

ИНТРАОПЕРАЦИОННОЕ КАРТИРОВАНИЕ В УСЛОВИЯХ НАРКОЗА И В СОЗНАНИИ ПРИ УДАЛЕНИИ ГЛИАЛЬНЫХ ОПУХОЛЕЙ МОТОРНОЙ КОРЫ

Гвоздев П.Б.¹, Лаврова С.А.¹, Яблонский Л.Н.²

¹ГАОУЗ СО «Свердловский областной онкологический диспансер», Екатеринбург, e-mail: rb4747@yandex.ru;

²ФГБОУ ВО «Уральский государственный медицинский университет» Министерства здравоохранения РФ, Екатеринбург

Проанализированы результаты хирургического лечения 49 пациентов с глиальными опухолями головного мозга, прооперированных в ГАОУЗ СО СООД г. Екатеринбурга с использованием интраоперационного картирования, выполненного в условиях общей анестезии и в сознании. Опухоли располагались непосредственно в прецентральной извилине и пирамидном тракте либо вблизи них. Во всех случаях стремились к максимально полному удалению опухолей. В 14 случаях картировали первичную моторную кору и пирамидный тракт, в 35 случаях – только пирамидный тракт. 19 пациентов картировали по протоколу «сон – пробуждение – сон», 30 пациентов – в условиях наркоза. В процессе операции оценивались параметры тока и варианты стимуляции при идентификации моторной коры и тракта, близость к пирамидному тракту в процессе удаления опухоли. Во всех случаях изучались полнота удаления новообразований и динамика неврологического статуса пациентов. По локализации очагов преобладала лобная доля – 49% (24). Теменная доля представлена 20,5% (10), лобно-теменная – 12% (6), височная доля – 8% (4), островковая доля – 6% (3), подкорковая локализация и таламус – 4% (2). Морфологическая структура глиом распределялась следующим образом по Grade WHO: Grade I – 2 (4%), Grade II – 13 (27%), Grade III – 8 (16%), Grade IV – 22 (45%). Верифицировать пирамидный тракт и моторную кору удалось в 74% случаев. Пирамидный тракт в наркозе идентифицирован у 93% пациентов, кора – у 71%. В сознании моторная кора идентифицирована у 52% картированных. При использовании низкочастотной стимуляции пирамидный тракт идентифицирован у 84% пациентов, при высокочастотной – у 95%. Тотальное удаление опухоли достигнуто у 74% пациентов, субтотальное – у 26%. Динамика очаговых неврологических симптомов в раннем послеоперационном периоде представлена углублением парезов – 14%, регрессом парезов – 17,5%, без динамики – 66,5%.

Ключевые слова: картирование мозга, пирамидный тракт, нейромониторинг, моторная кора.

SURGICAL TREATMENT OF GLIAL BRAIN TUMORS WITH INTRAOPERATIVE MAPPING OF THE MOTOR CORTEX AND PYRAMIDAL TRACT UNDER ANESTHESIA AND IN CONSCIOUSNESS

Gvozdev P.B.¹, Lavrova S.A.¹, Yablonskiy L.N.²

¹ State autonomous institution of Sverdlovsk region «Sverdlovsk regional oncology dispensary», Ekaterinburg, e-mail: rb4747@yandex.ru;

² Federal State Budget Educational Institution of Higher Education «Ural State Medical University», Ekaterinburg

The study objective is to analyze the surgical treatment results of 49 patients with glial brain tumors operated using the intraoperative mapping technique, performed under general anesthesia and in consciousness were operated on at the Sverdlovsk Regional Oncological Center in Yekaterinburg. The brain gliomas located directly or near the precentral gyrus and pyramidal tract. In 14 cases, the primary motor cortex and pyramidal tract were mapped, in 35 cases – only the pyramidal tract. 19 patients were mapped according to the sleep-wake-sleep protocol, 30 patients – under anesthesia. During the operation, the current parameters and the variants of stimulation were assessed when identifying the motor cortex and tract, as well as the proximity to the pyramidal tract during the tumor removal. In all cases, the completeness of neoplasms removal and the dynamics of the patients' neurological status were studied. According to the localization of foci, the frontal lobe prevailed in 49% (24). The parietal lobe is represented by 20.5% (10), the fronto-parietal localization is 12% (6), the temporal lobe is 8% (4), the insular lobe is 6% (3), the subcortical localization and thalamus are 4% (2). The morphological structure of gliomas was distributed as follows according to Grade WHO: Grade I – 2 (4%), Grade II – 13 (27%), Grade III – 8 (16%), Grade IV – 22 (45%). The pyramidal tract and motor cortex were verified in 74% of cases. The pyramidal tract in anesthesia was identified in 93% of patients, the cortex in 71%. In consciousness, the motor cortex was identified in 52% of those mapped. When using low-frequency stimulation, the pyramidal tract was identified in 84% of patients, with high-frequency stimulation – in 95%. Total tumor removal was achieved in 74% of patients, subtotal – 26%. The dynamics of focal neurological symptoms in the early postoperative period is represented by the deepening of paresis – 14%, regression of paresis – 17.5%, without dynamics – 66.5%.

