

Оригінальна стаття

УДК 616.831-006-089.12

Розуменко В.Д., Розуменко А.В., Яворский А.А., Бобрик И.С.

Отделение внутримозговых опухолей, Институт нейрохирургии им. акад. А.П. Ромоданова НАМН Украины, Киев, Украина

Применение мультимодальной нейронавигации в предоперационном планировании и интраоперационном сопровождении при хирургическом лечении опухолей головного мозга

Цель. Оптимизация технологии хирургического лечения больных по поводу опухолей головного мозга (ГМ) с применением мультимодальной нейронавигации (МН).

Материалы и методы. В исследование включены 443 больных, которые по поводу опухолей полушарий большого мозга оперированы с применением МН. Тактику хирургического лечения планировали с учетом данных комплексного клиничко-неврологического обследования и результатов нейровизуализационных методов исследования. Для предоперационного 3D-планирования и интраоперационного сопровождения использовали систему хирургической МН «StealthStation TREON plus» (Medtronic, США).

Результаты. Субтотальное удаление опухолей осуществлено у 252 (56,9%) больных, тотальное — у 161 (36,3%), парциальное — у 30 (6,8%).

При клинической оценке функционального статуса больных после хирургического лечения отмечено увеличение показателя с 68,4 до 86,2 балла (по шкале Карнавски).

Выводы. Инновационные технологии нейровизуализационного обеспечения при хирургии опухолей ГМ с использованием МН для предоперационного планирования хирургического вмешательства, а также интраоперационного сопровождения и контроля хирургических манипуляций позволяют обеспечить точность и безопасность хирургического воздействия, повысить радикальность удаления опухоли, минимизировать хирургическую травму, снизить риск возникновения послеоперационного неврологического дефицита, улучшить качество жизни оперированных больных.

Ключевые слова: опухоли головного мозга, функционально важные зоны головного мозга мультимодальная нейронавигация, предоперационное планирование.

Укр. нейрохірург. журн. — 2014. — №4. — С. 23-31.

Поступила в редакцию 23.06.14. Принята к публикации 19.09.14.

Адрес для переписки: Розуменко Владимир Давидович, Отделение внутримозговых опухолей, Институт нейрохирургии им. акад. А.П. Ромоданова, ул. Платона Майбороды, 32, Киев, Украина, 04050, e-mail: rozumenko.neuro@gmail.com

Вступление. Опухоли ГМ составляют 1,8–2,3% в структуре онкологических заболеваний. Частота выявления первичных опухолей ГМ составляет 10,9–14,0 на 100 тыс. населения. Метастатические опухоли ГМ в настоящее время обнаруживают в 5 раз чаще, чем первичные опухоли, в связи с чем метастатическое опухолевое поражение ГМ является наиболее распространенным среди всех опухолевых заболеваний ЦНС. У 50–60% больных при наличии опухолей ГМ наблюдают вовлечение в патологический процесс функционально значимых и жизненно важных структур ГМ [1–3].

Применение при лечении опухолей ГМ комплексного подхода обеспечивает повышение показателей выживаемости и улучшение качества жизни больных. Результаты рандомизированных исследований свидетельствуют об эффективности применения хирургического метода лечения с последующим проведением лучевой терапии и химиотерапии с учетом гистобиологических характеристик опухолей [4–7]. При этом у больных после тотального удаления наблюдают более высокий лечебный эффект адью-

вантной терапии, чем у больных после частичного удаления опухоли [8, 9].

При планировании операции и решении вопросов относительно допустимого объема резекции опухоли необходимо определение анатомо-топографического взаимоотношения опухоли и функционально важных зон (ФВЗ) ГМ, степени их поражения, возможности восстановления или компенсации нарушенных функций [10, 11].

Прогрессивным методом хирургического лечения опухолей ГМ являются операции с применением нейронавигации, что обеспечивает возможность высокоточной интракраниальной и интрацеребральной ориентации с определением взаимоотношения опухоли с ФВЗ ГМ. Интраоперационное использование современных навигационных систем позволяет более эффективно и безопасно удалить опухоль, достичь высоких показателей качества жизни оперированных больных [12–14].

Совершенствование методов нейровизуализации и развитие технологии хирургической навигации,

Статья содержит рисунки, которые отображаются в печатной версии в оттенках серого, в электронной — в цвете.

позволяющих проводить компьютерную обработку и сопоставление данных различных методов нейровизуализационных исследований, явились основой для создания принципиально новой системы МН. С применением МН систем возможны виртуальное планирование операции, оптимизация хирургического доступа, определение рациональной тактики удаления интракраниально расположенной опухоли, выполнение хирургического вмешательства в условиях интраоперационного анатомо-топографического ориентирования [15–17].

Цель исследования: оптимизация хирургического лечения больных по поводу опухолей ГМ с применением МН.

Материалы и методы исследования. В исследование включены 443 больных, оперированных с применением МН по поводу опухолей полушарий большого мозга. Женщин было 174 (46,6%), мужчин — 269 (53,4%). Возраст больных составлял от 17 до 72 лет, в среднем 44,7 года. Функциональный статус пациентов оценивали по данным клинического наблюдения в динамике до и после операции с использованием шкалы Карновски.

Тактику хирургического лечения планировали с учетом данных комплексного клинико-неврологического обследования и анализа результатов мультиспиральной компьютерной томографии (МСКТ), магниторезонансной томографии (МРТ), функциональной магниторезонансной томографии (фМРТ), магниторезонансной трактографии (МР-трактографии), магниторезонансной венографии (МР-венографии), однофотонной эмиссионной компьютерной томографии (ОФЭКТ).

Базисный топический диагноз опухоли ГМ устанавливали на основе анализа данных МРТ. Исследование проводили на томографе «Magnetom Concerto» (Siemens, Германия) с индукцией магнитного поля 0,2 Тл и «Philips Intera 1.5T» (Philips, Нидерланды) с индукцией магнитного поля 1,5 Тл. Для контрастного усиления внутривенно вводили препарат томовист (0,2 мл/кг). Сканирование проводили в соответствии со специальным протоколом радиологического исследования для краниальной программы навигационной станции.

Картирование ГМ осуществляли методом фМРТ с использованием EPI последовательности (TE 64 мс, TR 1,68 м, матрица изображения 68×128, поле сканирования 200–230 мм, толщина срезов 3 мм). При проведении фМРТ применяли специальные тест-задания. Данные фМРТ сессий накладывали на анатомические МРТ-изображения с использованием алгоритма мультимодальной регистрации.

