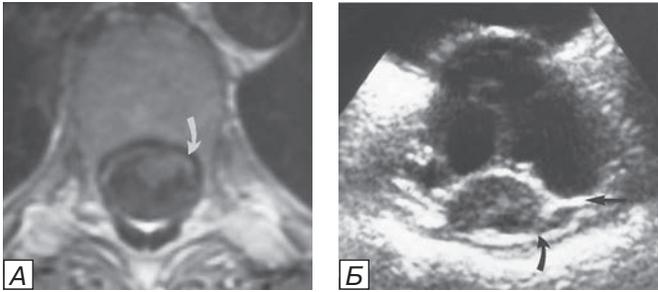


Рис. 5. Случай спонтанной трансдуральной миграции секвестра грыжи диска Т7-Т8. Слева аксиальный срез МРТ в Т1-режиме (секвестр отмечен стрелкой), справа аналогичный интраоперационный скан УЗИ в аксиальной плоскости (прямая стрелка — ТМО, изогнутая стрелка — секвестр).
 Источник — Dix J. E., Griffitt W., Yates C., Johnson B. Spontaneous Thoracic Spinal Cord Herniation through an Anterior Dural Defect// Am. J. Neuroradiol. — 1998.-Vol.19.-P. 1345—1348.
 Fig. 5. The clinical case of спонтанной transdural migration of T7-T8 hernial sequester. The axial MRI scan in T1 regime is at the left (sequester is shown by arrow), the analogous intraoperative axial ultrasound scan is at the right (straight arrow — dura mater, curved arrow — sequester).
 Origin — Dix J. E., Griffitt W., Yates C., Johnson B. Spontaneous Thoracic Spinal Cord Herniation through an Anterior Dural Defect// Am. J. Neuroradiol. — 1998. — Vol.19. — P. 1345—1348.

Интраоперационное УЗИ используют и на грудном уровне с целью контроля радикальности декомпрессии при стенозах позвоночного канала, грыже диска (рис. 5) [14, 68].

Заключение

Преимуществами навигации спинальных инъекций (нейроаксиальные, корешковые, внутрисуставные блокады) с помощью УЗИ являются: визуализация в реальном времени, отсутствие облучения, широкая доступность оборудования. В литературе не было обнаружено работ по навигации с помощью УЗИ нейрохирургических спинальных операций. УЗИ могло бы использоваться в спинальной нейрохирургии для навигации таких чрескожных спинальных операций, как дискография, дерецепция диска, нуклеопластика, фасетопластика. Также возможно использовать УЗИ для идентификации междужкового и межостистого промежутков и навигации чрескожных доступов при эндоскопической микродискэктомии, чрескожной транспедикулярной фиксации, чрескожной межостистой стабилизации.

Интраоперационное УЗИ является простым, широкодоступным и эффективным методом интраоперационной визуализации и успешно применяется в хирургии объемных образований спинного мозга, спинномозговой травмы, аномалий развития нервной системы, дегенеративных заболеваний позвоночника. При этом УЗИ имеет определенные преимущества перед безрамной нейронавигацией и интраоперационной КТ (МРТ): возможность визуализации в реальном времени структур скрытых от прямого осмотра, отсутствие рентгеновского облучения, широкая доступность оборудования. В отечественной литературе, в отличие от зарубежной, имеется всего несколько статей, посвященных интраоперационному УЗИ

в спинальной хирургии. Обосновано более глубокое изучение возможностей интраоперационного УЗИ в спинальной хирургии.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Аслануков Марат Назирович — нейрохирург нейрохирургического отделения Российского научного центра хирургии им. акад. Б.В. Петровского РАМН, e-mail: dr-aslan@rambler.ru

Левин Руслан Салаудиевич — нейрохирург нейрохирургического отделения Российского научного центра хирургии им. акад. Б.В. Петровского РАМН, e-mail: neurosurgery@mail.med.ru

Васильев Сергей Амурабиевич — д-р мед. наук, зав. нейрохирургическим отделением Российского научного центра хирургии им. акад. Б.В. Петровского РАМН, e-mail: dr-vasil@yandex.ru