Keywords: brain mapping, pyramidal tract, neuromonitoring, motor cortex.

Первые успешные попытки нейрофизиологической идентификации прецентральной извилины у пациентов с эпилепсией, оперированных в сознании с целью сохранения двигательной функции, принадлежат W.G. Penfield (1950 г.). Для этого проводилась визуальная оценка реакции в виде двигательных ответов противоположных конечностей. В 1990-е гг. и 2000-е гг. в клиниках мира появилась и получила распространение методика картирования в наркозе, где не требуется наличия сознания пациента для интраоперационной идентификации пирамидного тракта. Преимущества и недостатки того или иного метода, а также параметры стимуляции для оптимальной идентификации функционально важных структур мозга до сих пор являются почвой для научных исследований в современной нейрохирургии [1].

На долю глиальных опухолей приходится более половины всех первичных новообразований головного мозга [2]. До сих пор проблемой современной нейрохирургии является проведение хирургического лечения новообразований, вовлекающих функционально важные структуры головного мозга. Опухоли, располагающиеся вблизи прецентральной извилины, пирамидного тракта, традиционно считались потенциально опасными для полноценного удаления и оперировались с неприемлемым процентом неврологических осложнений – до 30% [3, 4] – либо удалялись не полностью, что приводило к раннему продолженному росту опухоли и неэффективности проводимой химиолучевой терапии. Известно, что адьювантная терапия (лучевая, химиотерапия, иммунотерапия) более эффективна при небольших размерах опухоли или небольшом объеме остаточной ткани [5]. Доказано, что именно полнота удаления новообразования имеет решающее значение в прогнозе и значительно влияет на продолжительность безрецидивного периода и показатели выживаемости у пациентов с глиомами всех степеней злокачественности по WHO [6-8]. Поэтому задачей нейрохирургов при хирургическом лечении таких пациентов является стремление к соблюдению онкофункционального баланса: высокая полнота удаления опухоли без ухудшения функционального статуса [9, 10].

В статье мы приводим анализ результатов хирургического лечения пациентов с глиомами функционально важных зон головного мозга при использовании методики картирования для сохранения двигательной функции. Все пациенты были прооперированы на базе Свердловского областного онкологического диспансера за период 2007–2020 гг.

Материалы и методы исследования

Проведен анализ результатов хирургического лечения 49 пациентов с картированием моторной зоны коры и пирамидного тракта головного мозга. Критериями выбора пациентов

для удаления с нейрофизиологическим мониторингом служили локализация опухоли вблизи функционально важных зон головного мозга (вблизи пирамидного тракта на протяжении от моторной коры до внутренней капсулы), отсутствие грубого неврологического дефицита (отсутствие плегий), ясный уровень сознания пациента, отсутствие грубых речевых нарушений.

Части пациентам (14), у которых опухоль располагалась вблизи прецентральной извилины или непосредственно в ней, картировали моторную кору (4-е цитоархитектоническое поле Бродмана) и пирамидный тракт. Остальным пациентам (35), у которых опухоль располагалась в белом веществе полушарий и прорастала до волокон пирамидного тракта, картировали только пирамидный тракт на протяжении прецентральной извилины – внутренней капсулы.

Для интраоперационного мониторинга использовались система нейрوديagnostическая модульная Nicolet Viking Quest, программа интраоперационного мониторинга (ИОМ). В исследовании применялись методики ЭМГ:

- 1) интерференционная электромиография;
- 2) стимуляционная электронейромиография.

Для стимуляции коры использовался электрод стимуляционный многоразовый прямой биполярный («кортикальная вилка») – диаметр контактов 2 мм, длина контактов 10 мм, расстояние между контактами 5 мм.

Для стимуляции пирамидных трактов применялись:

- 1) электрод стимуляционный многоразовый монополярный с изолированным корпусом, изгиб 30 градусов, диаметр контактов 1,5 мм, длина рабочей части 90 мм;
- 2) стимулятор-аспиратор Раабе (электрод стимуляционный монополярный с изолированным корпусом, с функцией аспирации, длина кольцевидного контакта 2 мм, длина рабочей части 120 мм).

Для регистрации моторных ответов использовались электроды игольчатые парные, прямые, игла 0,45x20 мм, кабель 2 м, разъем типа «touchproof». Проводилась регистрация ответов с тех мышц, которые имеют относительно большое представительство в моторной коре [11]. Для заземления и в качестве референтного электрода при монополярной стимуляции применялись электроды игольчатые одинарные прямые, 15 мм.