Для получения диффузионно-взвешенных МРТ изображений применяли спин-эхо и эхо-планарную последовательность (TR 7540 мс, TE 74 мс, толщина среза 2 мм, матрица 128×128) с использованием технологии параллельного сканирования SENSE. Диффузионный градиент формировали в 15 направлениях с b-фактором 800 с/мм². Подкорковые проводящие пути визуализировали в зависимости от направления принципиального вектора диффузии в ретроградном и ортоградном направлениях для каждого вокселя. Показатель фракционной анизотропии 0,1–0,15, минимальную длину волокна 50–70 мм, угол поворота 20–55° использовали в качестве критерия для форми-

рования трактов. «Области интереса» определяли в белом веществе ГМ вокруг зон прохождения проводящих путей на основании данных предшествовавшего МРТ-T1 исследования и располагали перпендикулярно к направлению прохождения их волокон.

МР-венографию проводили на основе компьютерной пространственной реконструкции данных МРТ-T1 исследования с внутрисудистым парамагнитным контрастированием. Компьютерную обработку результатов исследования осуществляли с помощью программного обеспечения Extended MR Workspace (Philips Medical Systems) и OsiriX (Open-Source Software).

МСКТ проводили в соответствии с протоколом радиологического исследования для краниальной программы навигационной станции на спиральном компьютерном томографе «Somatom AR STAR PLUS» (Siemens, Германия). Контрастное усиление осуществляли путем внутривенного введения препарата томогексол.

Для проведения ОФЭКТ ГМ использовали эмиссионную двухдетекторную томографическую гамма-камеру «E. Cam» (Siemens, Германия) с матрицей 128×128. Исследование проводили с применением туморотропного радиофармпрепарата (РФП) ^{99m}Tc-пертехнетат и перфузионного РФП гексаметилпропиленаминоксим, меченый ^{99m}Tc (^{99m}Tc-ГМПАО). Диагностическая доза радиоиндикаторов составляла 370–740 МБк.

Предоперационное 3D-планирование и интраоперационное сопровождение осуществляли с применением системы хирургической нейронавигации «Stealth Station TREON plus» (Medtronic, США).

Данные нейровизуализации, предназначенные для навигационного обеспечения интракраниального хирургического вмешательства, распределяли на основные и дополнительные. Основные данные МРТ и МСКТ предназначались для расчета стереотаксических координат и интраоперационного ориентирования, данные ОФЭКТ, МР-венографии, фМРТ, МР-трактографии дополняли основные изображения информацией о локализации опухоли, функциональных и структурных особенностях анатомических образований, прилегающих к очагу поражения. Изображения МРТ в T1 и T2 режимах, МСКТ, МР-венографии, фМРТ, МР-трактографии, ОФЭКТ при необходимости совмещали и отображали на мониторе станции в виде комбинированного изображения в различных сочетаниях, в зависимости от информативности полученных результатов и задач исследования.

Для атравматичного и более полного удаления опухолей, распространяющихся в ФВЗ и срединные структуры ГМ, использовали хирургическую методику лазерной термодеструкции. Облучали участки опухоли, граничащие с ФВЗ и проводящими путями. В качестве источника лазерного излучения использовали полупроводниковые хирургические лазеры «Лица-хирург» (мощность 30 Вт, длина волны 808 нм) и «Лица-хирург М» (мощность 7 Вт, длина волны 1470 нм).

Объем хирургической резекции опухоли определяли интраоперационно путем сопоставления данных МН и полученной в режиме реального времени информации в виде изображений с видеомонитора, а также по результатам послеоперационной КТ и МРТ.

Результаты и их обсуждение. С применением мультимодальной нейронавигации проведено 443 операции удаления опухолей полушарий большого мозга. Комплексная оценка данных клинического обследования и результатов нейровизуализации (МРТ, МСКТ, МР-ангиография, фМРТ, МР-трактография, ОФЭКТ) на дооперационном этапе позволяет уточнить топографические характеристики опухолевого процесса, определить степень поражения ФВЗ и медианных структур головного мозга, получить представление о васкуляризации опухоли и ее гистобиологических особенностях. С помощью программного обеспечения навигационной станции «Stealth Station Application Software Cranial 5» по данным основного исследования МРТ или МСКТ осуществляли пространственное 3D-моделирование и проводили стереотаксические расчеты. Последовательное предоперационное планирование включало сегментацию и контурирование опухоли, 3D реконструкцию опухолевого очага, определение зоны распространения перифокального отека, построение объемного топографического изображения рельефа поверхности полушарий большого мозга, конвексимально расположенных сосудов, боковых желудочков, а также выбор оптимальной траектории и границ хирургического доступа. Систему виртуального изображения на мониторе навигационной станции дополняли данными видеомониторинга в режиме реального времени [18].

Субтотальное удаление опухолей выполнено у 252 (56,9%) больных, тотальное — у 161 (36,3%), парциальное — у 30 (6,8%). По результатам гистологического исследования интраоперационного биопсийного материала глиома I и II степени анаплазии (WHO) выявлена у 71 (16,0%) больного, анапластическая глиома III степени анаплазии — у 138 (31,2%), глиома IV степени анаплазии — у 167 (37,7%), метастатические опухоли — у 67 (15,1%).

После хирургического лечения оценка функционального статуса пациентов увеличилась в среднем с 68,4 до 86,2 балла по шкале Карновски.

В зависимости от локализации опухолей по отношению к ФВЗ полушарий большого мозга, в соответствии с топографической классификацией R. Sawaya [19], выделены три группы опухолей: с поражением ФВЗ (Sawaya Grade III) — у 246 (55,5%) больных, прилежащие к ФВЗ (Sawaya Grade II) — у 156 (35,2%), расположенных удаленно от ФВЗ (Sawaya Grade I) — у 41 (9,3%).

Тотальное удаление опухолей Sawaya Grade I произведено у 26,2% больных, Sawaya Grade III — у 42,7%; субтотальное — соответственно у 67,3 и 49,6%; парциальное — у 6,5 и 7,7%. После операции функциональный статус больных в обеих группах практически одинаковый, в группе Sawaya Grade II — 88,9 балла, Sawaya Grade III — 85,6 балла.

Стратегия хирургического лечения больных по поводу опухолей полушарий большого мозга предполагает в оптимизацию объема резекции опухоли с обеспечением высоких показателей выживаемости пациентов при условии сохранения высокого качества жизни. Принципиально важным является стремление к максимальному удалению опухоли и уменьшению степени риска возможного возникновения послеоперационного неврологического дефицита [4, 10, 20, 21].