ЛИТЕРАТУРА

1. *Богин Ю.Н., Стулин И.Д.* О применении метода двумерной экзоспондилографии для определения ориентиров при осуществлении люмбальной пункции // Журнал невропатологии и психиатрии им. С.С.Корсакова. — 1971. — Том 71, № 12.-С. 1810-1811.
2. *Гаврелюк С.В., Андреева И.В., Виноградов А.А.* Особенности ультразвуковой анатомии изолированного сегмента позвоночника //Український морфологічний альманах.-2008. — Том 6, № 3.-С.27-29.
3. *Кинзерский С.А.* Оптимизация ультразвуковой диагностики остеохондроза позвоночника с использованием заднего интерламинарного доступа: Автореф. дис. Кинзерского Сергея Александровича канд. мед. наук: 14.00.19/Уральская государственная медицинская академия.-Томск, 2009.
4. *Курмишин А.Ф., Сафин Ш.М., Валишин Р.А. et al.* Интраоперационное ультразвуковое исследование спинного мозга при острой позвоночно-спинномозговой травме//Хирургия позвоночника.-2007.-№ 4.-С. 14—20.
5. *Олти Дж., Хоуи Э., Вульстенхульм С.* и др. Ультразвуковое исследование / пер. с англ. под ред. В.А. Сандрикова. — М.: ГЭОТАР-Медиа, 2010. — С.256.
6. *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.-Vol. 35, № 6. — P. 920-927.
7. *Boos N., Aebi M.*eds. Spinal Disorders. Fundamentals of Diagnosis and Treatment. — Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 2008. — P.247.
8. *Burton C.V., Kirkaldy-Willis W.H, Yong-Hing K., Heithoff K.B.* Causes of failure of surgery on the lumbar spine//Clin. Orthop.-1981.-Vol. 157.-P. 191-199.
9. *Benzel E.C.* Spine surgery: techniques, complication avoidance, and management. — Elsevier Inc., 2005-P. 1781.
10. *Cork R.C., Kryc J.J., Vaughan R.W.* Ultrasonic localization of the lumbar epidural space// Anesthesiology. — 1980.-Vol.52.-513— 516.
11. *Chin K.J., Karmakar M.K., Peng P.* Ultrasonography of the Adult Thoracic and Lumbar Spine for Central Neuraxial Blockade// Anesthesiology.-2011. — Vol. 114, № 6. — P. 1459-1485.
12. *Chin K.J., Perlas A., Chan V.W., Brull R.* Needle visualization in ultrasound-guided regional anesthesia: challenges and solutions//Reg. Anesth. Pain Med. — 2008.-Vol. 33, №6. — P. 532—544.
13. *Culp J.C., McCowan T.C., Goertzen T.C. et al.* Relative ultrasonographic echogenicity of standard, dimpled, and polymeric-coated needles// J. Vasc. Interv. Radiol. — 2000.-Vol. 11, № 3.-P. 351—358.
14. *Dix J. E., Griffitt W., Yates C., Johnson B.* Spontaneous Thoracic Spinal Cord Herniation through an Anterior Dural Defect// Am. J. Neuroradiol. — 1998.-Vol.19.-P. 1345—1348.