Пациенты были разделены на две группы. Первая группа (19 человек) представлена пациентами, прооперированными по протоколу «сон – пробуждение – сон» для картирования первичной моторной коры (картирование в сознании). Картирование проводили после трепанации черепа и вскрытия твердой мозговой оболочки после приведения пациента в ясное сознание. Наркоз проводили без релаксантов длительного

действия (только на период интубации). Для стимуляции коры при пробуждении использовались следующие параметры тока: частота 60–100 Гц (методика Пенфилда – низкочастотная стимуляция), биполярная, бифазные импульсы длительность 0,2 мс, межстимульный интервал 0,2 мс, частота 60–100 Гц, сила тока 2–5 мА. Интраоперационное выведение на сознание пациентов позволило достоверно оценить эффекты стимуляции коры в виде остановки произвольных движений в соответствующей конечности и невозможности выполнить двигательные команды, исключая остаточное действие релаксантов и наркоза. Участок коры, где был получен такой ответ, маркировался. Картирование коры в среднем занимало 5–7 мин. После идентификации моторной коры пациенту был продолжен наркоз, и дальнейшее удаление опухоли проводилось без захода за маркированные границы моторной зоны коры. Мониторинг пирамидного тракта этой группе пациентов не проводился.

Во второй группе (30 человек) пирамидный тракт и кору картировали в наркозе, без пробуждения (общая анестезия без релаксантов). Критерием идентификации пирамидного тракта и коры в наркозе был ответ с мышц соответствующих конечностей и лица в условиях непрерывной записи интерференционной ЭМГ и непрерывной оценки моторных ответов.

Для стимуляции коры в наркозе использовали следующие параметры: биполярная стимуляция пачками импульсов по Taniguchi (высокочастотная стимуляция): серия (train) из 4 импульсов в серии частотой 500 Гц длительностью 0,2 мс каждый, сила тока от 2 до 10 мА. При стимуляции коры в наркозе начинали с методики по Taniguchi, при отсутствии результата применялась стимуляция по Пенфилду (аналогично вышеописанной).

При стимуляции пирамидных трактов в наркозе использовали только монополярную методику, в основном по Taniguchi (стимуляция пачками импульсов), сила тока от 3 до 33 мА. Вид стимулятора выбирали в зависимости от предполагаемой локализации трактов и общей операционной ситуации (либо обычный монополярный стимулятор, либо стимулятор-аспиратор Раабе).

Суть интраоперационного мониторингирования пирамидного тракта заключалась в том, чтобы заранее обнаружить и сохранить его целостность в процессе всего этапа удаления опухоли, расположенной в непосредственной близости к волокнам тракта. Для определения близости к тракту в процессе удаления руководствовались условным правилом: 1 мА = 1 мм [11]. Такая методика «подстраховывает» хирурга, позволяя ему достоверно определять расстояния до опасной зоны, особенно в условиях удаления глиальных опухолей, не имеющих четких границ, в том числе при использовании флюороскопии для метаболической навигации с 5-аминолевулиновой кислотой (5-АЛК).

Для статистической обработки результатов использован пакет прикладных программ Microsoft Excel, MedCalc. Применялись метод с использованием U-критерия Манна–Уитни

для количественных признаков, а также метод построения ROC-кривой. У всех пациентов было получено информированное добровольное согласие на медицинское вмешательство и на обработку персональных данных.

Результаты исследования и их обсуждение

Ведущим симптомом дебюта заболевания в нашей группе пациентов были эпилептические припадки, доля которых составляла 53% (26) от остальных симптомов. Процент дооперационного неврологического дефицита в виде пирамидной недостаточности составил 45% (22). Неврологический статус был в пределах нормы у 30% (15) исследуемых. По полу пациенты распределились следующим образом: мужчины – 37% (18); женщины – 63% (31). Средний возраст пациентов составил 54 года (22–78 лет).

По локализации новообразования преобладала лобная доля – 49% (24). Теменная доля представлена 20,5% (10), лобно-теменная локализация – 12% (6), височная доля – 8% (4), островковая доля – 6% (3), подкорковая локализация и таламус – 4% (2). Морфологическая структура глиом распределилась следующим образом по Grade WHO: Grade I – 2 (4%), Grade II – 13 (27%), Grade III – 8 (16%), Grade IV – 22 (45%). Гистологические варианты опухолей представлены в таблице 1. Изучены размеры новообразований: средний размер составил 37,6 мм (минимальный – 15 мм, максимальный – 68 мм).

Таблица 1

Гистологические варианты глиальных опухолей

Вариант Variant	Grade (WHO)	Количество Quantity
Глиобластома Glioblastoma	IV	21
Анапластическая астроцитома Anaplastic astrocytoma	III	8
Фибриллярная астроцитома Fibrillar astrocytoma	II	4
Фибриллярно-протоплазматическая астроцитома Fibrillar-protoplasmic astrocytoma	II	4
Олигодендроглиома Oligodendroglioma	II	2
Пиломиксоидная астроцитома Pilomyxoid astrocytoma	I-II	2
Протоплазматическая астроцитома Protoplasmic astrocytoma	II	3
Анапластическая олигодендроглиома Anaplastic oligodendroglioma	III-IV	1
Гемистоцитарная астроцитома Hemistocytic astrocytoma	II	1

Олигоастроцитома Oligoastrocytoma	II	3
--------------------------------------	----	---

Мы сравнили результаты идентификации пирамидного тракта и моторной коры у пациентов, картированных в сознании (с интраоперационным пробуждением) и в наркозе. Также сравнили эффективность обоих видов стимуляции (низко- и высокочастотной) для точности идентификации моторной коры и тракта. Минимальные и максимальные значения силы тока при разных видах стимуляции, при которых идентифицированы моторная кора или тракт, показаны в таблице 2. Минимальные значения тока отражают близость зоны манипуляций к пирамидному тракту в процессе удаления опухоли. Максимальные значения свидетельствуют об отдаленности моторной коры и пирамидного тракта от траектории доступа и зоны церебротомии.