Современные системы МН позволяют совмещать данные различных методов нейровизуализации, проводить предоперационное 3D-планирование хирургического вмешательства в виртуальном пространстве, интраоперационное сопоставление с видеомониторингом хирургических манипуляций в режиме реального времени, интраоперационное обновление данных нейровизуализации (взаимодействие с интраоперационными МРТ, КТ и УЗД), интеграцию с хирургическим микроскопом и эндоскопическими аппаратами, а также поддерживают универсальную регистрацию используемых хирургических инструментов [21].

Эффективность использования нейронавигационных технологий при хирургическом лечении больных по поводу опухолей ГМ во многом определяется информативностью данных предоперационного нейровизуализационного обследования. Ведущими методами в диагностике опухолей ГМ, позволяющими установить топографию и расположение патологического очага относительно анатомических образований, выявить особенности его структуры, определить границы распространения опухоли, отслеживать и сопоставлять динамику ее роста, являются КТ и МРТ. Кроме стандартных режимов МРТ, для навигационного планирования и интраоперационного сопровождения в нейроонкологии широко используют МР-ангиографию, в частности, МР-венографию, а также методики картирования: фМРТ на основе BOLD-контраста и МР-трактографию — на основе диффузно-тензорных изображений. В качестве дополнительных методов нейровизуализации используют данные радионуклидных методов исследования ОФЭКТ и ПЭТ [22, 23].

Программное обеспечение нейронавигационных станций позволяет обрабатывать данные нейровизуализации, включая сочетание серий различных модальностей и реконструкцию двумерных изображений в трехмерные модели, которые можно регистрировать в системе координат станции. Компьютерная обработка и корегистрация данных различных методов нейровизуализации в системе МН на этапе предоперационного планирования позволяют получить совмещенные мультимодальные изображения, на основе которых анализируют анатомо-топографические и функциональные особенности расположения опухолей полушарий большого мозга. Типично использование КТ и МРТ с высоким разрешением, к которым можно интегрировать и другие МРТ серии: фМРТ — в целях локализации ФВЗ, МР-ангиографию — для визуализации прилежащих сосудов, МРТ-T2 и T2-FLAIR режим — при необходимости визуализации кистозных и диффузных опухолей, МР-трактографию — для визуализации проводящих путей белого вещества ГМ. Кроме того, совмещение данных МРТ в различных режимах с данным КТ проводят в целях отображения структуры опухолевого очага, а именно включения кальцинатов и участков кровоизлияний. Совмещение МРТ/ОФЭКТ и КТ/ОФЭКТ изображений позволяет определить границы между некротическим компонентом опухоли и интактной тканью, зарегистрированных как участки накопления РФП; помогает провести визуализационное дифференцирование ткани опухоли и зоны перифокального отека, по характеристикам накопления РФП предположить гистологическую структуру и степень злокачественности новообразования.

Мультимодальные изображения, сформированные с помощью программного обеспечения нейронавигационной станции, являются основой для последующего компьютерного 3D-моделирования. Использование трехмерных моделей на этапах предоперационного планирования позволяет провести визуализацию и определить соотношение нормальных анатомических структур и патологических очагов, установить анатомические ориентиры для интраоперационного сопоставления и ориентирования, выбрать адекватный хирургический доступ, оптимизировать методику удаления опухоли. Построение трехмерных моделей проводят путем сегментации с последующей реконструкцией опухоли и ее полостных компонентов, коры большого мозга с указанием участков функциональной активности, подкорковых проводящих путей, магистральных кровеносных сосудов и системы желудочков мозга [24–26].

Данные дополнительных серий МРТ (DWI, T2-FLAIR) и методов обследования (КТ, ОФЭКТ) позволяют провести более достоверную сегментацию и выделить солидную часть опухоли, определить кистозный, некротический или геморрагический компонент, визуализировать зону перифокального отека, участки гипervasкуляризации и активной пролиферации опухоли. Воздействие опухолевого очага на смежные анатомические образования определяют на 3D-моделях в виде сопутствующих изменений окружающих структур ГМ: деформации и сглаживания рельефа коры большого мозга, дислокации и компрессии извилин, транспозиции конвексимальных вен. Инвазия опухоли и деструкция коры полушарий большого мозга в участках, проекционно близких к анатомическим границам ФВЗ, обуславливает необходимость детализации выявленных изменений по данным фМРТ и МР-трактографии.

Данные фМРТ при компьютерном моделировании позволяют всесторонне характеризовать топографию двигательной зоны коры относительно опухоли, а также определить изменения их пространственного взаимоотношения, на основе чего возможно оценить риск интраоперационного поражения ФВЗ. Данные МР-трактографии обеспечивают возможность выявить признаки дислокации и деструкции волокон подкорковых проводящих путей, дифференцировать их участки с признаками инвазии опухоли или перифокального отека (рис. 1).

При опухолях, поражающих ФВЗ, определение характера и степени изменений конвексимальных вен имеет принципиальное значение и позволяет оценить риск нарушения гемодинамики

полей коры, примыкающих к опухоли. На основании данных МР-венографии проводят компьютерную реконструкцию конвексимальных венозных коллекторов в участках полушарий большого мозга, расположенных в проекции опухоли или смежных зонах. Данные МР-венографии при компьютерном моделировании позволяют определить топографию конвексимальных вен относительно опухоли, обнаружить признаки их компрессии и дислокации вследствие объемного воздействия (рис. 2).

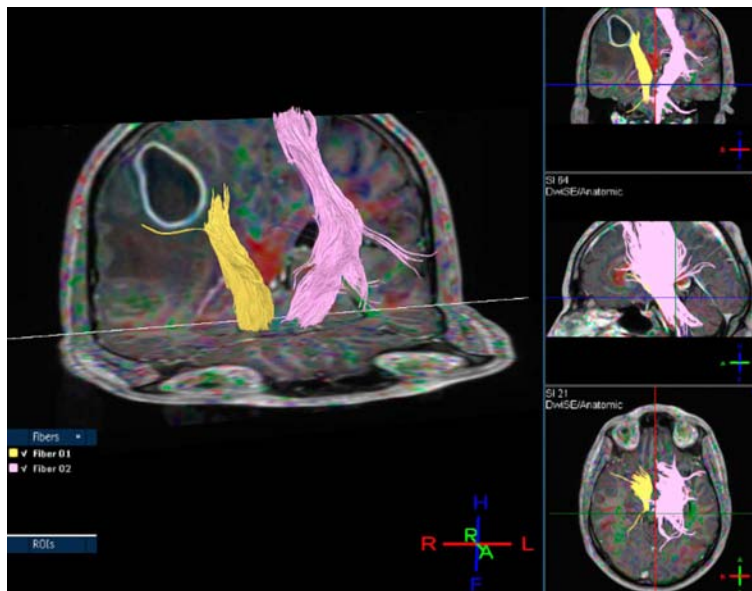


Рис. 1. МР-трактография. Дефект в структуре корково-спинномозгового пути на стороне очагового поражения вследствие перифокального отека и опухолевой инфильтрации.

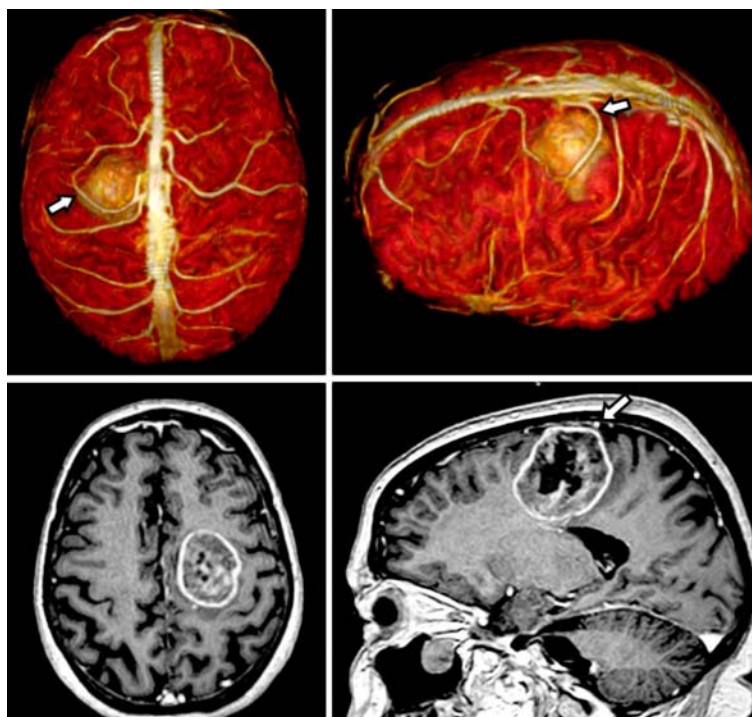


Рис. 2. Дислокация прецентральной вены при метастатической опухоли левой задне-лобной области (стрелка) по данным МР-венографии (верхний ряд) и МРТ T1 режим (нижний ряд).

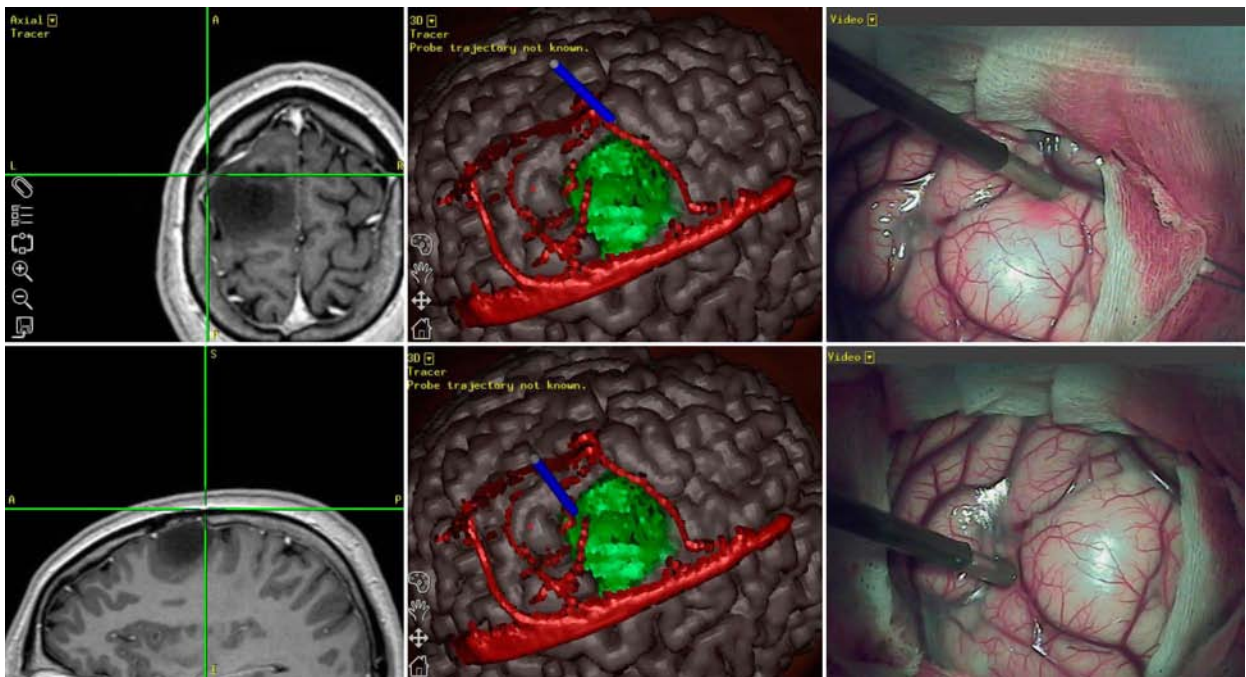


Рис. 3. Определение проекционных границ опухоли на конвексальной поверхности полушарий большого мозга у больного с глиомой левой прецентральной области.

Данные МР-венографии обеспечивают возможность установить пространственные соотношения опухоли и венозных сосудов, выбрать зону безопасного транскортикального доступа, что позволяет избежать нарушений венозного дренирования прилегающих участков ГМ. Кроме того, навигационная визуализация венозных коллекторов играет роль дополнительных кортикальных ориентиров и отправных точек для контроля точности интраоперационного сопровождения системы МН (**рис. 3**).

Таким образом, последовательная сегментация данных нейровизуализации с последующей пространственной реконструкцией позволяет построить виртуальную модель ГМ и опухоли с точной визуализацией анатомических структур и ФВЗ. При этом, возможность вращения и произвольного расположения трехмерной модели в пространстве, а также обеспечение виртуальной «прозрачности» различных структур позволяет полностью раскрыть анатомо-топографические соотношения опухоли с окружающими образованиями, обеспечивает реальные условия для реализации хирургического плана и выбора безопасной хирургической траектории (**рис. 4**).

Основным условием обеспечения информативности систем нейронавигации является конт-

роль и сохранение точности на всех этапах хирургического вмешательства.

