

ЛЕКЦИЯ

© С.А. ВАСИЛЬЕВ, А.А. ЗУЕВ, 2010

**УЛЬТРАЗВУКОВАЯ НАВИГАЦИЯ
В ХИРУРГИИ ОПУХОЛЕЙ ГОЛОВНОГО МОЗГА. Часть 2**

С.А. Васильев, А.А. Зув

* Российский научный центр хирургии им. акад. Б.В. Петровского РАМН, отделение нейрохирургии

Комплексное лечение пациентов с опухолями головного мозга позволяет улучшить качество их жизни, увеличить показатели выживаемости в этой группе больных. Степень удаления опухоли имеет ключевое значение в достижении этих целей. Сонография — один из методов интраоперационной визуализации, позволяющий проводить диагностику в режиме реального времени. Несмотря на достаточную простоту исследования, в нейрохирургических клиниках России она применяется редко. Показано, что интраоперационная сонография — безопасный, технически надежный метод нейронавигации новообразований в режиме реального времени, независимо от размеров и глубины расположения опухоли, исключающий проблемы, связанные со смещением мозга. Во второй главе описаны ультразвуковые характеристики различных опухолей головного мозга, методика проведения биопсии опухоли под контролем сонографии и преимущества ее перед другими методами нейронавигации.

Ключевые слова: опухоль головного мозга, интраоперационная сонография.

Complex treatment of patients with brain tumors allows improving their quality of life and increasing the survival rate for these patients. The maximal tumor removal plays the key role in achievement of these goals. Sonography is one of the intraoperative methods for visualization, which allows performing diagnostics in real-time mode. This method of examination is rare used in neurosurgical departments of Russian hospitals in spite of its enough simplicity.

It was demonstrated that intraoperative sonography is safe and technically reliable neuronavigation method of tumors in real-time mode irrespective of tumor sizes and depth of tumor localization, excluding the problems associated with brain dislocation.

Second part describes the ultrasound characteristics of various brain tumors, methodology of tumor biopsy under control of sonography and also the advantages of sonography in front of the other methods of neuronavigation.

Key words: brain tumor, intraoperative sonography.

При проведении интраоперационного ультразвукового исследования менингиомы, глиомы, лимфомы и метастазы обычно гиперэхогенны по отношению к окружающей ткани мозга и зоне перифокального отека. Анэхогенную структуру имеют кистозные образования (кисты различного генеза, кистозные астроцитомы или области распада злокачественных образований). Размер и форма опухолей при проведении УЗ-сканирования совпадают с данными предоперационных КТ или МРТ.

Глиомы

Глиомы чрезвычайно разнообразны по их эхогенности: кистозные компоненты всегда гипоэхогенны и в большинстве случаев имеют четко установленные границы, солидный компонент опухоли неоднороден, что обусловлено трабекулами, которые не видны при других методах нейровизуализации. Изо- или немного гиперэхогенные области, которые на КТ и МРТ имеют низкую интенсивность, на операции представлены очагами некроза (рис. 1—4).

Метастазы

Метастазы обычно имеют гомогенную изо- или гиперэхогенную структуру с хорошо выра-

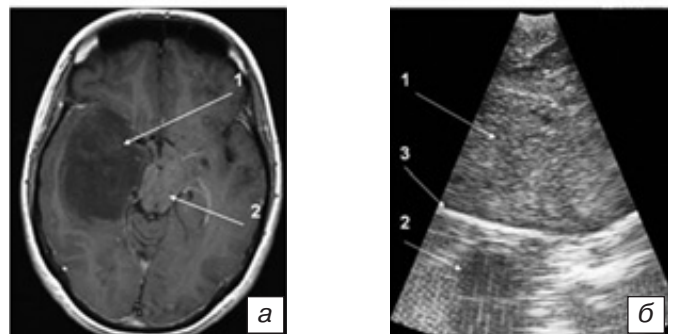


Рис. 1. Пилоцитарная астроцитомы (1 степень злокачественности, Grade I): *a* — МРТ в T1-взвешенном изображении, аксиальная проекция. Определяется астроцитомы (1) правой височной доли, не накапливающая контраст, без перифокального отека, компримирующая ствол мозга (2); *б* — интраоперационная сонография (ИС) до вскрытия ТМО. На полученном изображении хорошо визуализируется гипоэхогенная ткань опухоли (1), с ровными, умеренно четкими границами. Опухоль плотно прилегает к намету мозжечка (гиперэхогенная белая полоса) (3). Хорошо виден ствол мозга (2). Fig. 1. Pilocytic astrocytoma (Grade I): *a* — MRI, T1, axial view. There is the astrocytoma (1) in the right temporal lobe, without contrast accumulation and perifocal edema, causing the compression of brainstem (2); *б* — intraoperative sonography before opening the dura mater. The hypoechoic tumor tissue (1) with straight and moderate distinct borders is well seen on performed image. The tumor is tightly adjacent to tentorium of cerebellar (hypoechoic white zone) (3). The brainstem is well detected (2).

* 119992, Москва, Абрикосовский переулок, 2.

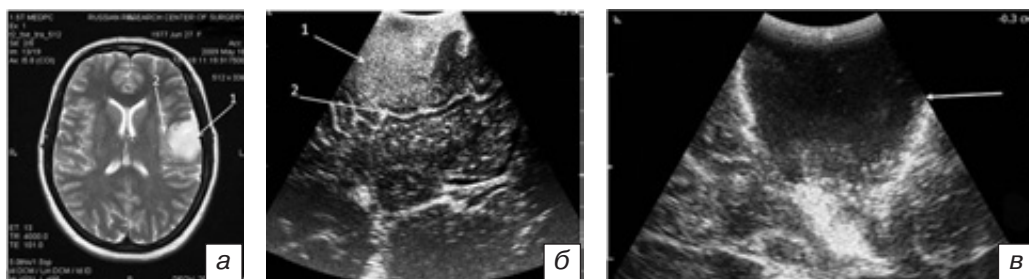


Рис. 2. Фибриллярная астроцитома (II степень злокачественности, Grade II): *a* — МРТ в T2-взвешенном изображении, аксиальная проекция. Определяется астроцитома (1) левой височной доли, без перифокального отека, медиальными отделами прилегающая к островку (2); *б* — интраоперационная сонография до вскрытия ТМО. На полученном изображении хорошо визуализируется гиперэхогенная ткань опухоли (1), границы умеренно четкие, ровные. Хорошо видна гиперэхогенная борозда (2), отделяющая височную долю от островка; *в* — интраоперационная сонография — определяется гипоэхогенная полость в зоне удаленной опухоли (стрелка).

Fig. 2. Fibrillar astrocytoma (Grade II): *a* — MRI, T2, axial view. There is the astrocytoma (1) in the right temporal lobe, without contrast accumulation and perifocal edema, with its medial parts adjacent to insula (2); *б* — intraoperative sonography before opening the dura mater. The hyperechoic tumor tissue (1) with straight and moderate distinct borders is well seen on performed image. There is the hyperechoic sulcus (2), separated the temporal lobe from insula; *в* — intraoperative sonography — hypoechoic cavity in the region of removed tumor (arrow).

Рис. 3. Анапластическая астроцитома (III степень злокачественности, Grade III): *a* — МРТ в T2-взвешенном изображении, аксиальная проекция. Определяется опухоль в левой лобной доле, с зоной перифокального отека (2) и выраженным масс-эффектом; *б* — ИС до вскрытия ТМО. На полученном изображении хорошо визуализируется гиперэхогенная ткань с участками гипоэхогенных включений, гетерогенная ткань опухоли (1), границы нечеткие, неровные. Опухоль содержит гипоэхогенные кисты (2); *в* — ИС — определяется гипоэхогенная полость в зоне удаленной опухоли (стрелка).

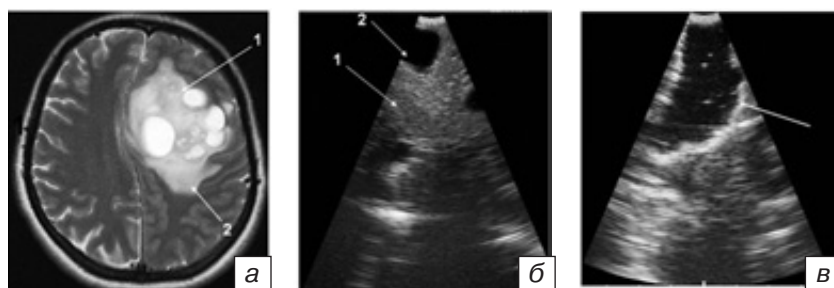


Fig. 3. Anaplastic astrocytoma (Grade III): *a* — MRI, T2, axial view. There is the astrocytoma (1) in the left frontal lobe with perifocal edema (2) and expressed mass-effect; *б* — intraoperative sonography before opening the dura mater. The hyperechoic with hypoechoic parts heterogeneous tumor tissue (1) with irregular vague borders is well seen on performed image. The tumor contains hypoechoic cysts (2); *в* — intraoperative sonography — hypoechoic cavity in the region of removed tumor (arrow).

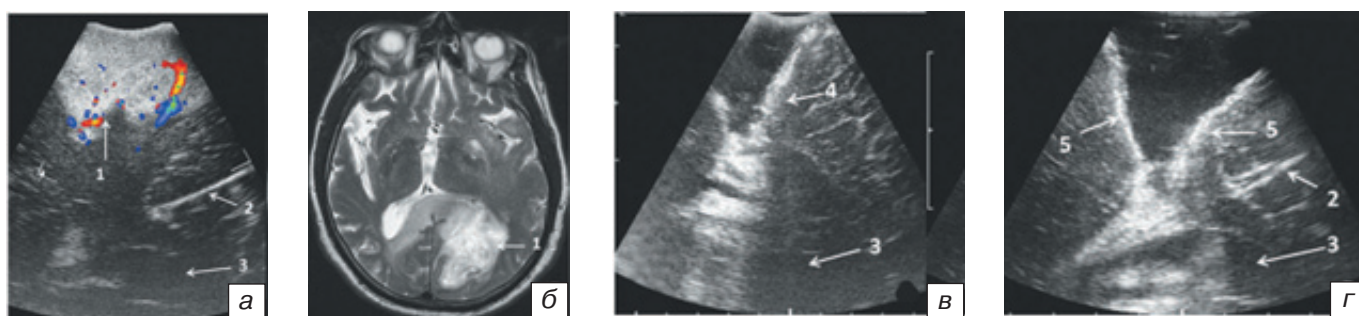


Рис. 4. Данные ИС, МРТ головного мозга пациента Г. с глиобластомой левой затылочной доли: *a* — ИС, выполненная до вскрытия ТМО — определяется гиперэхогенное образование (1) с четкими, неровными контурами, с зоной перифокального отека, умеренно васкуляризованная. Определяется гиперэхогенный серповидный отросток (2), гипоэхогенный задний рог правого бокового желудочка (3); *б* — МРТ головного мозга в T2-режиме в аксиальной проекции — в левой затылочной доле определяется гиперденсивное образование (1), с перифокальным отеком, сдавливающее задний рог левого бокового желудочка; *в* — ИС после визуального полного удаления опухоли — в области дна и боковой стенки резекционной полости определяется остаточная ткань опухоли (4), подтвержденная гистологически. Определяется гипоэхогенный задний рог правого бокового желудочка (3); *г* — ИС после удаления остаточной ткани опухоли — визуализируется гипоэхогенное ложе опухоли, заполненное жидкостью, окруженное гиперэхогенным валиком (5) («ring-effect», эффект кольца), ткани опухоли вокруг не выявляется. Определяется гиперэхогенный серповидный отросток (2), гипоэхогенный задний рог правого бокового желудочка (3).
 Fig. 4. Data of intraoperative sonography (IS) and MRI of patient Г. with glioblastoma in the left occipital lobe: *a* — intraoperative sonography before opening the dura mater: there is the hyperechoic moderate vascularized lesion (1) with irregular vague borders and perifocal edema, hyperechoic cerebral falx (2), hypoechoic posterior horn of right lateral ventricle (3); *б* — brain MRI, T2, axial view — the hyperdense lesion (1) with perifocal edema, compressing the posterior horn of left lateral ventricle is seen in the left occipital lobe; *в* — intraoperative sonography after visually total tumor removal — the remnant tissue (4) is detected in the region of fundus and lateral wall of resection cavity, confirmed by histology. There is the hypoechoic posterior horn of right lateral ventricle (3); *г* — intraoperative sonography after removal of remnant tumor tissue — the hypoechoic bed, filled with liquid and surrounded by hyperechoic валиком (5) («ring-effect») is seen with no remnant tumor tissue. There are also hyperechoic cerebral falx (2) and hypoechoic posterior horn of right lateral ventricle (3).

женными границами. Если в структуре опухоли имеются кисты или некрозы, то это выглядит гипоэхогенными включениями в центре образования (рис. 5–7).

Менингиомы

Менингиомы в большинстве своем представлены гиперэхогенными образованиями и всегда четко отграничены от окружающей ткани мозга. Внутренняя часть опухоли чаще гомогенна, старые плотные части опухоли имеют более высокую эхогенность. В некоторых случаях хорошо

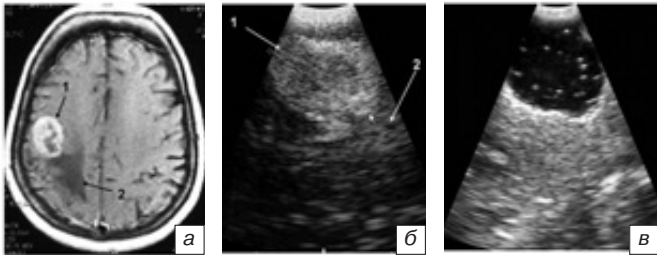


Рис. 5. МРТ головного мозга и ИС пациентки с метастазом рака яичника в правой теменной доле: *a* — T1-взвешенное изображение, МРТ головного мозга с контрастированием в аксиальной проекции — визуализируется опухоль (1). Вокруг метастаза определяется зона отека (2); *б* — ИС — определяется гиперэхогенное округлое образование (1) с четкими, ровными контурами, с гиперэхогенной зоной перифокального отека (2); *в* — интраоперационная сонография — определяется гипоэхогенная полость в зоне удаленной опухоли. Fig. 5. Brain MRI and IS of patient with ovarian cancer metastasis into the right parietal lobe: *a* — Brain MRI, T1, axial view — the tumor (1) is detected with perifocal edema (2) around metastasis; *б* — intraoperative sonography — there is the hyperechoic round-shaped lesion (1) with straight distinct borders and hyperechoic perifocal edema (2); *в* — intraoperative sonography — the hypoechoic cavity in the region of removed tumor is seen.

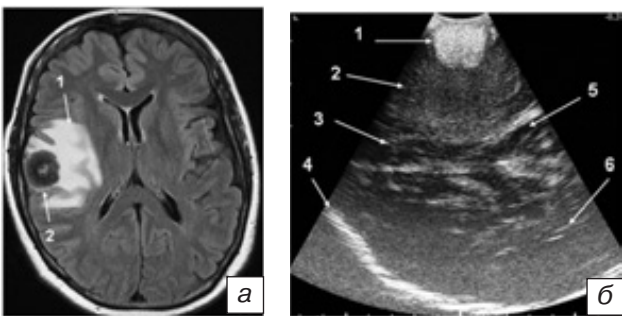


Рис. 6. МРТ головного мозга и ИС пациентки с метастазом аденокарциномы сигмовидной кишки в правой височной доле: *a* — МРТ головного мозга во FLAIR-режиме в аксиальной проекции — визуализируется округлая опухоль (1), с выраженной зоной перифокального отека (2); *б* — ИС — определяется гиперэхогенное округлое образование (1) с четкими, ровными контурами, с гиперэхогенной зоной перифокального отека (2). Нормальная ткань мозга. (3). Задний рог правого бокового желудочка (5). Противоположная полушарие (6). Височная кость противоположной стороны (4). Fig. 6. Brain MRI and IS of patient with metastasis of sigmoid adenocarcinoma into the right temporal lobe: *a* — brain MRI, FLAIR, axial view — the round-shaped tumor (1) with expressed perifocal edema (2) is seen; *б* — intraoperative sonography — there is the hyperechoic round-shaped lesion (1) with straight distinct borders and hyperechoic perifocal edema (2). Normal brain tissue (3). Posterior horn of right lateral ventricle (5). Contralateral hemisphere (6). Temporal bone from the opposite side (4).

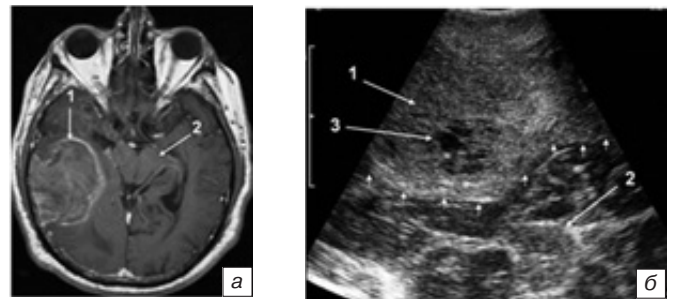


Рис. 7. МРТ головного мозга и ИС пациента И., 62 лет с метастазом низкодифференцированного рака в правой височной доле: *a* — МРТ головного мозга в T1-режиме с контрастированием, в аксиальной проекции — визуализируется опухоль (1), интенсивно накапливающая контраст по периферии. Ствол мозга (2); *б* — ИС — определяется гиперэхогенное образование (1) с четкими, ровными контурами (маленькие стрелки), с гипоэхогенной кистой внутри опухоли (зона некроза) (3). Ствол мозга (2); *в* — Контрольная МРТ (через 19 ч после операции) головного мозга, T2-взвешенное изображение. Остаточной ткани опухоли нет. В зоне удаленной опухоли определяется киста с содержимым ликворной плотности. Fig. 7. Brain MRI and IS of patient И., 62 years old, with metastasis of low differentiated carcinoma into the right temporal lobe: *a* — Brain MRI, T1 with contrast, axial view — the tumor (1) with intensively peripheral accumulating of contrast is seen. Brainstem (2); *б* — intraoperative sonography — there is the hyperechoic lesion (1) with distinct straight borders (little arrows) and with hypoechoic cyst inside the tumor (necrosis zone) (3). Brainstem (2); *в* — Control brain MRI (in 19 hours after operation), T2. There is no remnant tumor tissue. The cyst with liquor density contents in the region of removed tumor.

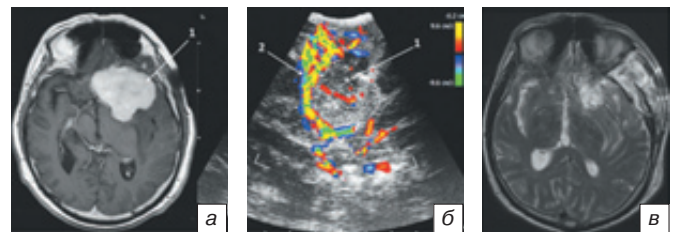


Рис. 8. МРТ и ИС с использованием доплерографического режима у пациента с менингиомой крыла основной кости слева: *a* — МРТ пациента с менингиомой крыла основной кости слева, T1-взвешенное изображение, аксиальная проекция. Определяется крупных размеров опухоль (1), интенсивно накапливающая контрастное вещество, сдавливающая артерии основания черепа (внутреннюю сонную, среднюю, переднюю мозговые артерии); *б* — менингиома (гиперэхогенное объемное образование с ровными контурами и четкими границами (1), средняя мозговая артерия, огибающая опухоль (2)); *в* — МРТ через 12 ч после операции — определяется зона отека в проекции удаленной опухоли, остаточной ткани опухоли нет. Fig. 8. MRI and intraoperative sonography with Doppler mode usage at patient with meningioma of left sphenoid wing: *a* — MRI, T1, axial view. The large-sized tumor (1), intensively accumulating the contrast agent and compressing the arteries of cranial base (internal carotid artery, middle and anterior cerebral arteries), is seen; *б* — meningioma (hyperechoic mass lesion with straight contours and distinct borders (1), middle cerebral artery, circumflex the tumor (2); *в* — MRI in 12 hours after operation — the edema zone is seen in the projection of removed tumor. There are no signs of remnant tumor tissue.

визуализируются кальцинаты и участки некроза. Иногда между тканью опухоли и мозгом обнаруживается ободок цереброспинальной жидкости,

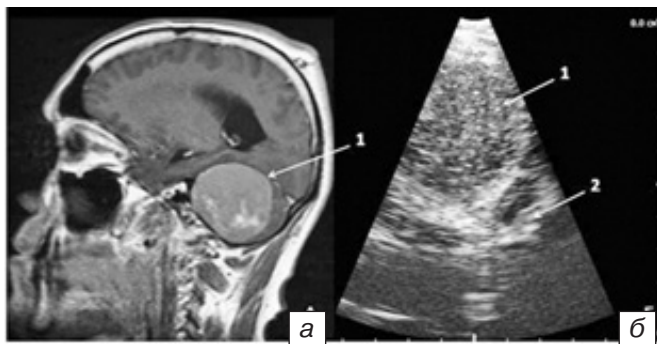


Рис. 9. МРТ и ИС пациента с менингиомой задней поверхности пирамиды височной кости: *а* — Т1-взвешенное изображение МРТ головного мозга в сагиттальной проекции, на которой определяется большая менингиома, накапливающая контраст, занимающая практически всю заднюю черепную ямку; *б* — ИС до вскрытия ТМО, при которой определяется округлое гиперэхогенное образование (менингиома) с четкими ровными контурами, прилежащее к костным структурам (2).
 Fig. 9. MRI and intraoperative sonography at patient with meningioma on posterior petrosal surface: *a* — MRI, T1, sagittal view: the large meningioma, accumulating the contrast and occupying almost all posterior cranial fossa, is seen; *б* — intraoperative sonography before dura mater opening, which reveals the round-shaped hyperechoic lesion (meningioma) with straight distinct contours, adjacent to bone structures (2).

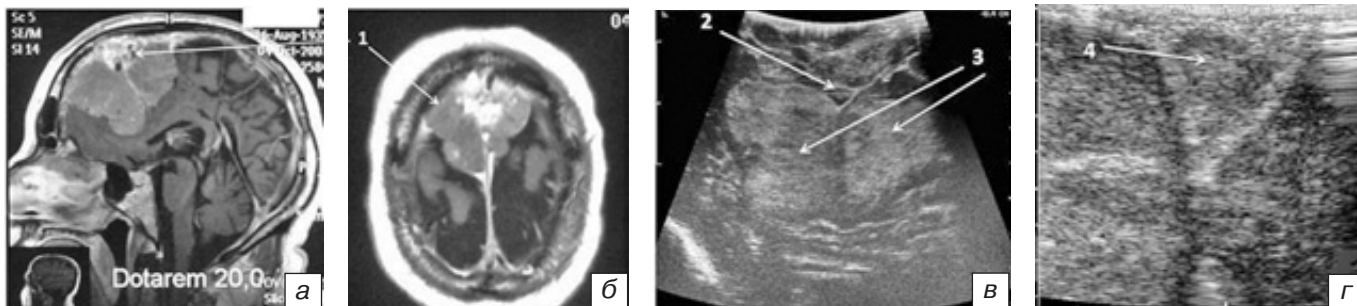


Рис. 10. МРТ и ИС пациента с гигантской менингиомой передней трети серповидного отростка: *а, б* — Т1-взвешенное изображение МРТ головного мозга в сагиттальной проекции, на которой определяется гигантская менингиома (1) передней трети фалькса; *в* — ИС до вскрытия ТМО, при которой определяется гиперэхогенное образование (менингиома) (3) с умеренно четкими неровными контурами, располагающееся с обеих сторон от верхнего сагиттального синуса (2) и серповидного отростка; *г* — ИС до вскрытия ТМО. Верхний сагиттальный синус обтурирован опухолью (4).
 Fig. 10. MRI and intraoperative sonography at patient with giant meningioma of anterior third of cerebral falx: *а, б* — MRI (T1, sagittal view) revealed the giant meningioma (1) of falx anterior third; *в* — intraoperative sonography before opening the dura mater — hyperechoic lesion (meningioma) (3) with irregular moderate distinct contours, placing on both sides from superior sagittal sinus (2) and cerebral falx; *г* — intraoperative sonography before dura mater opening. The superior sagittal sinus obturation by tumor (4).

что усиливает четкость границ и показывает хирургу, где опухоль в высокой степени изолирована от своего ложа и где она плотно прилежит к окружающим тканям. Особый интерес сонография приобретает для оценки инвазии менингиомы в просвет синуса (рис. 8–10).

Использование ИС позволяет получить важную информацию о пациенте с менингиомами, растущими из стенок синусов. При помощи доплерографии и цветного В-режима сканирования удастся оценить степень прорастания опухоли в просвет синуса и протяженность опухоли в нем.

При обтурации просвета синуса опухолевыми массами и отсутствии кровотока в нем производится резекция синуса в этом месте. Границей резекции является область синуса, свободная от опухоли и с сохраненным кровотоком по данным ИС.

При прорастании опухоли одной из стенок синуса производится ее резекция в месте инвазии опухоли (по данным ИС) с последующей пластикой синуса.

При удалении внутримозговых опухолей во время проведения ультразвукографии в 2–10% случаев выявляется остаточная ткань опухоли, невидимая в микроскоп, которая приводит к возникновению рецидивов и вынуждает к проведению повторных операций [21]. Метод ИС позволяет избежать подобных ошибок. В 90% наблюдений гиперэхогенная ткань, оставшаяся после резекции новообразования под контролем оптики и выявленная при

ИС, является остатками опухолевой ткани, что подтверждается гистологически [11].

При проведении сонографии после удаления опухоли в стенке резекционной полости всегда определяется «эффект кольца» [18]. Данный эффект связан с «грубыми» стенками полости, что изменяет сигнал и выглядит как гиперэхогенный тонкий ободок (толщиной не более 2 мм) по краю резекционной полости. Данное изображение не стоит расценивать как опухолевую ткань. По данным некоторых авторов, «кольцо» менее плотное или вовсе отсутствует в месте, где имеется остаточная ткань опухоли [19].

В некоторых случаях, когда вокруг опухоли имеется выраженный отек или глиоз, верификация опухоли становится затруднительной. Однако несмотря на инфильтративный характер роста многих новообразований, они имеют склонность к смещению кровеносных сосудов, которое может быть выявлено при доплерографии и тем самым косвенно определены края новообразования. Также затруднена визуализация краев опухоли, если пациент проходил лучевую терапию. Использование ультразвукового контрастирования способствует улучшению визуализации нечетких границ опухоли. Контрастные вещества для ультразвуковых исследований — это усиители эхо-сигналов, которые представляют собой микропузырьки с газом, обладающие высоким коэффициентом отражения ультразвуковых волн.

Начало применения данной методики относится к концу 1960-х годов, когда в качестве контрастных агентов применялись крошечные пузырьки воздуха, проникающие в кровь вместе с вводимым физиологическим раствором [8].

Средний диаметр пузырьков 2—7 микрон. Таким образом, они меньше эритроцитов и, следовательно, риска эмболии капилляров нет. После внутривенного введения препарат в течение нескольких минут остается в кровотоке, а затем газ постепенно элиминируется из крови через легкие, а оболочки микропузырьков метаболизируются. Контрастные препараты не нефротоксичны, аллергические реакции на них наблюдаются крайне редко. Современные методы ультразвуковой визуализации основаны на так называемых нелинейных акустических свойствах микропузырьков. Под воздействием ультразвуковых волн микропузырьки начинают колебаться. Колебания пузырьков имеют сильную тенденцию к резонированию. Сочетание акустического возбуждения и резонансной частоты обеспечивает сильный гармонический ответ (эхо-сигнал) микропузырьков.

В последнее время появилась возможность использования 3D ультразвуковой навигации, при которой сканирование проводится в нескольких плоскостях, что позволяет получать на экране монитора трехмерное изображение и облегчить ориентацию хирурга. Также созданы платформы для интеграции полученных при 3D-сонографии данных в безрамные навигационные системы [10]. В некоторых системах данные о смещении мозга, полученные при ультразвуковом сканировании, используются только для коррекции изображений, полученных на предоперационных МРТ [16]. В других навигационных системах изображение, полученное при нейросонографии, обрабатывается навигационной системой и становится основой для расчета координат, причем менять изображение во время операции таким образом можно несколько раз. При смещении мозга новые изображения могут быть получены в течение нескольких минут, к тому же инструменты могут быть подведены непосредственно к образованию [2, 6].

Оценка результатов исследования производится нейрохирургом совместно с врачом ультразвуковой диагностики. Такое сотрудничество позволяет более точно определить все интересующие параметры опухоли во время исследования.

Эхо-признаки, характерные для опухолей, по данным интраоперационной сонографии

На основании данных интраоперационной сонографии и интраоперационной доплерографии определены эхо-признаки, характерные для различных объемных образований головного мозга.

Эхо-признаки, характерные для астроцитом

- Для астроцитом 1-й степени злокачественности характерны гиперэхогенность, нечеткие

границы, невыраженность перифокального отека, неровность контуров, невысокая степень кровоснабжения опухоли.

- Для астроцитом 2-й степени злокачественности характерны гиперэхогенность, четкие или умеренно четкие границы, наличие перифокального отека, неровность контуров, усиленные сосудистого рисунка в опухоли.
- Астроцитомы 3-й степени злокачественности характеризуются гиперэхогенностью, нечеткими или умеренно четкими границами, выраженностью перифокального отека, неровностью контуров, наличием умеренного количества сосудов в опухоли.
- Для астроцитом 4-й степени злокачественности характерны гиперэхогенность по периферии опухоли, гипо- или изоэхогенность внутри опухоли, преобладание нечеткости границ, присутствие выраженного перифокального отека, неровность контуров, умеренное или большое количество сосудов в опухоли.

Эхо-признаки, характерные для метастазов

Для метастазов характерны гиперэхогенность, четкие границы, наличие выраженного перифокального отека, неровность контуров, умеренный кровоток в опухоли.

Эхо-признаки, характерные для менингиом

Для менингиом характерны гиперэхогенность, четкие границы, невыраженность перифокального отека, ровность контуров. Отсутствие или малое количество сосудов в доброкачественных менингиомах и высокая васкуляризация злокачественных менингиом.

Биопсия опухолей под контролем ИС

При проведении биопсии опухоли под контролем ИС после наложения фрезевого отверстия в проекции опухоли с помощью доплерографии определяется бессосудистая зона для проведения пункции (рис. 11—12). Во время исследования оценивают границы опухоли, ее структуру и взаимоотношение с сосудами. После выбора наиболее безопасных траекторий под контролем ИС в режиме реального времени производят биопсию опухоли. Использование ИС позволяет менять траекторию введения биопсийной иглы по мере ее погружения. Это помогает избежать повреждения сосудов, которые встречаются на пути введения иглы. После проведения биопсии осуществляют ИС контроль возможного кровотечения по ходу канала биопсийной иглы в течение 15—20 мин.

При проведении биопсии опухоли, пункции желудочков мозга или опухолевых кист ось пункционной иглы должна быть направлена «под

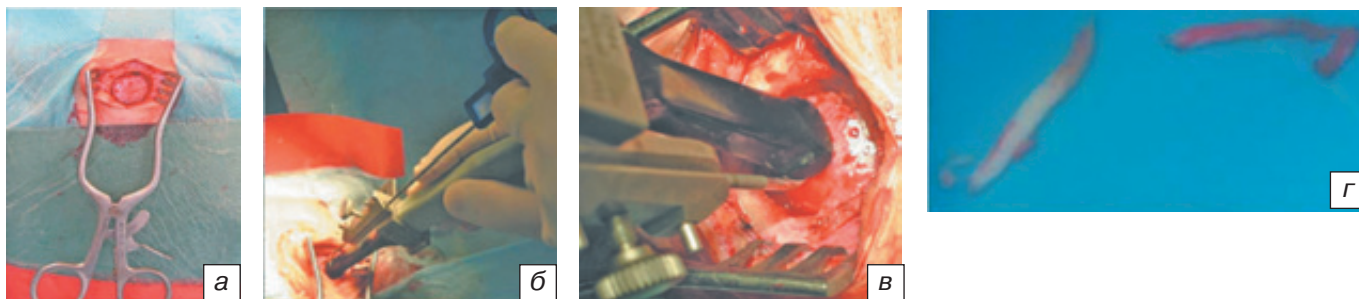
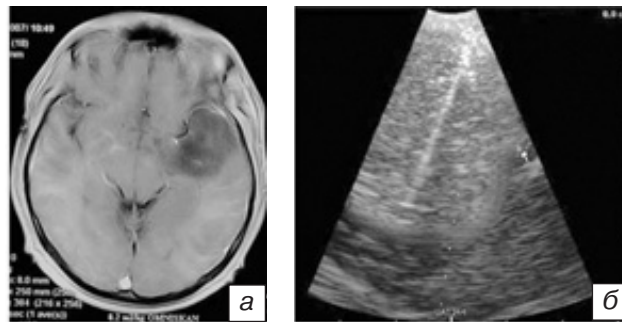


Рис. 11. Этапы биопсии опухоли под контролем ультразвукографии: *a* — наложение фрезевого отверстия; *б, в* — биопсия опухоли автоматической биопсийной иглой под контролем ультразвукографии 7-миллиметровым конвексным датчиком; *г* — «столбики» опухолевой ткани, полученные при биопсии.

Fig. 11. Stages of tumor biopsy under ultrasonography control: *a* — performing of burr hole; *б, в* — tumor biopsy with the help of automatic biopsy needle under ultrasonography control with the usage of convex probe with 7 mm in diameter; *г* — «columns» of tumor tissue obtained during biopsy.

Рис. 12. МРТ головного мозга и данные биопсии под контролем ИС пациента М., 28 лет, с фибриллярной астроцитомой левой височной доли: *a* — T1-взвешенное изображение МРТ головного мозга с контрастированием — гиподенсивное образование в левой височной доле, не накапливающее контрастное вещество; *б* — данные ИС во время проведения биопсии опухоли — гиперэхогенное образование с ровными четкими контурами, в образовании визуализируется биопсийная игла.

Fig. 12. Brain MRI and data of biopsy, performed under IS control at patient, 28 years old, with fibrillar astrocytoma in left temporal lobe: *a* — MRI with contrast (T1) — hypodense lesion with no accumulation of contrast is seen in the left temporal lobe; *б* — data of intraoperative sonography, received during tumor biopsy — hyperechoic lesion with straight distinct borders. The biopsy needle is detected in this lesion.



датчик», тогда изображение иглы на мониторе будет по всей длине иглы и ориентация в полости черепа будет облегчена.

Преимущества использования метода интраоперационной сонографии в хирургии опухолей головного мозга

1. В некоторых случаях качество и количество полученной информации при использовании УЗ значительно превосходят данные предоперационных КТ и МРТ, особенно если исследование проводится через интактную ТМО. При интеграции данных ультразвукового исследования в нейронавигационную систему точность определения границ новообразования лучше, чем при использовании навигационных T2-взвешенных изображений и значительно превосходят T1-взвешенные изображения.
2. Нейросонография, в отличие от безрамных навигационных систем, позволяет проводить навигацию в режиме реального времени, а также производить контроль качества удаления опухоли, который почти невозможен при использовании безрамных навигационных систем из-за подвижности мозга во время операции. Причинами изменения анатомии в ходе оперативного вмешательства являются: истечение ЦСЖ, отек мозга, удаление образования и др. Небольшое смещение мозга может привести к неблагоприятным последствиям, связанным с «необходимой» операционной травмой, особенно если новообразование находится в стволе головного мозга. По данным разных авторов, смещение мозга может достигать от 3 до 24 мм. Значительное смещение мозга происходит при эндоскопических операциях после вскрытия кист опухолей или дренирования желудочков. Комбинация безрамной навигационной системы с интраоперационной сонографией или интраоперационной МРТ позволяет решить эту проблему. Клиническая точность манипуляций при использовании ИС составляет $1,4 \pm 0,45$ мм.
3. При использовании интраоперационной безрамной навигационной системы доступ к образованию ограничен одной траекторией, в отличие от интраоперационной сонографии, при которой траектория вмешательства может быть в любой момент изменена по желанию хирурга.
4. Никакая предоперационная подготовка к проведению нейросонографии не требуется.
5. Потеря данных не является проблемой при использовании ультразвуковой навигации, в отличие от безрамных систем навигации, при использовании которых технические проблемы возникают в 2,5–6% случаев. При использовании интраоперационной МРТ технические сложности возникают в 50% случаев.

6. В настоящее время не существует каких-либо технических ограничений для использования ИС, в то время как при использовании интраоперационной МРТ такие ограничения существуют: пациенты с водителями ритма, нейростимуляторами, металлоимплантами.
7. При использовании ИС удается локализовать образования размерами 1,5 мм и более. При проведении интраоперационной МРТ визуализируются образования более 3—5 мм в диаметре.
8. Интраоперационная сонография, в отличие от интраоперационных КТ или МРТ, может быть использована при положении пациента «сидя» во время операции.
9. Для проведения ИС не требуется дополнительный штат специалистов, исследование может быть проведено непосредственно хирургом.
10. ИС удобна при работе нескольких хирургических бригад в разных операционных, т.к. передвигать аппарат из одной операционной в другую не составляет сложности.
11. В ближайшее время планируется внедрение новой методики — функциональной нейросонографии. В настоящее время, как уже отмечалось, есть возможность совмещения данных интраоперационной сонографии с предоперационными данными функциональной МРТ [1].

В настоящее время происходит переоценка преимуществ и недостатков различных навигационных систем, включая их стоимость, надежность и «гибкость» [14]. Интраоперационное использо-

вание УЗИ превосходит интраоперационные КТ и МРТ по многим показателям.

Средняя стоимость установки для проведения интраоперационной сонографии составляет около 100 000 долларов США, стоимость стерильного материала составляет около 10 долларов на 1 операцию. Стоимость оборудования для проведения интраоперационной МРТ составляет в среднем 1,5 млн долларов США. Стоимость безрамной системы нейронавигации составляет около 250 000—950 000 долларов США. Учитывая высокую стоимость интраоперационных КТ или МРТ головного мозга, данная методика доступна лишь в высокоспециализированных крупных центрах [13].

В сравнении с интраоперационными МРТ или КТ, отсутствующими в большинстве нейрохирургических клиник мира, и принимая во внимание качество получаемой информации, время исследования и цену оборудования, использование ИС является практической и доступной альтернативой другим методам интраоперационной визуализации и навигации [7] (табл. 1).

Интраоперационная нейросонография — безопасный, технически надежный метод нейронавигации глубинных новообразований в режиме реального времени, независимо от размеров и глубины расположения образования и исключая погрешности в выполнении операции, связанные со смещением мозга. В сравнении с другими методами интраоперационной навигации это наиболее дешевый метод, дающий возможность, в отличие от безрамных навигационных систем, проводить контроль резекции опухоли.

Таблица 1 / Table 1

Сравнительная характеристика различных навигационных технологий, используемых при нейрохирургических операциях [15] / Comparison of various navigation technologies used during neurosurgical operations [15]

Техника навигации	Безрамная навигационная система	Интраоперационная МРТ	Интраоперационная нейросонография
Планирование краниотомии	+	+	—
Навигация в режиме реального времени	—	+	+
Хорошее качество навигации	+	+	+
Информация о гемодинамике	—	—	+
Независимость от положения пациента	+	—	+
Контроль резекции	—	+	+
Дополнительный штат сотрудников	—	+	—
Цена	60%	100%	10%

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Васильев Сергей Амурабиевич — к.м.н., заведующий нейрохирургическим отделением Российского научно-го центра хирургии им. акад. Б.В. Петровского РАМН.

Зув Андрей Александрович — к.м.н., научный сотрудник отделения нейрохирургии Российского научного центра хирургии им. акад. Б.В. Петровского РАМН.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Bernays RL*. Intraoperative imaging in neurosurgery. MRI, CT, ultrasound. Introduction // *Acta Neurochir Suppl.* — 2003. — № 85. — P. 1—3.
2. *Bucholz RD, Yeh DD, Trobaugh J* et al. The correction of stereotactic inaccuracy caused by brain shift using an intraoperative ultrasound device, in Proceedings of the Joint Conference of Computer Vision, Virtual Reality, and Robotics in Medicine and Medical Robotics and Computer Assisted Surgery (CVRMed-MRCAS'97), Grenoble, France, March 19—22, 1997, in Troccas J, Grimson E, Musges R (eds) // *Lecture Notes in Computer Science*. Berlin, Springer-Verlag. — 1997. — № 1205. — P. 459—466.
3. *Chandler KL, Prados MD, Malec M, Wilson CB*. Long-term survival in patients with glioblastoma multiforme // *Neurosurgery.* — 1993. — № 32. — P. 716—720.
4. *Dempsey RJ, Mofitakhar R, Pozniak M*. Intraoperative Doppler to measure cerebrovascular resistance as a guide to complete resection of arteriovenous malformations // *Neurosurgery.* — 2004. — № 55. — P. 155—160.
5. *Gaab MR*. Intraoperative ultrasound imaging in neurosurgery // *Ultraschall Med.* — 1990. — № 11. — P. 62—71.
6. *Gronningsaeter A, G. Unsgard, S. Ommedal, B. A. J. Angelsen*. Ultrasound-guided neurosurgery: a feasibility study in the 3–30 MHz frequency range // *British Journal of Neurosurgery.* — 1996. — № 10(2). — P. 161—168.
7. *Hammoud MA, Ligon BL, ElSouki R, Shi WM, Schomer DF, Sawaya DF*. Use of intraoperative ultrasound for localizing tumors and determining the extent of resection. A comparative study with magnetic resonance imaging // *J. Neurosurg.* — 1996. — № 84. — P. 737—741.
8. *Harrer JU, Mayfrank L., Mull M., Klotzsch C*. Second harmonic imaging: a new ultrasound technique to assess human brain tumor perfusion // *J. Neurol Neurosurg Psychiatry.* — 2003. — № 74. — P. 333—342.
9. *Hatfield MK, Rubin JM, Gebarski SS, Silbergleit R*. Intraoperative sonography in low-grade gliomas // *J. Ultrasound Med.* — 1989. — № 8. — P. 131—134.
10. *Knauth M, Wirtz CR, Tronnier VM, Aras N, Kunze S, Sartor K*. Intraoperative MR imaging increases the extent of tumor resection in patients with high-grade gliomas // *Am J Neuroradiol.* — 1999. — № 20. — P. 1642—1646.
11. *Lindseth F, Ommedal S, Bang J, Unsgerd G, Hernes T*. Image fusion of ultrasound and MRI as an aid for assessing anatomical shifts and for improving overview and interpretation in ultrasound guided neurosurgery // *CARS* 2001: Proceedings of the 15th International Congress and Exhibition in Computer Assisted Radiology and Surgery, Berlin, June 27—30, 2001. — P. 523—525.
12. *Lunn KE, Hartov A, Hansen EW*, et al. A quantitative comparison of edges in 3D intraoperative ultrasound and preoperative MR images of the brain // *Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention-MICCAI 2001*. 4th International Conference. Utrecht, The Netherlands, October 14—17, 2001. Proceedings. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2001. — P. 1081—1090.
13. *Maiuri F, Iaconetta G, de Divitiis O*. The role of intraoperative sonography in reducing invasiveness during surgery for spinal tumors // *Minim Invasive Neurosurg.* — 1997. — № 40. — P. 8—12.
14. *Mogami T, Dohi M, Harada J*. A new image navigation system for MR-guided cryosurgery // *Magn Reson Med Sci.* (Japan) 2002 Dec 15;1(4):191-7.
15. *Mursch K, Vogelsang J, Zimmerer B, Markakis E*. Transcranial color-coded real time ultrasound. An improvement in patient monitoring in the neurosurgical intensive care unit? // *Ultraschall Med.* — 1995. — № 16. — P. 65—69.
16. *Roberts DW, Miga MI, Hartov A, Eisner S, Lemery JM, Kennedy FE, Paulsen KD*. Intraoperatively updated neuroimaging using brain modeling and sparse data // *Neurosurgery.* — 1999. — № 45. — P. 1199—1207.
17. *Unsgaard G, Ommedal S, Muller T, Gronningsaeter A, Hernes TAN*: Neuronavigation by intraoperative three-dimensional ultrasound: Initial experience during brain tumor resections // *Neurosurgery.* — 2002. — № 50. — P. 804—812.
18. *Unsgaard G, Gronningsaeter A, Ommedal S, Nagelhus Hernes TA*. Brain operations guided by real-time two-dimensional ultrasound: new possibilities as a result of improved image quality // *Neurosurgery.* — 2002. — № 51. — P. 402—412.
19. *Unsgaard G., O.M. Rygh, T. Selbekk, T.B. Muller, F. Kolstad, F. Lindseth and T.A. Nagelhus Hernes*. Intra-operative 3D ultrasound in neurosurgery // *Acta Neurochir (Wien).* — 2006. — № 148. — P. 235—253.
20. *Wirtz CR, Albert FK, Schwaderer M, Heuer C, Staubert A, Tronnier VM, Knauth M, Kunze S*. The benefit of neuronavigation analyzed by its impact on glioblastoma surgery // *Neurol Res.* — 2000. — № 22. — P. 354—60.
21. *Woydt M., A. Krone, N. Soeren & K. Roosen*. Ultrasound-guided neuronavigation of deep-seated cavernous haemangiomas: clinical results and navigation techniques // *Br J Neurosurgery.* — 2001. — № 15(6). — P. 485—495.