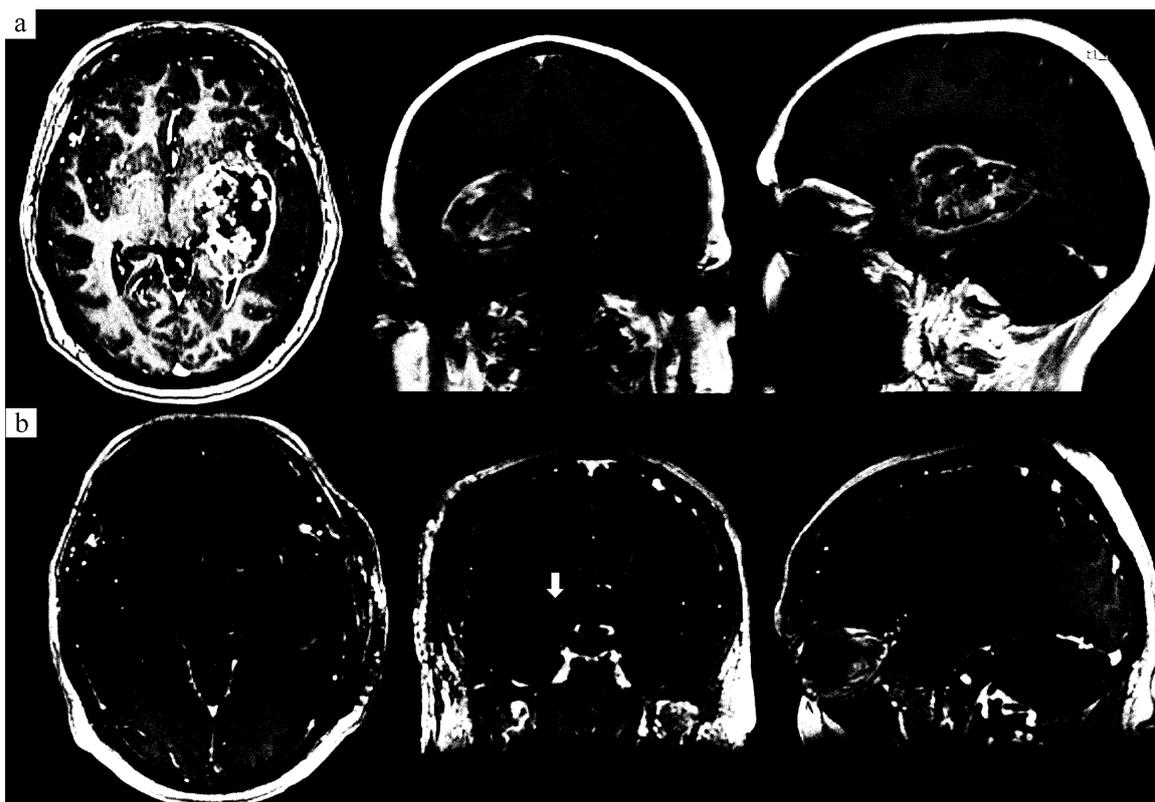
Таблица 2

Результаты стимуляции коры и пирамидного тракта у пациентов в наркозе и с пробуждением

	В наркозе Under general anesthesia		В сознании awakening
	Низкочастотная low-frequency	Высокочастотная high-frequency	Низкочастотная low-frequency
Процент идентификации тракта Percent of the tract identification	84%	95%	—
Процент идентификации моторной коры Percent of the motor cortex identification	75%	67%	52%
Параметры тока при идентификации коры, мА, Me (Q ₂₅ ; Q ₇₅) Current parameters when identifying the cortex, mA, Me (Q ₂₅ ; Q ₇₅)	6,5 (5,0;8,0)	4,0 (2,5;7,5)	2(2,0;3,0)
Параметры тока при идентификации тракта, мА, Me (Q ₂₅ ; Q ₇₅) Current parameters when identifying the tract, mA, Me (Q ₂₅ ; Q ₇₅)	10 (5,75;15,0)	16,0 (5,0;26,75)	—
Интраоперационный припадок Intraoperative seizure	2	—	1
Процент углубления неврологического дефицита Percent of a neurological deficit deepening	17%		11%

Верифицировать пирамидный тракт и моторную кору удалось в 74% случаев в целом. Пирамидный тракт в наркозе удалось идентифицировать у 93% пациентов, кору – лишь у 71%. Низкий процент идентификации коры обусловлен, скорее всего, отсутствием открытой прецентральной извилины в пространстве трепанационного окна. В сознании верифицировали только моторную кору (без трактов), которая была выявлена у 52% картированных. 3 пациента не вышли на ясное сознание после вскрытия твердой мозговой оболочки и не выполнили команды. У 5 пациентов не было получено моторных ответов с коры, находящейся в зоне трепанационного окна, в 1 случае картирование не удалось из-за кашля и резкого повышения ВЧД, что привело к необходимости продолжения наркоза и отказа от картирования. Мы не превышали параметры тока 10 мА при корковой стимуляции для снижения риска возникновения эпилептического припадка.