Динамические интракраниальные изменения, возникающие во время операции, обуславливают несоответствие данных предоперационной нейровизуализации реальному положению анатомических структур в операционном поле. С момента внедрения в нейроонкологию навигационных технологий

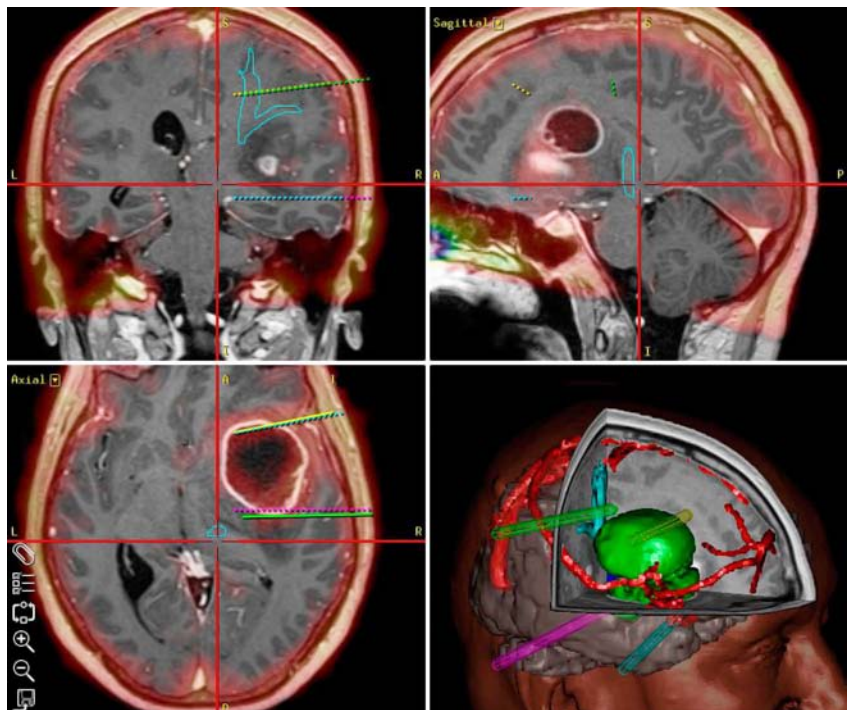


Рис. 4. Результаты 3D-планирования при глиоме правой лобно-височной области с использованием данных МР-трактографии, МР-ангиографии и ОФЭКТ.

разрабатываются как методики, направленные на регистрацию изменений положения структур ГМ, так и способы предотвращения и компенсации изменений в операционном поле. Сегодня погрешность большинства нейронавигационных систем при определении положения заданной интракраниальной точки в пределах 2 мм [25, 27].

Сопоставление данных предоперационного нейровизуализационного исследования с реальной хирургической ситуацией обеспечивается благодаря использованию интраоперационной МРТ (иМРТ), интраоперационной КТ (иКТ), интраоперационному УЗИ (иУЗИ), видеомониторинга [28, 29].

Технология интраоперационной нейровизуализации не только предоставляет возможность сопровождения и контроля хирургических манипуляций, но и обеспечивает мониторинг во время операции путем обновления данных МН, что является ключевым при определении тактики вмешательства в условиях смещения вещества мозга, деформации анатомических и патологических структур. Концепция получения 3D-изображений в режиме реального времени получила название 4D-визуализации. Интраоперационная нейровизуализация позволяет провести раннюю идентификацию вероятных интраоперационных осложнений и визуализировать оставшиеся участки опухоли. В отличие от диагностических исследований, где основной акцент делается на специфичность, при интраоперационном сканировании, в первую очередь, важным является чувствительность метода и скорость проведения исследования [30].

Прогрессивное развитие технологии иМРТ за последние годы позволило расширить границы методики, направленной на определение радикальности операции и отслеживание интраоперационных ишемических и геморрагических осложнений. В настоящее время метод интраоперационной МРТ позволяет проводить картирование ГМ, оптимизировать хирургические доступы с использованием 3D-моделирования, обновлять данные систем навигации, а также исследовать физиологические и биологические характеристики ткани опухоли и прилегающих участков ГМ [31, 32].

Совершенствование методов УЗИ и повышение информативности данных исследования приближает метод по результативности к интраоперационной МРТ, а использование УЗИ-датчиков с частотой от 5 до 7,5 МГц — проводить сканирование на глубину до 120 мм. Возможность дифференциации тканей различной плотности с помощью ультразвукового сканирования используют при биопсии опухолей, установке катетеров, аспирации содержимого кист. Метод иУЗИ помогает установить соотношение опухоли с окружающими структурами как трансдурально, так и транскортикально, предоставляет информацию для определения участка вскрытия твердой оболочки ГМ и проведения адекватной энцефалотомии. Точность УЗИ составляет 2 мм. Интеграция УЗИ-аппаратов с навигационной системой позволяет эффективно и доступно осуществлять интраоперационную визуализацию и хирургическое ориентирование. Разработаны методы регистрации смещения ГМ с помощью технологии интраоперационного УЗИ, обеспечивающие интраоперационное обновление в навигационной

системе данных предварительных нейровизуализационных исследований (МРТ, КТ) [33, 34].

Представляет интерес технология интеграции хирургических микроскопов с системами МН. Современные системы нейронавигации отслеживают положение фокусной точки микроскопа во время операции и передают в окуляр микроскопа совмещенные мультимодальные данные — МРТ, МР-ангиографии, фМРТ, МР-трактографии, МСКТ, ПЭТ, ОФЕКТ, иМРТ, иКТ, иУЗИ. Они предоставляют полную картину о локализации и границах патологического образования, ФВЗ и подкорковых проводящих путей, венозных коллекторах и магистральных артериях. Сочетание анатомической информации и данных о функциональной принадлежности визуализированных участков коры большого мозга, интегрированных в нейронавигационной системе, позволяет выбрать оптимальную зону и площадь безопасного транскортикального доступа [4, 34–37].

Технология интраоперационной флуоресценции с применением хирургических микроскопов, оснащенных источником излучения 400 нм — Leica M720 OH5 и Leica M525 OH4 с модулем FL400 (Leica Microsystems) и OPMI Pentero с модулем BLUE 400 (Carl Zeiss), расширяет возможности навигационного обеспечения нейроонкологических операций.

Для интраоперационной флуоресцентной визуализации при опухолях ГМ используют 5-аминолевулиновую кислоту (АЛК), которую большой применяют внутри за 6 ч до операции. Будучи прекурсором гемоглобина, АЛК способствует синтезу и накоплению порфиринов в эпителии и тканях злокачественных опухолей, в частности, глиом. Ткани, накопившие флуоресцирующие порфирины, визуализируются в излучении фиолетовой части спектра (400 нм), что позволяет идентифицировать границы злокачественных опухолей в ГМ. Кроме того, предложены методы комбинированного использования интраоперационной флуоресценции и фотодинамической терапии. По данным рандомизированных мультицентровых исследований результатов хирургического лечения больших по поводу глиобластом ГМ с использованием интраоперационной флуоресценции установлено увеличение степени радикальности операций без неблагоприятных последствий, а также уменьшение частоты рецидивов в сроки наблюдения до 6 мес после операции по сравнению с таковой после применения стандартных хирургических методов [9, 38, 39].

Резекция опухолей, непосредственно инфильтрующих или прилегающих к ФВЗ полушарий большого мозга, чревата травмированием интактной нервной ткани, сопровождается высоким риском послеоперационного неврологического дефицита. Для предупреждения послеоперационных неврологических нарушений у больных необходимы точная локализация опухоли с определением расположения ФВЗ и контролируемое удаление ткани опухоли с использованием минимально инвазивных хирургических методов.

Принципиально новые возможности хирургического лечения опухолей ФВЗ ГМ обеспечивает методология их микрохирургического удаления с применением лазерных технологий при навигационном сопровождении. Прицельное контролируемое

воздействие лазерного луча используют для селективной лазерной термодеструкции ткани опухоли при поражении ФВЗ ГМ или поэтапного лазерного испарения (вапоризации) перифокальной зоны роста опухоли.

Сочетанное применение эндоскопической и навигационной техники позволило повысить эффективность удаления глубоко расположенных интракраниальных очагов, интравентрикулярных или паравентрикулярных новообразований ГМ [40, 41]. Перспективы развития нейроэндоскопических технологий связаны с дальнейшей минимизацией оптических систем и внедрением стереоскопической эндоскопии, предоставляющей изображение операционного поля в 3D-пространстве, а также более тесной интеграцией эндоскопов со станциями предоперационного планирования и интраоперационной МРТ, что направлено на достижение качественно нового уровня интраоперационного ориентирования и контроль возникающей хирургической ситуации [42, 43].

Инновационные технологии нейровизуализационного обеспечения в хирургии опухолей ГМ с использованием МН для предоперационного планирования хирургического вмешательства, оптимизации хирургического доступа, а также интраоперационного сопровождения и контроля хирургических манипуляций у больных при опухолях полушарий большого мозга позволяют обеспечить точность и безопасность хирургического воздействия, повысить радикальность удаления опухоли, минимизировать хирургическую травму, снизить риск возникновения послеоперационного неврологического дефицита, повысить качество жизни оперированных больных.

Выводы. 1. Комплексный анализ данных МН на этапах предоперационного планирования позволяет определить анатомо-топографические особенности распространения опухоли, получить информацию о характере и степени поражения ФВЗ и срединных структур ГМ, выявить изменения структур ГМ, обусловленные ростом и объемным действием опухоли.

2. Предоперационное мультимодальное навигационное планирование с применением интегрированных данных нейровизуализации и моделирования в виртуальном компьютерном пространстве анатомических и функциональных образований позволяет выбрать траекторию и безопасные пределы хирургического доступа, определить оптимальный объем резекции ткани опухоли, а также оценить риск возможной интраоперационной травматизации ФВЗ ГМ.

3. Сопоставление данных виртуального предоперационного навигационного планирования с реальными топографическими соотношениями анатомических структур в операционном поле обеспечивает интраоперационную ориентацию и контролируемое выполнение хирургических манипуляций с одновременной регистрацией этапов операции с помощью системы видеомониторинга.

4. Интраоперационное сопровождение с использованием МН обеспечивает высокую точность хирургических манипуляций и функциональную сохранность структур ГМ, что способствует уменьшению степени риска возникновения послеоперационного неврологического дефицита.

Список литературы

1. Розуменко В.Д. Нейроонкология: современное состояние проблемы / В.Д. Розуменко // Онкология. — 2006. — Т.8, №2. — С.188–191.
2. Hoffman S. Temporal trends in incidence of primary brain tumors in the United States, 1985–1999 / S. Hoffman, M. Jennifer, J. Bridget // *NeuroOncology*. — 2006. — V.8, N1. — P.27–37.
3. Intraoperative subcortical language tract mapping guides surgical removal of gliomas involving speech areas / L. Bello, M. Gallucci, M. Fava, G. Carrabba, C. Giussani, F. Acerbi, P. Baratta, V. Songa, V. Conte, V. Branca, N. Stocchetti, C. Papagno, SM. Gaini // *Neurosurgery*. — 2007. — V.60, N1. — P.67–80.
4. Motor functional MRI for preoperative and intraoperative neurosurgical guidance / I.D. Wilkinson, C.A. Romanowski, D.A. Jellinek, J. Morris, P.D. Griffiths // *Br. J. Radiol.* — 2003. — V.76, N902. — P.98–103.
5. Treatment outcomes and prognostic factors in patients with supratentorial low-grade gliomas / S.A. Ho, J.T. Lui, C.C. Huang, Y.J. Huang, C.Y. Hsiung, E.Y. Huang // *Br. J. Radiol.* — 2005. — V.78, N927. — P.230–235.
6. Barker F.G. Surgery for primary supratentorial brain tumors in the United States, 1988 to 2000: the effect of provider caseload and centralization of care / F.G. Barker, W.T. Curry, B.S. Carter // *NeuroOncology* — 2005. — V.7, N1. — P.49–63.
7. Present day's standards in microsurgery of low-grade gliomas / L. Bello, E. Fava, G. Carrabba [et al.] // *Advances and Technical Standards in Neurosurgery*. Vol.35. Low-Grade Gliomas; ed. J. Schramm. — Wien: Springer-Verlag, 2010. — P.113–158.
8. A multivariate analysis of 416 patients with glioblastoma multiforme: Prognosis, extent of resection, and survival / M. Lacroix, D. Abi-Said, D.R. Fournier, Z.L. Gokaslan, W. Shi, F. DeMonte, F.F. Lang, I.E. McCutcheon, S.J. Hassenbusch, E. Holland, K. Hess, C. Michael, D. Miller, R. Sawaya // *J. Neurosurg.* — 2001. — V.95, N2. — P.190–198.
9. Extent of resection and survival in glioblastoma multiforme: Identification of and adjustment for bias / W. Stummer, H.J. Reulen, T. Meinel, U. Pichlmeier, W. Schumacher, J.C. Tonn, V. Rohde, F. Oettel, B. Turowski, C. Woiciechowsky, K. Franz, T. Pietsch // *Neurosurgery*. — 2008. — V.62, N3. — P.564–576.
10. Gil-Robles S. Surgical management of World Health Organization Grade II gliomas in eloquent areas : the necessity of preserving a margin around functional structures / S. Gil-Robles, H. Duffau // *Neurosurg. Focus*. — 2010. — V.28, N2. — E.8.
11. González-Darder J. M. Management of brain tumors in eloquent areas / J. M González-Darder, P. González-López // *Diagnostic techniques and surgical management of brain tumors*; ed. A.L. Abujamra. — Croatia: InTech, 2011. — P.455–492.
12. Effectiveness of neuronavigation in resecting solitary intracerebral contrast-enhancing tumors: a randomized controlled trial / P.W. Willems, M.J. Taphoorn, H. Burger, J.W. Berkelbach van der Sprenkel, C.A. Tulleken // *J. Neurosurg.* — 2006. — V.104, N3. — P.360–368.
13. Image-guided resection of high-grade glioma: Patient selection factors and outcome / N. Scottlitofsky, A.M. Bauer, R.S. Kasper, C.M. Sullivan, O.H. Dabbous // *Neurosurg. Focus*. — 2006. — V.20, N4. — E.16.
14. Impact of neuronavigation and image-guided extensive resection for adult patients with supratentorial malignant astrocytomas: a single-institution retrospective study / M. Kurimoto, N. Hayashi, H. Kamiyama [et al.] // *Min. Invas. Neurosurg.* — 2004. — N47. — P.278–283.
15. González-Darder J.M. Multimodal navigation in the functional microsurgical resection of intrinsic brain tumors located in eloquent motor areas: Role of tractography / J.M. González-Darder, P. González-López, F. Talamantes // *Neurosurg. Focus*. — 2010. — V.28, N2. — E.5.
16. 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 / I.A.