15. *Dohrmann G.J., Rubin J.M.* Intraoperative ultrasound imaging of the spinal cord: syringomyelia, cysts and tumors — a preliminary report//Surg. Neurol.-1982.-Vol. 18.-P.395-399.
16. *Feldtzer J. A., Waters D. C., Knake J. E., Hoff J. T.* Anterior Cervical Epidural Abscess: The Use of Intraoperative Spinal Sonography// Surg. Neurol.-1986.-Vol. 25.-P.105-108.
17. *Friedman J.A., Atkinson J.L., Lane J.I.* Migration of an intraspinal schwannoma documented by intraoperative ultrasound: case report// Surg. Neurol. — 2000.-Vol.54.-P. 455—457.
18. *Friedman J.A., Wetjen N.M., Atkinson J.L.* Utility of intraoperative ultrasound for tumors of the cauda equine// Spine.-2003.-Vol. 28.-P. 288—290.
19. *Grau T., Bartussek E., Conradi R.* et al. Ultrasound imaging improves learning curves in obstetric epidural anesthesia: A preliminary study// Can. J. Anaesth. — 2003.-Vol.50.-P. 1047—1050.
20. *Grau T., Conradi R., Martin E., Motsch J.* Ultrasound and local anaesthesia. Part III: Ultrasound and neuroaxial local anaesthesia//Anaesthesist. — 2003.-Vol. 52.-P. 68 —73.
21. *Grau T., Leipold R., Conradi R.* et al. Ultrasonography and peridural anesthesia. Technical possibilities and limitations of ultrasonic examination of the epidural space//Anaesthesist. — 2001.-Vol. 50.-P. 94 —101.
22. *Grau T., Leipold R.W., Fatehi S.* et al. Real-time ultrasonic observation of combined spinal-epidural anaesthesia//Eur. J. Anaesthesiol. — 2004.-Vol. 21.-P.25—31.
23. *Grau T., Leipold R.W., Horter J.* et al. The lumbar epidural space in pregnancy: Visualization by ultrasonography// Br. J. Anaesth. — 2001.-Vol. 86.-P. 798 — 804.
24. *Grau T., Leipold R.W., Delorme S.* et al. Ultrasound imaging of the thoracic epidural space//Reg. Anesth. Pain Med. — 2002.-Vol. 27.-P. 200 — 206.
25. *Grau T., Leipold R.W., Horter J.* et al. Paramedian access to the epidural space: The optimum window for ultrasound imaging// J. Clin. Anesth. — 2001.-Vol. 13.-P.213—217.
26. *Grau T., Leipold R.W., Horter J.* et al. Colour Doppler imaging of the interspinous and epidural space// Eur. J. Anaesthesiol. — 2001.-Vol. 18.-P. 706 —712.
27. *Gooding G.A.W., Boggan J.E., Weinstein P.R.* Intraoperative sonography during lumbar laminectomy: work in progress. American Journal of Neuroradiology.-1984.-Vol. 5.-P. 751-753.
28. *Hida K., Iwasaki Y., Koyanagi I.* et al. Surgical indication and results of foramen magnum decompression versus syringo subarachnoid shunting for syringomyelia associated with Chiari I malformation//Neurosurgery. — 1995.-Vol. 37.-P. 673—678.
29. *Huntton M.A.* Ultrasound in pain medicine: advanced weaponry or just a fad?//Reg. Anesth. Pain Med. — 2009.-Vol.34, №5.-P. 387—388.
30. *Isu T., Sasaki H., Takamura H., Kobayashi N.* Foramen magnum decompression with removal of the outer layer of the dura as treatment for syringomyelia occurring with Chiari I malformation// Neurosurgery. — 1993.-Vol. 33 .-P. 844—849.
31. *Imamura H., Iwasaki Y., Hida K.* et al. Intraoperative Spinal Sonography in the Cervical Anterior Approach//Neurologia medico-chirurgica. — 1995.-Vol. 35, № 3.-P. 144 — 147.
32. *Irwin D. M., Gofeld M.* Ultrasound-Guided Lumbar Zygopophysial (Facet) Nerve Block//Narouze S.N.ed. Atlas of Ultrasound-Guided Procedures in Interventional Pain Management .-Springer Science+Business Media,2011. — Ch.10.-P. 149-156.
33. *Karmakar M.K., Li X., Kwok W.H.* et al. Sonoanatomy relevant for ultrasound-guided central neuraxial blocks via the paramedian approach in the lumbar region// The British Journal of Radiology.-2012.-Vol. 85. — P. e262—e269.
34. *Klein S.M., Fronheiser M.P., Reach J.* et al. Piezoelectric vibrating needle and catheter for enhancing ultrasound-guided peripheral nerve blocks// Anesth. Analg. — 2007.-Vol. 105, № 6. — P. 1858—1860.
35. *Knake J.E., Chandler W.F., McGillicuddy J.E.* et al. Intraoperative sonography of intraspinal tumors: Initial experience// Am. J. Neuroradiol. — 1983.-Vol. 4.-P. 1199—1201.
36. *Koivukangas J., Tervonen O.* Intraoperative ultrasound imaging in lumbar herniation surgery//Acta Neurochir. — 1989.-P. 47—54.