При использовании низкочастотной стимуляции пирамидный тракт идентифицирован у 84% пациентов, при высокочастотной – у 95% (рис. 1).



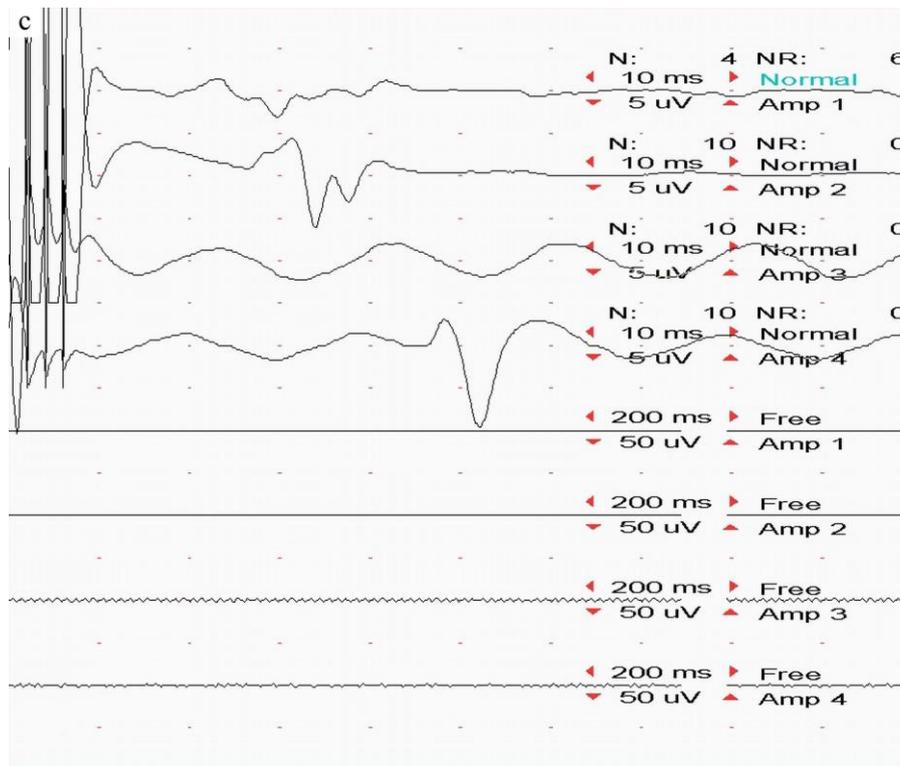


Рис. 1. Пациентка 68 лет с глиобластомой правой височной доли

a, b – МРТ до и после операции соответственно. Картирование пирамидного тракта проводилось в наркозе. В послеоперационном периоде нарастания пирамидной симптоматики не наблюдалось. **c** – фотография с монитора миографа. М – ответ получен с кисти, предплечья и стопы при высокочастотной стимуляции трейнами на минимальный параметр стимуляции силой тока 4,7 мА при удалении самых медиальных отделов опухоли. Зона стимуляции показана белой стрелкой. Регистрирующие электроды:

- 1-й канал – M extensor indicis sin
- 2-й канал – m abductor pollicis brevis sin
- 3-й канал – m tibialis anterior sin
- 4-й канал – m abductor hallucis sin

В нашем исследовании процент индуцированных судорог выше при картировании в наркозе, чем в сознании. Все припадки в наркозе были при использовании только низкочастотной стимуляции при стимуляции коры. При стимуляции же коры трейнами припадков не было. Мы не использовали высокочастотную стимуляцию для картирования моторной коры у пациентов в сознании ввиду отсутствия технической возможности.

Наибольший успех в идентификации тракта и коры был достигнут у больных с отсутствием исходных парезов и с высокодифференцированным медленно растущим типом опухоли (Grade I–II). У пациентов с локализацией образования вблизи прецентральной извилины наибольший ответ при стимуляции представлен проекцией зоны руки (рис. 2).

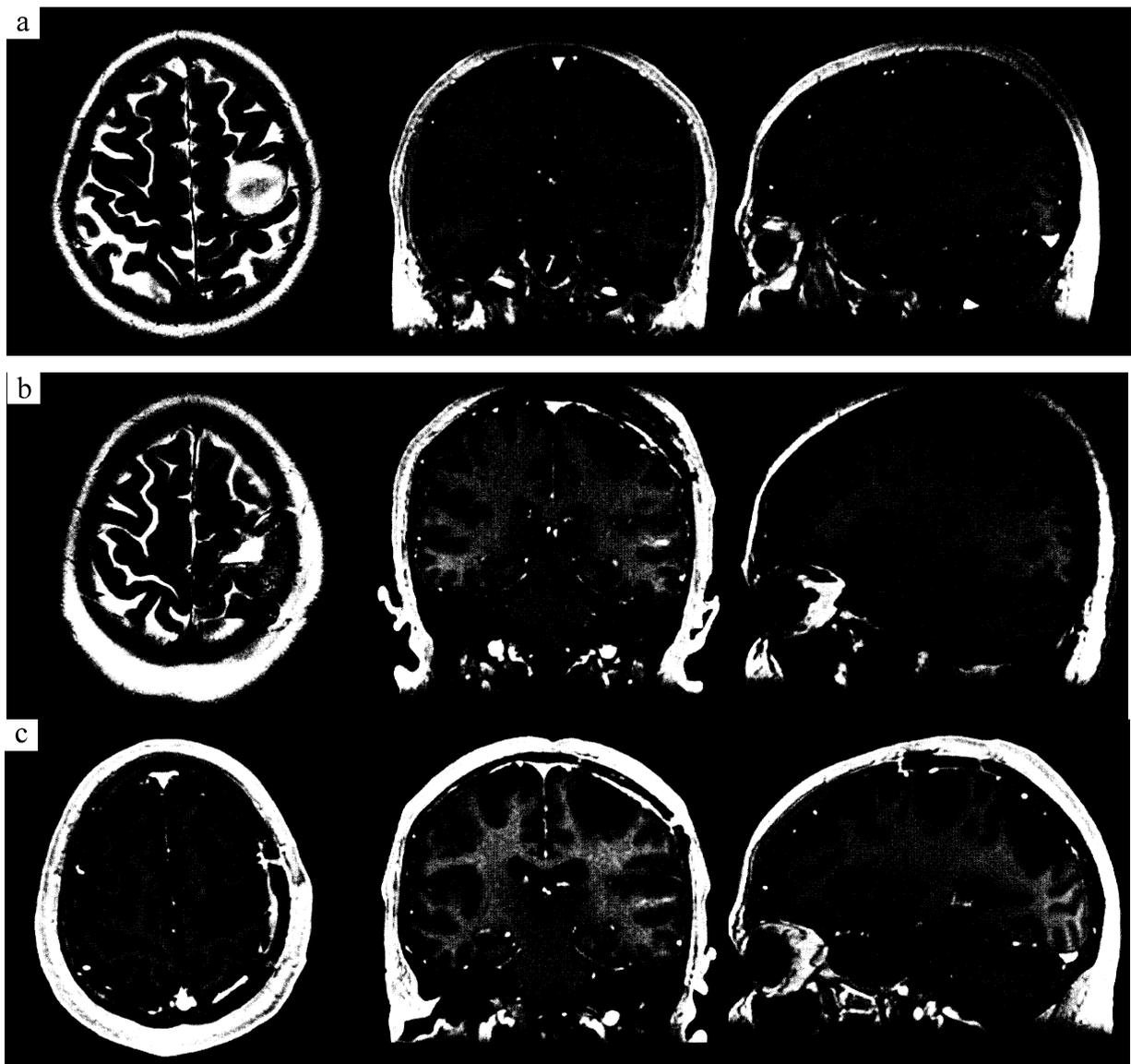


Рис. 2. МРТ пациентки 36 лет, оперированной по поводу пиломиксоидной астроцитомы левой прецентральной извилины с картированием моторной коры с пробуждением. Идентифицирована зона руки – предплечья. Тотальное удаление опухоли с последующей лучевой терапией в дозе 56 Гр

а – МРТ до операции, **б, с** – МРТ пациентки спустя 1 год и 2,5 года после операции соответственно. Данных за рецидив нет. В раннем послеоперационном периоде у пациентки вырос верхний дистальный монопарез, который полностью регрессировал через 3 месяца.

Полнота удаления опухоли оценивалась на послеоперационной МРТ, выполненной в течение 48 ч после операции. В нашем исследовании тотальное удаление опухоли достигнуто у 74% пациентов, субтотальное – у 26%. Динамика очаговых неврологических симптомов в раннем послеоперационном периоде представлена следующими данными: без динамики – 66,5%, углубление парезов – 14%, регресс парезов – 17,5%, что соответствует результатам, полученным другими авторами в подобной группе пациентов, оперированных с картированием [4, 10, 12, 13]. Поскольку неврологический статус не удалось оценить у всех

пациентов в отдаленном периоде, то мы не приводим информацию о его динамике, в том числе о дальнейшем регрессе очаговой неврологической симптоматики.

Мы проанализировали результаты стимуляции пирамидного тракта при удалении опухолей. В 20 случаях при известных параметрах минимального тока при идентификации тракта не получено нарастания парезов в послеоперационном периоде. У 4 пациентов парез вырос в той или иной мере. Была выявлена зависимость между минимальной величиной тока и риском нарастания пареза на основании расчетов U-критерия Манна–Уитни при сравнении группы с нарастанием пареза и группы без его нарастания. U-критерий Манна–Уитни равен 4. Критическое значение U-критерия Манна–Уитни при заданной численности сравниваемых групп составляет 13. $4 \leq 13$, следовательно, различия уровня признака в сравниваемых группах статистически значимы, $p=0,0052$ ($p<0,05$) (табл. 3).

Таблица 3

Динамика пирамидной симптоматики и минимальные показатели силы тока при идентификации пирамидного тракта

Динамика Dynamic	Параметры тока, мА, Me (Q ₂₅ ; Q ₇₅) Current parameters, mA, Me (Q ₂₅ ; Q ₇₅)	p
Нарастание Increase n=4	3,5 (2,0;5,0)	p=0,0052
Без нарастания No increase n=20	15,5 (8,5;29,0)	

Таким образом, в исследовании доказана прямая зависимость между близостью подхода к пирамидному тракту во время удаления опухоли и риском возникновения или усугубления неврологической симптоматики в виде пирамидной недостаточности в раннем послеоперационном периоде, что находит отражение в работах других исследователей [1, 3].

Для оценки прогностической значимости минимального значения величины тока в мА идентификации пирамидного тракта в возникновении или усугублении пирамидной симптоматики применен ROC-анализ. Определена точка статистически значимого разграничения между пациентами с усугублением пареза и без его нарастания 5 мА (AUC 0,950, 95% ДИ, $p<0,001$) со значением чувствительности 100,0 и специфичности 85,0 (рис. 3). Таким образом, критической величиной силы тока, определяющей рискованную близость к волокнам пирамидного тракта, является величина 5 мА. Этот факт должен приниматься во внимание при стремлении хирурга к более полному удалению глиомы вблизи пирамидного тракта [14].

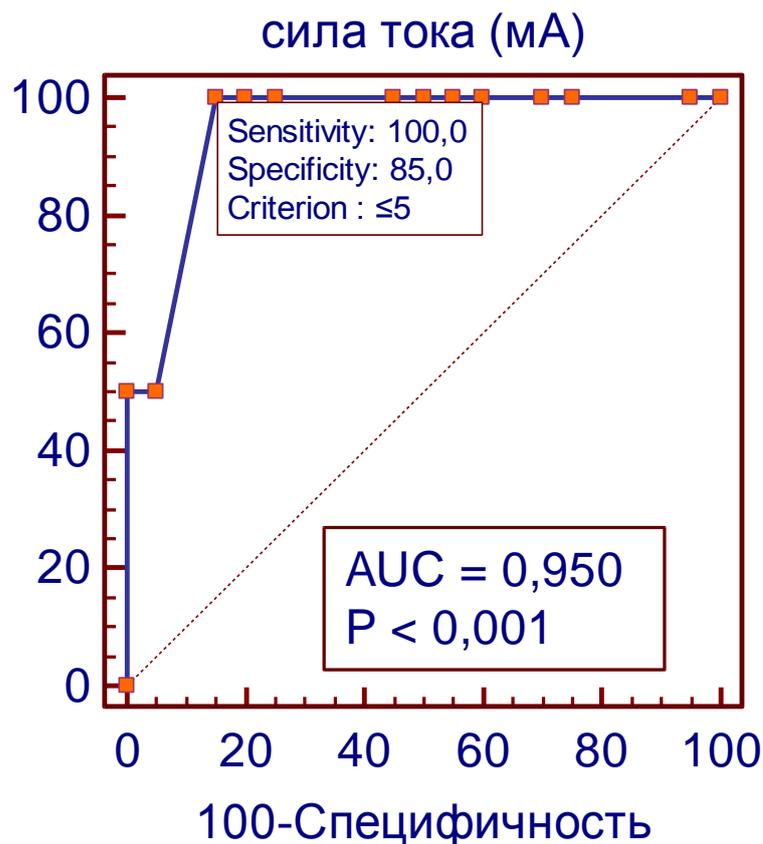


Рис. 3. ROC-кривая прогностической значимости величины силы тока (мА) при идентификации пирамидного тракта в риске возникновения парезов

Методика высокочастотной стимуляции (трейнами), по полученным нами данным, наиболее приемлема для идентификации пирамидного тракта в белом веществе в условиях наркоза при монополярной стимуляции. Методика же низкочастотной стимуляции (методика Пенфилда) наиболее эффективна для идентификации моторной коры в пределах прецентральной извилины в условиях наркоза, но она несет риск развития эпилептического припадка даже в наркозе. Отсутствие идентификации моторной коры при пробуждении в 5 случаях в нашем исследовании может быть связано с известным феноменом смещения моторной зоны коры растущей глиомой [15]. Этим смещением объясняется факт неполного совпадения данных анатомического планирования (МР-трактографии, функциональной МРТ) с данными нейрофизиологического картирования при идентификации моторной коры у таких пациентов.

Заключение

Функциональный мониторинг является желательной методикой для интраоперационного использования, особенно при высокодифференцированных глиальных

опухолях, которые не имеют анатомических четких границ и не идентифицируются с помощью 5-АЛК. Методика является дополнительным, безопасным, надежным инструментом для идентификации тракта и моторной коры, которая может быть сложна у пациентов с искаженной анатомией.

Список литературы

1. Rossi M., Conti Nibali M., Viganò L. Resection of tumors within the primary motor cortex using high-frequency stimulation: oncological and functional efficiency of this versatile approach based on clinical conditions. *Journal of neurosurgery*. 2019. Vol. 09. P. 1-13. DOI: 10.3171/2019.5.JNS19453.
2. Wrensch M. Minn Y., Chew T. Epidemiology of primary brain tumors: Current concepts and review of the literature. *Neuro-Oncology*. 2002. Vol. 4 (4). P. 278-299. DOI: 10.1093/neuonc/4.4.278.
3. Schucht P., Seidel K., Beck J. Intraoperative monopolar mapping during 5-ALA-guided resections of glioblastomas adjacent to motor eloquent areas: evaluation of resection rates and neurological outcome. *Neurosurg Focus*. 2014. Vol. 37 (6). E16. DOI: 10.3171/2014.10.FOCUS14524.
4. Mikuni N., Okada T., Enatsu R. Clinical impact of integrated functional neuronavigation and subcortical electrical stimulation to preserve motor function during resection of brain tumors. *Journal of Neurosurgery*. 2007. Vol. 106 (4). P. 593-598.
5. Seidel K., Beck J., Stieglitz L. The warning-sign hierarchy between quantitative subcortical motor mapping and continuous motor evoked potential monitoring during resection of supratentorial brain tumors. *Journal of Neurosurgery*. 2013. Vol. 118 (2). P. 287-296. DOI: 10.3171/2012.10.JNS12895.
6. Hervey-Jumper S.L., Berger M.S. Maximizing safe resection of low- and high-grade glioma. *J. Neurooncol*. 2016. Vol. 130 (2). P. 269-282.
7. Kombos T., Suess O., Ciklatekerlio Ö. Monitoring of intraoperative motor evoked potentials to increase the safety of surgery in and around the motor cortex. *Journal of Neurosurgery*. 2001. Vol. 95 (4). P. 608-614.
8. Nazzaro J., Neuwelt E. The role of surgery in the management of supratentorial intermediate and high-grade astrocytomas in adults. *Journal of Neurosurgery*. 1990. Vol. 73 (3). P. 331-344. DOI:10.3171/jns.1990.73.3.0331.
9. Duffau H., Lopes M., Arthuis F. Contribution of intraoperative electrical stimulations in surgery of low grade gliomas: a comparative study between two series without (1985–96) and with

- (1997–2003) functional mapping in the same institution. *J. Neurol. Neurosurg. Psychiatry*. 2005. Vol. 76. P. 845-851. DOI: 10.1136/jnnp.2004.048520.
10. De Witt Hamer P.C., Robles S.G., Zwinderman A.H., Duffau H., Berger M.S. Impact of intraoperative stimulation brain mapping on glioma surgery outcome: a meta-analysis. *J. Clin Oncol*. 2012. Vol. 30 (20). P. 2559-65. DOI: 10.1200/JCO.2011.38.4818.
11. Александрова М.В. Нейрофизиологический интраоперационный мониторинг в нейрохирургии. СПб: СпецЛит, 2019. С. 18-24.
12. Magill S.T., Han S.J., Li J., Berger M.S. Resection of primary motor cortex tumors: feasibility and surgical outcomes. *Journal of Neurosurgery*. 2018. Vol. 129 (4). P. 961-972. DOI:10.3171/2017.5.JNS163045.
13. Keles G., Lundin D., Lamborn K. Intraoperative subcortical stimulation mapping for hemispheric perirolandic gliomas located within or adjacent to the descending motor pathways: evaluation of morbidity and assessment of functional outcome in 294 patients. *Journal of Neurosurgery*. 2004. Vol. 100 (3). P. 369-375.
14. Schucht P., Seidel K., Jilch A. A review of monopolar motor mapping and a comprehensive guide to continuous dynamic motor mapping for resection of motor eloquent brain tumors. *Neuro-Chirurgie*. 2017. Vol. 63 (3). P. 175-180. DOI:10.1016/j.neuchi.2017.01.007.
15. Жуков В.Б., Горяйнов С.А., Огурцова А.А., Агеев И.С., Процкий С.В., Пронин И.Н., Тоноян А.С., Кобяков Г.Л., Ненашев Е.А., Смирнов А.С., Баталов А.И., Потапов А.А. Диффузионно-тензорная трактография и интраоперационный нейрофизиологический мониторинг в хирургии внутримозговых опухолей // *Вопросы нейрохирургии*. 2016. № 80 (1). С. 5-18.