- Rasmussen, F. Lindseth, O.M. Rygh [et al.] // *Acta Neurochir.* — 2007. — V.149. — P.365–378.
17. Enchev Y. Neuronavigation: Geneology, reality, and prospects / Y. Enchev // *Neurosurg. Focus.* — 2009. — N27. — E.11
 18. Пат. 43428 Україна, МПК А61В10/00. Система хірургічної нейронавігації / В.Д. Розуменко. — №u200904255; заявл. 29.04.09; опубл. 10.08.09. Бюл.№15.
 19. Neurosurgical outcomes in a modern series of 400 craniotomies for treatment of parenchymal tumors / R. Sawaya, M. Hammoud, D. Schoppa, K.R. Hess, S.Z. Wu, W.M. Shi WM, D.M. Wildrick // *Neurosurgery.* — 1998. — V.5, N42. — P.1044–1055.
 20. Independent association of extent of resection with survival in patients with malignant brain astrocytoma / M.J. McGirt, K.L. Chaichana, M. Gathinji, F.J. Attenello, K. Than, A. Olivi, J.D. Weingart, H. Brem, A.R. Quiñones-Hinojosa // *Neurosurgery.* — 2009. — V.110, N1. — P.156–162.
 21. Lumenta C. B. Image-Guided Neurosurgery / C.B. Lumenta, H. Gumprecht, M. Krammer // *Neurosurgery*; eds. C.B. Lumenta, C. Di Rocco, J. Haase, A. Mooij. — Berlin: Springer-Verlag, 2010. — P.579–590.
 22. Sanghvi D.A. Recent advances in imaging of brain tumors / D.A. Sanghvi // *Ind. J. Cancer.* — 2009. — V.46, N2. — P.82–87.
 23. Upadhyay U.M. Role of pre- and intraoperative imaging and neuronavigation in neurosurgery / U.M. Upadhyay, A.J. Golby // *Expert Rev. Med. Devices.* — 2008. — V.5, N1. — P.65–73.
 24. Kall B.A. Image Reconstruction and Fusion / B.A. Kall // *Textbook of Stereotactic and Functional Neurosurgery*; eds. A.M. Lozano, P.L. Gildenberg, R.R. Tasker. — Berlin: Springer-Verlag, 2009. — P.335.
 25. Schulz C. Intraoperative image guidance in neurosurgery: Development, current indications, and future trends / C. Schulz, S. Waldeck, U.M. Mauer // *Radiol. Res. Pract.* — 2012. — 197364.
 26. Virtual reality presurgical planning for cerebral gliomas adjacent to motor pathways in an integrated 3-D stereoscopic visualization of structural MRI and DTI tractography / T. M. Qiu, Y. Zhang, J.S. Wu, W.J. Tang, Y. Zhao, Z.G. Pan, Y. Mao, L.F. Zhou // *Acta Neurochir. (Wien).* — 2010. — V.152, N11. — P.1847–1857.
 27. Application accuracy of automatic registration in frameless stereotaxy / J. Rachinger, B. von Keller, O. Ganslandt [et al.] // *Stereotact. Funct. Neurosurg.* — 2006 — V.84. — P.109–117.
 28. Васильев С.А. Ультразвуковая навигация в хирургии опухолей головного мозга. Часть 2 / С.А. Васильев, А.А. Зуев // *Нейрохирургия.* — 2010. — №4. — С.16–23.
 29. Intraoperative visualization for resection of gliomas: the role of functional neuronavigation and intraoperative 1.5 T MRI / C. Nimsky, O. Ganslandt, M. Buchfelder [et al.] // *Neurol. Res.* — 2006. — V.28. — P.482–487.
 30. Jolesz F.A. Future perspectives for intraoperative MRI / F.A. Jolesz // *Neurosurg. Clin. N. Am.* — 2005. — V.16. — P.201–213.
 31. Berman J. Diffusion MR tractography as a tool for surgical planning / J. Berman // *Magn. Reson. Imag. Clin. N. Am.* — 2009. — V.17, N2. — P.205–214.
 32. Stippich C. Presurgical functional magnetic resonance imaging / C. Stippich // *Radiologe.* — 2010. — V.50, N2. — P.110–122.
 33. Is the image guidance of ultrasonography beneficial for neurosurgical routine? / D. Miller, S. Heinze, W. Tirakotai, O. Bozinov, O. Sürücü, L. Benes, H. Bertalanffy, U. Sure // *Surg. Neurol.* — 2007. — V.67, N6. — P.579–587.
 34. Neuronavigation based on intraoperative 3D-ultrasound during tumor resection / D. Lindner, T.C. Trantakis, V. Arnold [et al.] // *Intern. Congr. Series.* — 2005. — V.128. — P.81–82.
 35. Integration of diffusion tensor-based arcuate fasciculus fibre navigation and intraoperative MRI into glioma surgery / Y. Zhao, X. Chen, F. Wang, G. Sun, Y. Wang, Z. Song, B. Xu // *J. Clin. Neurosci.* — 2012. — V.19, N2. — P.255–261.
 36. Multimodal navigation integrated with imaging / C. Nimsky, D. Kuhnt, O. Ganslandt, M. Buchfelder // *Acta. Neurochir.* — 2011. — V.109, suppl. — P.207–214.
 37. Romano A. Pre-surgical planning and MR-tractography utility in brain tumour resection / A. Romano, G. D'Andrea, G. Minniti // *Eur. Radiol.* — 2009. — V.19, N12. — P.2798–2808.
 38. Eljamel M.S. ALA and Photofrin fluorescence-guided resection and repetitive PDT in glioblastoma multiforme: a single centre Phase III randomised controlled trial / M.S. Eljamel, C. Goodman, H. Moseley // *Lasers. Med. Sci.* — 2008. — V.23, N4. — P.361–367.
 39. Improving the extent of malignant glioma resection by dual intraoperative visualization approach / I.Y. Eyüpoglu, N. Hore, N.E. Savaskan, P. Grummich, K. Roessler, M. Buchfelder, O. Ganslandt // *PLoS One.* — 2012. — V.7, N9. — E44885.
 40. Grunert P. Technical and clinical evolution of modern neuroendoscopy / P. Grunert, J. Oertel // *Advances in Endoscopic Surgery*; ed. C. Iancu. — Croatia: InTech, 2011. — P.175–190.
 41. Caird J.D. Technical aspects of image-guided neuroendoscopy / J.D. Caird, J.M. Drake // *Textbook of Stereotactic and Functional Neurosurgery*; eds. A.M. Lozano, P.L. Gildenberg, R.R. Tasker. — Berlin: Springer-Verlag, 2009. — P.807–814.
 42. Endoscopic skull base surgery. A comprehensive guide with illustrative cases / H.K. Shahinian M. Kabil, R. Jarrahy, M.-P. Thill. — N.Y.: Humana Press, 2008. — 197 p.
 43. Endoscopic pituitary surgery / P. Cappabianca, L. Cavallo, O. de Divitiis, D. Solari, F. Esposito, A. Colao // *Pituitary.* — 2008. — V.11, N4. — P.385–390.

Розуменко В.Д., Розуменко А.В., Яворський О.А., Бобрик І.С.

Відділення внутрішньомозкових пухлин, Інститут нейрохірургії ім. акад. А.П. Ромоданова НАМН України, Київ, Україна

Застосування мультимодальної нейронавігації в передопераційному плануванні та інтраопераційному супроводі при хірургічному лікуванні пухлин головного мозку

Мета. Оптимізація технології хірургічного лікування хворих з приводу пухлин головного мозку з використанням мультимодальної нейронавігації.

Матеріали і методи. У дослідження включені 443 хворих, які з приводу пухлин півкуль великого мозку оперовані з застосуванням нейронавігації. Тактику хірургічного лікування планували, беручи до уваги дані комплексного клініко-неврологічного обстеження і результати нейровізуалізаційних методів дослідження. Для передопераційного 3D-планування та інтраопераційного супроводу використовували систему хірургічної нейронавігації «StealthStation TREON plus» (Medtronic, США).

Результати. Субтотальне видалення пухлин здійснене у 252 (56,9%) хворих, тотальне — у 161 (36,3%), парціальне — у 30 (6,8%).

За клінічної оцінки функціонального статусу хворих відзначене збільшення показника після операції з 68,4 до 86,2 бала (за шкалою Карновскі).

Висновки. Інноваційні технології нейровізуалізуючого забезпечення при хірургії пухлин головного мозку з використанням нейронавігації для передопераційного планування хірургічного втручання, а також інтраопераційного супроводу та контролю хірургічних маніпуляцій у хворих дозволяють забезпечити точність і безпеку хірургічного впливу, підвищити радикальність видалення пухлини, мінімізувати хірургічну травму, знизити ризик виникнення післяопераційного неврологічного дефіциту, покращити якість життя оперованих хворих.

Ключові слова: пухлини головного мозку, функціонально важливі зони головного мозку, мультимодальна нейронавігація, передопераційне планування.

Укр. нейрохірург. журн. — 2014. — №4. — С. 23-31.

Надійшла до редакції 23.06.14. Прийнята до публікації 19.09.14.

Адреса для листування: Розуменко Володимир Давидович, Відділення внутрішньомозкових пухлин, Інститут нейрохірургії ім. акад. А.П. Ромоданова, вул. Платона Майбороди, 32, Київ, Україна, 04050, e-mail: rozumenko.neuro@gmail.com

Rozumenko V.D., Rozumenko A.V., Yavorskyi A.A., Bobryk I.S.

Intracerebral Tumors Department, Institute of Neurosurgery named after acad. A.P. Romodanov, NAMS of Ukraine, Kiev, Ukraine

Multimodal neuronavigation in preoperative planning and intraoperative orientation in brain tumors surgery

Purpose. Brain tumors surgery optimization using multimodal neuronavigation (MN).

Materials and methods. 443 patients with brain tumors, been operated with MN, were included in the study. Surgical treatment tactics was planned taking into account data of comprehensive clinical and neurological examination and results of neurovisualising methods. For preoperative planning and 3D-tracking system we used intraoperative surgical neuronavigation «StealthStation TREON plus» (Medtronic, USA).

Results. Tumors subtotal removing was performed in 252 (56.9%) patients, total — in 161 (36.3%), partial — in 30 (6.8%).

Clinical estimation of patients' functional state showed it's index increasing in postoperative period from 68.4 to 86.2 point (according to Karnofsky scale).

Conclusions. Innovative neuroimaging technologies in brain tumors surgery using neuronavigation for preoperative planning and intraoperative control of surgical manipulations allow to provide high accuracy and safety of the surgery, to increase it's radicalism, to minimize surgical trauma, to reduce the risk of postoperative neurological deficits and to improve life quality of operated patients.

Key words: brain tumor, eloquent brain areas, multimodal neuronavigation, preoperative planning.

Ukr Neyrokhir Zh. 2014; 4: 23-31.

Received, June 23, 2013. Accepted, September 19, 2014.

Address for correspondence: Volodymyr Rozumenko, Intracerebral Tumors Department, Institute of Neurosurgery named after acad. A.P. Romodanov, 32 Platona Mayborody St., Kiev, Ukraine, 04050, e-mail: rozumenko.neuro@gmail.com