37. *Kawakami N., Mimatsu K., Kato F.* et al. Intraoperative ultrasonographic evaluation of the spinal cord in cervical myelopathy//Spine.-1994.-Vol.19.-P. 34—41.
38. *Li J.W., Phil M., Karmakar M.K., Li X., Kwok W.H., Kee W.D.N.* Gelatin-Agar Lumbosacral Spine Phantom. A Simple Model for Learning the Basic Skills Required to Perform Real-time Sonographically Guided Central Neuraxial Blocks// J. Ultrasound Med.-2011.-Vol. 30.-P. 263—272.
39. *Moriggl B.* Spine Anatomy and Sonoanatomy for Pain Physicians//Narouze S.N.ed. Atlas of Ultrasound-Guided Procedures in Interventional Pain Management .-Springer Science+Business Media,2011. — Ch.5.-P. 79-105.
40. *Matsuzaki H., Tokuhashi Y., Wakabayashi K.* et al. Differences on intraoperative ultrasonography between meningioma and neurilemmoma//Neuroradiology.-1998.-Vol. 40.-P. 40—44.
41. *Maecken T., Zenz M., Grau T.* Ultrasound characteristics of needles for regional anesthesia// Reg. Anesth. Pain Med. — 2007.-Vol. 32, № 5.-P. 440—447.
42. *Mimatsu K., Kawakami N., Kato F.* et al. Intraoperative ultrasonography of extramedullary spinal tumours// Neuroradiology. — 1992.-Vol. 34.-P. 440—443.
43. *Mirvis S.E., Geisler F.H.* Intraoperative sonography of cervical spinal cord injury: results in 30 patients// Am J. Roentgenol.-1990. — Vol.155,№3, P. 603-609.
44. *Maiuri F., Iaconetta G., Gallicchio B., Stella L.* Intraoperative sonography for spinal tumors: correlations with MR findings and surgery// J. Neurosurg. Sci.-2000.-Vol. 44.-P. 115—122.
45. *Montalvo B.M., Quencer R.M., Green B.A.* et al. Intraoperative sonography in spinal trauma// Radiology.-1984.-Vol. 153.-P.125-134.
46. *Montalvo B.M., Quencer R.M.* Intraoperative sonography in spinal surgery: current state of the art//Neuroradiology.-1986.-Vol. 28 .-P. 551-590.
47. *Montalvo B.M., Quencer R.M., Brown M.D.* et al. Lumbar Disk Herniation and Canal Stenosis: Value of intraoperative Sonography in Diagnosis and Surgical Management//Am. J. Roentgenol. — 1990.-Vol. 154.-P. 821-830.
48. *Newman P. G., Rozycki G. S.* The history of ultrasound// Surgical Clinics of North America.-1998.-Vol. 78, Issue 2 — P. 179-195.
49. *Nichols K., Wright L.B., Spencer T., Culp W.C.* Changes in ultrasonographic echogenicity and visibility of needles with changes in angles of insonation//J. Vasc. Interv Radiol. — 2003.-Vol. 14, № 12.-P. 1553—1557.
50. *Perrella R.R., Kimme-Smith C., Tessler F.N.* et al. A new electronically enhanced biopsy system: value in improving needle-tip visibility during sonographically guided interventional procedures// Am. J. Roentgenol.-1992.-Vol.158, №1.-P. 195—198.
51. *Pollard B.A.* New model for learning ultrasound-guided needle to target localization// Reg. Anesth. Pain Med. — 2008.-Vol.33,№4.-P. 360—362.
52. *Peng P.W., Narouze S.* Ultrasound-guided interventional procedures in pain medicine: a review of anatomy, sonoanatomy, and procedures: part I: nonaxial structures// Reg. Anesth. Pain Med.-2009.-Vol.34, №5.-P. 458—474.
53. *Quencer R.M., Morse B.M.M., Green B.A.* et al. Intraoperative spinal sonography: adjunct to metrizamide CT in the assessment and surgical decompression of posttraumatic spinal cord cysts// American Journal of Neuroradiology.-1984.-Vol. 5.-P.71-79.
54. *Quencer R.M., Montalvo B.M., Naidich T. P.* et al. Intraoperative sonography in spinal dysraphism and syringohydromyelia// American Journal of Neuroradiology.-1987.-Vol. 8.-P.329-337.
55. *Quencer A.M., Montalvo B.M.* Time requirements for intraoperative neurosonography//American Journal of Neuroradiology.-1986.-Vol. 7.-P. 155-158.
56. *Quencer A.M., Montalvo B.M.* Normal intraoperative spinal sonography//American Journal of Neuroradiology.-1984.-Vol.5.-P. 501 — 505.
57. *Quencer A.M., Montalvo B.M., Green B.A., Eismont F.J.* Intraoperative spinal sonography of soft-tissue masses of the spinal cord and spinal canal//American Journal of Neuroradiology.-1984.-Vol. 5.-P. 507-515.
58. *Quencer R.M., Montalvo B.M., Eismont F.J., Green B.A.* Intraoperative spinal sonography in thoracic and lumbar fractures: evaluation of Harrington rod instrumentation// American Journal of Neuroradiology.-1985.-Vol. 6.-P.353-359.

59. *Raynor R.B.* Intraoperative ultrasound for immediate evaluation of anterior cervical decompression and discectomy//*Spine.*-1997.-Vol. 22, №4.-P. 389-395.
60. *Regelsberger J., Fritzsche E., Langer N., Westphal M.* Intraoperative sonography of intra — and extramedullary tumors//*Ultrasound Med. Biol.* — 2005.-Vol. 31.-P. 593—598.
61. *Reid M. H.* Ultrasonic visualization of a cervical cord cystic astrocytoma// *Am. J. Roentgenol.* — 1978.-Vol. 131.-P. 907—908.
62. *Sosna J., Barth M.M., Kruskal J.B., Kane R.A.* Intraoperative Sonography for Neurosurgery//*J. Ultrasound Med.*-2005.-Vol. 24.-P. 1671—1682.
63. *Sites B.D., Spence B.C., Gallagher J.D.* et al. Characterizing novice behavior associated with learning ultrasound-guided peripheral regional anesthesia// *Reg. Anesth. Pain Med.* — 2007.-Vol.32, № 2.-P. 107—115.
64. *Sites B.D., Brull R., Chan V.W.* et al. Artifacts and pitfall errors associated with ultrasound-guided regional anesthesia. Part II: a pictorial approach to understanding and avoidance// *Reg. Anesth. Pain Med.* 2007.-Vol. 32, № 5.-P. 419—433.
65. *Tsui B., Dillane D., Pillay J., Walji A.* Ultrasound imaging in cadavers: training in imaging for regional blockade at the trunk//*Can. J. Anaesth.* — 2008. — Vol.55, №2.-P. 105—111.
66. *Tsui B.C., Doyle K., Chu K.* et al. Case series: ultrasound-guided supraclavicular block using a curvilinear probe in 104 day-case hand surgery patients// *Can. J. Anaesth.* — 2009.-Vol.56,№1.-P.46—51.
67. *Warner D. S.* Ultrasonography of the Adult Thoracic and Lumbar Spine for Central Neuraxial Blockade//*Anesthesiology.* — 2011.-Vol. 114, № 6. — P. 1459.
68. *Wang Y., Liu X., Jiang L.* et al. Intraoperative ultrasonography in “cave-in” 360° circumferential decompression for thoracic spinal stenosis// *Chinese Medical Journal.*-2011.-Vol.124, №23.-P. 3879-3885.
69. *Yeh D.D., Koch B., Crone K.R.* Intraoperative ultrasonography used to determine the extent of surgery necessary during posterior fossa decompression in children with Chiari malformation type I//*J. Neurosurg.* — 2006.-Vol.105.-P. 26—32.
70. *Yamaoka K.* Significance of intraoperative ultrasonography in anterior spinal operation// *Spine.*-1989.-Vol.14.-P. 1192-1197.