

Ukrainian Neurosurgical Journal. 2026;32(2):64-72
doi: 10.25305/unj.350206

Значення МРТ-трактографії у визначенні мішені стереотаксичного втручання при хірургічному лікуванні хвороби Паркінсона

К.Р. Костюк, А.О. Лісяний

Відділення функціональної нейрохірургії та нейромодуляції, Інститут нейрохірургії імені акад. А.П. Ромоданова НАМН України, Київ, Україна

Надійшла до редакції 17.01.2026
Прийнята до публікації 19.02.2026

Адреса для листування:

Костюк Костянтин Романович,
Відділення функціональної нейрохірургії та нейромодуляції, Інститут нейрохірургії імені акад. А.П. Ромоданова, вул. Платона Майбороди, 32, Київ, 04050, Україна, e-mail: kostiuk.neuro@gmail.com

Мета: оцінити клінічну ефективність хірургічного лікування тремородомінантної форми хвороби Паркінсона (ХП) з урахуванням можливості визначення мішені стереотаксичного втручання на основі даних МРТ-трактографії та порівняти результати класичної стереотаксичної радіочастотної таламотомії вентрально-проміжного ядра таламуса (Vim) і трактографічно асистованої деструкції денто-рубру-таламічного тракту (DRTT).

Матеріали і методи. У ретроспективне дослідження було залучено 25 пацієнтів, прооперованих у 2018–2025 рр. