



ПРИМЕНЕНИЕ УЗ-СКАНИРОВАНИЯ, СОПРЯЖЕННОГО С НЕЙРОНАВИГАЦИЕЙ В ДЕТСКОЙ НЕЙРОХИРУРГИИ: КЛИНИЧЕСКИЙ СЛУЧАЙ И ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Е. В. Федоров, Д. В. Низолин, В. П. Иванов, О. А. Дон,
М. В. Диконенко, А. В. Ким, К. А. Самочерных

«Российский научно-исследовательский нейрохирургический институт имени
проф. А. Л. Поленова» — филиал ФГБУ «НМИЦ им. В. А. Алмазова» МЗ РФ,
Маяковского ул., 12, Санкт-Петербург, 191014

РЕЗЮМЕ. Практика применения нейронавигационных систем, как и интраоперационного ультразвукового сканирования — неотъемлемый атрибут современной нейрохирургии. Куда реже два метода применяются совместно. Тем не менее даже при сравнительно небольшом описанном опыте такой практики, очевидно, что потенциал данной технологии достаточно большой. Мы представляем первый опыт применения ультразвукового сканирования сопряженного с нейронавигацией в детской нейрохирургии в России.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ультразвуковая навигация, нейронавигационная система, детская нейрохирургия

Для цитирования: Федоров Е. В., Низолин Д. В., Иванов В. П., Дон О. А., Диконенко М. В., Ким А. В., Самочерных К. А. Применение УЗ-сканирования сопряженного с нейронавигацией в детской нейрохирургии. Российский нейрохирургический журнал им. проф. А. Л. Поленова. DOI 10.56618/2071-2693_2023_15_2_75.

THE USE OF ULTRASOUND SCANNING COUPLED WITH NEURONAVIGATION IN PEDIATRIC NEUROSURGERY

E. V. Fedorov, D. V. Nizolin, V. P. Ivanov, O. A. Don, M. V. Dikonenko, A. V. Kim, K. A. Samochernykh

“Polenov Neurosurgical Institute — branch of Almazov National Medical Research Centre”,
12, Mayakovskogo st., Saint Petersburg, 191014, Russia

SUMMARY. The practice of using neuronavigation systems, as well as intraoperative ultrasound scanning, is an attribute of modern neurosurgery. But use their combination is very rare. Nevertheless, even with the relatively small described experience of such practice, it is obvious that the potential of this technology is large. We present the first experience of using ultrasound scanning coupled with neuronavigation in pediatric neurosurgery in Russia.

KEY WORDS: ultrasound navigation, neuronavigation system, pediatric neurosurgery

For citation: Fedorov E. V., Nizolin D. V., Ivanov V. P., Don O. A., Dikonenko M. V., Kim A. V., Samochernykh K. A. The use of ultrasound scanning coupled with neuronavigation in pediatric neurosurgery. Rossiiskii neirokhirurgicheskii zhurnal imeni professora A. L. Polenova. DOI 10.56618/2071-2693_2023_15_2_75.

Введение. В последние годы нейронавигационные установки стали неотъемлемым аппаратным комплексом, рутинно применяющимся в условиях нейрохирургической операционной по всему миру. Данные технологии позволяют осуществлять максимально точный и бережливый подход к патологическому очагу в центральной нервной системе, с учетом всех индивидуальных особенностей анатомии пациента. Например, в ходе удаления новообразования нейронавигация позволяет точно ориентироваться в зоне хирургического вмешательства, а на этапе подготовки к хирургическому лечению спланировать наиболее оптимальный доступ к опухоли, с учетом всех анатомических структур, лежащих на пути к объемному образованию. С момента появления нейронавигационные системы развива-

лись по двум параллельным направлениям, обусловленным используемой для слежения технологией — оптической (активной или пассивной) или электромагнитной. Однако независимо от технологии, которая лежит в основе функционирования навигационной системы, вся информация, предоставляемая хирургу во время манипуляций, основана на статичных предоперационных изображениях магниторезонансной томографии (МРТ). Следовательно, данные системы не обладают интерактивным откликом на происходящие изменения в зоне интереса в реальном времени хирургической интервенции. Хирургу необходимо учитывать этот недостаток — точность современных нейронавигационных систем максимальна перед трепанацией черепа и значительно снижается по мере проведения хирургиче-

ских манипуляций на структурах ЦНС. Снижение точности нейронавигационных данных связано со сдвигом мозга — «shift-effect», обусловленный пролабированием мозгового вещества за счет отека, вскрытием ликворосодержащих пространств, также к смещению мозгового вещества приводит debulking при резекции опухоли.

Обеспечить интерактивный нейровизуализационный контроль в реальном времени нейрохирургических манипуляций способна простая и уже давно зарекомендовавшая себя опция — ультразвуковой аппарат. Не вызывает сомнений тот факт, что ультразвуковое исследование (УЗИ) является ценным инструментом для обнаружения патологического процесса, а также адаптации подхода к нему и выбора угла хирургической атаки во время операции. Однако ультразвуковая визуализация также не лишена недостатков, она представляет собой двумерное изображение низкого разрешения, а также, что не мало важно, предполагает операторозависимость — интерпретация деталей анатомического изображения, отображаемое на экране УЗ-аппарата, требует значительной подготовки и опыта пользователя.

В статье продемонстрирован наш опыт интеграции ультразвукового аппарата и нейронавигационной станции при удалении опухоли головного мозга у пациента детского возраста. Использование данной технологии позволило интраоперационно в режиме реального времени совмещать изображения сонограммы и предоперационной МРТ.

Клинический пример. Мальчик 15 лет, поступил в нейрохирургическое отделение для детей ФГБУ «НМИЦ им. В. А. Алмазова» Минздрава России с жалобами на судорожные приступы, сопровождающиеся потерей сознания. Клиническая манифестация заболевания случилась за 5 месяцев до госпитализации, в виде транзиторного нарушения речи с последующим развитием тонико-клонических су-

дорог. Ребенок прошел обследование у невролога по месту жительства, была назначена противосудорожная терапия вальпроевой кислотой, на фоне которой приступы продолжались. Электроэнцефалография (ЭЭГ) выявила региональные эпилептиформные паттерны в правых лобно-височных отведениях. Также пациенту было выполнено МР-исследование головного мозга, по данным которого выявлено объемное образование правой теменной доли размерами 14x17 мм (рис. 1).

На момент госпитализации в отделение нейрохирургии для детей, ведущим в клинической картине заболевания являлся пароксизмальный синдром, с развитием фокальных судорог с переходом на билатеральные тонико-клонические. Очаговая симптоматика была представлена двусторонней пирамидной недостаточности, более выраженной слева. Учитывая наличие объемного образования нижней теменной доли правого полушария, осложненного развитием пароксизмального синдрома в виде структурной эпилепсии, а также особенности локализации патологического очага — конвексимально в субдоминантном полушарии пациента правши, пациенту было показано хирургическое удаление опухоли. В процессе предоперационного планирования нами было принято решение о применении в данном случае интеграции нейронавигационной станции и УЗ-аппарата. Такое техническое решение в первую очередь было обусловлено нейровизуализационными характеристиками опухоли: небольшой по размерам, отчетливо отграниченный, субкортикальнорасположенный патологический очаг. Данные характеристики создавали условия для оптимального применения ультразвукового сканирования совместно с нейронавигацией, такая комбинация из двух взаимодополняющих компонентов интраоперационного аппаратного контроля приводит к взаимному нивелированию недостатков.

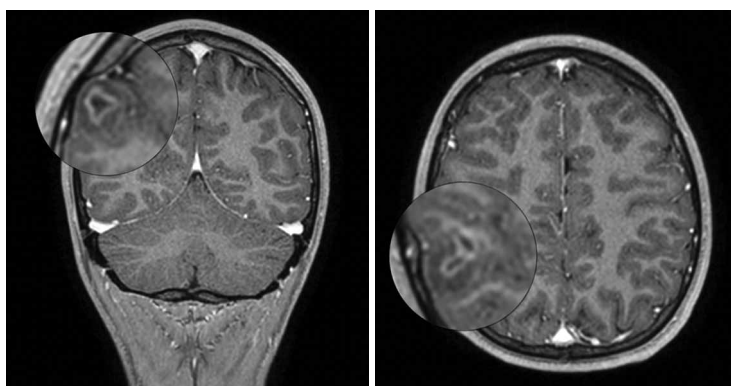


Рис. 1. На предоперационной МРТ с контрастным усилением на коронарном срезе (слева) и аксиальном (справа) увеличена область расположения опухоли правой теменной доли размерами 14x17 мм. В проекции опухоли отмечается участок ремоделирования костной пластинки правой теменной кости.

Fig. 1. On the preoperative MRI with contrast on the coronal (left) and axial (right) sections, the tumor location area of the right parietal lobe was enlarged, 14x17 mm. in size. In the projection of the tumor, there is a site of remodeling of the bone plate of the right parietal bone.



Рис. 2. Линейный датчик автономной УЗ-станции с предустановленным навигационным зондом — Sono Nav M-Turbo.
Fig. 2. The linear sensor of the autonomous ultrasound station with a pre-installed navigation probe is Sono Nav M-Turbo.

Снимки МРТ предварительно были импортированы в навигационную систему Stealth Station S8 Surgical Navigation System в формате DICOM через USB-носитель. Далее для вывода на экран была выбрана последовательность МР-снимков содержащая постконтрастные изображения и толщиной срезов 1 мм. Линейный датчик автономной УЗ-станции с предустановленным навигационным зондом — Sono Nav, вместе со свободным регистрационным зондом (пойнтер) верифицировался навигационной системой через интеграционную раму (рис. 2).

На этапе нейронавигационного планирования, пациент уже находился на операционном столе с жестко фиксированной головой в скобе Mayfield. Далее проводилась стандартная процедура поверхностной регистрации операционного поля в системе нейронавигационной станции с точностью регистрации 1,5 мм. В ходе проведения оперативного лечения, при помощи оптической нейронавигации была определена проекция и граница краниотомии, относительно зоны интереса — опухоли. После удаления костного лоскута и рассечения твердой мозговой оболочки отмечалось незначительное выбухание мозгового вещества в трепанационное окно, при идентификации мозговых структур пойнтером ожидаемо стала

отмечаться незначительная погрешность в данных нейровизуальной станции (до 2 мм). При помощи УЗ-навигации было уточнено расстояние от поверхности мозгового вещества до патологического очага, а также определен угол хирургической атаки. Две нейровизуализационные картины: на основании импортированных в систему предоперационных МР-изображений и данных УЗ-навигации, в реальном времени отображались и совмещались на экране навигационной системы (рис. 3).

Ориентируясь на релевантную нейровизуализационную картину (совмещение статичного МР-изображения и динамической нейросонограммы на экране), этап резекции опухоли проводился с минимальной травматизацией структур головного мозга, окружающих бластоматозный процесс. По ходу удаления нами отмечался эффект over-blending — чрезмерное смещение зоны резекции по данным ультрасонографии, относительно исходной МР-картины. В результате было достигнуто максимальное удаление патологической ткани по данным контрольной интраоперационной УЗ-визуализации, также о достигнутом результате свидетельствовали данные послеоперационного МР-исследования (рис. 4).

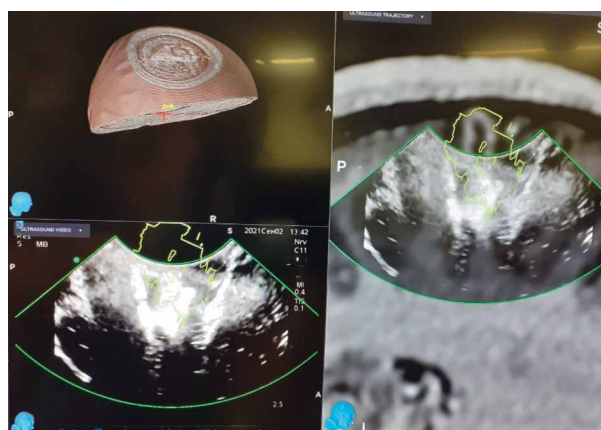


Рис. 3. Результат совмещения данных нейронавигационной станции и интраоперационного УЗ-сканирования. Оранжевой стрелкой показан предварительно отмеченный контур опухоли (контур салатового цвета).

Fig. 3. The result of combining the data of the neuronavigation station and intraoperative ultrasound scanning. The orange arrow shows marked contour of the tumor (light green contour).

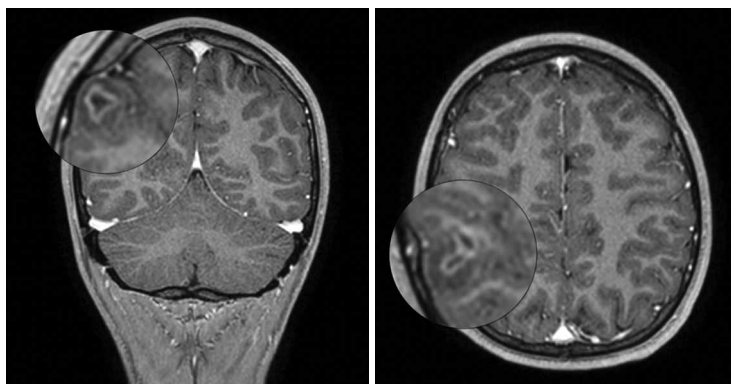


Рис. 4. На послеоперационной МРТ на аксиальном (слева) и коронарном (справа) срезах отмечается послеоперационная полость (область увеличена), заполненная ликвором. МР-признаков остаточной опухолевой ткани не обнаружено.

Fig. 4. On the postoperative MRI on the axial (left) and coronal (right) sections, a postoperative cavity is noted (the area is enlarged), filled with cerebrospinal fluid. MRI signs of the tumor were not found.

По результатам патоморфологического исследования операционные образы ткани были верифицированы как пилоцитарная астроцитома Grade 1. При выписке в клинической картине пациента не отмечалось какого-либо неврологического дефицита. В отдаленном послеоперационном периоде хирургическое лечение позволило добиться положительного клинического эффекта — пароксизмальный синдром регрессировал.

Обсуждение. В последнее время встречается всё больше сообщений об успешном применении интраоперационного ультразвукового сканирования. Однако, как отмечают исследователи, данный метод имеет ряд ограничений. Один из наиболее частых — отсутствие необходимой квалификации у хирурга, позволяющей предельно точно ориентироваться в УЗ-изображении. Данное ограничение успешно преодолевается сопряженным использованием УЗ-сканирования и нейронавигации.

В крупном исследовании (59 пациентов) показано, что УЗ-сканирование в реальном времени сопряженное с нейронавигацией позволяет достичь хороших результатов и значительно выгоднее экономически, чем другие методы визуализации. Авторы также отмечают, что успешная ориентировка достигается при уровне первоначальной ошибки регистрации не более 2 мм [1]. I-A Rasmussen Jretal. Также сообщают о возможности коррекции так называемого «сдвига мозга» (brainshift) при УЗ-сканировании в реальном времени сопряженном с нейронавигацией [2].

Общеизвестно, что в зависимости от специфических акустических свойств пересекаемых тканей волны могут либо поглощаться, либо рассеиваться, либо отражаться; это определяет различный коэффициент затухания любой ткани. В кадаверном исследовании Kremkau et al обнаружили, что среднее затухание ультразвукового импульса при пересечении белого и мозгового вещества на частоте 1 МГц составило 0,87 дБ / см., в трактах данный показатель составил 0,97 дБ / см., в изолированной коре головного мозга –0,75 дБ. [3]. Данные свойства обеспечивают различную и приемлемую степень яркости структур головного мозга для интраоперационной ориентировки [3,4].

Liang C. Сообщили об успешном применении данного метода при удалении серии глиом. По мнению авторов метод служил хорошим способом контроля резекции и позволял ориентироваться в расположении трактов относительно опухоли [5]. Хорошего результата с применением УЗ-сканировании в реальном времени сопряженного с нейронавигаци-



Рис. 5. Общий вид станции нейронавигации Stealth Station S8 Surgical Navigation System и аппарата для УЗ-сканирования Sonosite M-turbo(слева).

Fig. 5. General view of the Stealth Station S8 Surgical Navigation System neuronavigation station and the Sonosite M-turbo ultrasound scanner (left).

ей добились Saß B. Etal. В серии пациентов с метастатическим поражением головного мозга.

Ramy A. Zeineldin et al сообщили о способе полной коррекции шифта мозга с применением алгоритма, основанного на больших массивов данных [6]. Это сообщение говорит о том, что описываемый способ интраоперационной навигации может в скором времени стать основным.

В исследовании Zi-xiao Liel. приводится опыт использования УЗ-сканировании в реальном времени сопряженном с нейронавигацией на 12 пациентах детского возраста. Отмечается успешное применение данного метода как в базовой навигации, так и, что более важно, в качестве инструмента контроля резекции.

Использование навигационных систем имеет огромный потенциал и позволяет совмещать данные различных модальностей [7]. Тщательное предоперационное планирование, в том числе с использованием описанной нами методики, может значительно снизить частоту осложнений при проведении биопсии [8].

Выводы. Нами была впервые в России использована цифровая интеграция ультразвукового аппарата и нейронавигационной станции при удалении опухоли головного мозга у пациента детского возраста. В результате интраоперационного использования данной технологии в режиме реального времени нам удалось совместить изображение сонограммы и предоперационной МРТ, что значительно улучшило интерпретацию общей нейровизуализационной картины, сделав ее максимально полной, а также позволило нивелировать недостатки и значимо усилить преимущества каждого из методов визуализации.

Потенциал применения УЗ-навигации в настоящее время нельзя считать реализованным. Возможно, в будущем использование аналитических алгоритмов позволит идентифицировать мозговые структуры на основании физических показателей, таких как, например, среднее затухание ультразвукового им-

пульса, а применение больших массивов данных позволит в режиме реального времени корректировать так называемый «brain-shift».

Также не лишено перспектив применение МР-изображений с предварительно реконструированными трактами белого вещества в качестве основы для станции нейронавигации с интегрированным датчиком УЗ-сканирования.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. **Conflict of interest.** The author declares no conflict of interest.

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

Соблюдение прав пациентов и правил биоэтики. Все пациенты подписали информированное согласие на участие в исследовании. **Compliance with patient rights and principles of bioethics.** All patients gave written informed consent to participate in the study

ORCID авторов / ORCID of authors

Федоров Евгений Вадимович/
Fedorov Evgeniy Vadimovich
<https://orcid.org/0000-0001-7862-9341>

Низолин Дмитрий Владимирович/
Nizolin Dmitriy Vladimirovich
<https://orcid.org/0000-0001-8719-0342>

Иванов Вадим Петрович/
Ivanov Vadim Petrovich
<https://orcid.org/0000-0002-1009-4077>

Дон Олег Анатольевич/Don Oleg Anatol'evich

Диконенко Михаил Викторович/
Dikonenko Mikhail Viktorovich
<https://orcid.org/0000-0002-8701-1292>

Ким Александр Вонгиевич/
Kim Alexandr Vongievich
<https://orcid.org/0000-0002-6219-7270>

Самочерных Константин Александрович/
Samochernyh Konstantin Alexandrovich
<https://orcid.org/0000-0003-0350-0249>

Литература/References

1. Prada F, Del Bene M, Mattei L, Lodigiani L, DeBeni S, Kolev V, Vetrano I, Solbiati L, Sakas G, DiMeco F. Preoperative magnetic resonance and intraoperative ultrasound fusion imaging for real-time neuronavigation in brain tumor surgery. *Ultraschall Med.* 2015 Apr;36(2):174–86. doi: 10.1055/s-0034-1385347. Epub 2014 Nov 27. PMID: 25429625.
2. Rasmussen IA Jr, Lindseth F, Rygh OM, Berntsen EM, Selbekk T, Xu J, NagelhusHernes TA, Harg E, Håberg A, Unsgaard G. Functional neuronavigation combined with intra-operative 3D ultrasound: initial experiences during surgical resections close to eloquent brain areas and future directions in automatic brain shift compensation of preoperative data. *ActaNeurochir (Wien).* 2007;149(4):365–78. doi: 10.1007/s00701-006-1110-0. Epub 2007 Feb 19. PMID: 17308976.
3. Kremkau FW, Barnes RW, McGraw CP. Ultrasonic attenuation and propagation speed in normal human brain. *J AcoustSocAm* 1981;70:29–38. 10.1121/1.386578
4. Xiao J, Xiao M, Wang B, Huang Z, Peng K. Acoustic field simulation method for arbitrarily shaped transducer with dynamically refined sub-elements. *QuantImagingMedSurg* 2018;8:1084–94. 10.21037/qims.2018.12.07
5. Liang C, Li M, Gong J, et al. A new application of ultrasound-magnetic resonance multimodal fusion virtual navigation in glioma surgery. *AnnTranslMed* 2019;7:736
6. Saß B, Carl B, Pojskic M, Nimsky C, Bopp M. Navigated 3D Ultrasound in Brain Metastasis Surgery: Analyzing the Differences in Object Appearances in Ultrasound and Magnetic Resonance Imaging. *AppliedSciences.* 2020; 10(21):7798. <https://doi.org/10.3390/app10217798>

7. Куканов К.К., Зрелов А.А., Самочерных К.А., Олюшин В.Е., Потемкина Е.Г., Улитин А.Ю. Сравнительный анализ стереотаксического и эндоскопического методов биопсии опухолей головного мозга (обзор литературы). Российский нейрохирургический журнал им. профессора А.Л. Поленова. 2020;12(1):64–70. eLIBRARY ID: 42874078 EDN: WNRSOX [Kukanov K. K., Zrelov A. A., Samochernykh K. A., Olyushin V. E., Potemkina E. G., Ulitin A. Yu. Comparative analysis of stereotaxic and endoscopic methods of biopsy of brain tumors (literature review). Rossiiskii neirokhirurgicheskii zhurnal im. professora A. L. Polenova. 2020;12(1):64–70. eLIBRARY ID: 42874078 EDN: WNRSOX (In Russ.).]
8. Куканов К.К., Тастанбеков М.М., Сафаров Б.И., Пустовой С.В., Улитин А.Ю., Песков В.А., Лавровский П.В., Яковенко И.В., Кондаков Е.Н., Олюшин В.Е., Себедев К.И., Берснев В.П. Анализ геморрагических осложнений при стереотаксической биопсии опухолей головного мозга. Российский нейрохирургический журнал им. профессора А.Л. Поленова. 2019;11(4):37–46. eLIBRARY ID: 41499416 EDN: RFTDFT Kukanov K. K., Tastanbekov M. M., Safarov B. I., Pustovoi S. V., Ulitin A. Yu., Peskov V. A., Lavrovsky P. V., Yakovenko I. V., Kondakov E. N., Olyushin V. E., Sebelev K. I., Bersnev V. P. Analysis of hemorrhagic complications in stereotaxic biopsy of brain tumors. Rossiiskii neirokhirurgicheskii zhurnal im. professora A. L. Polenova. 2019;11(4):37–46. eLIBRARY ID: 41499416 EDN: RFTDFT (In Russ.)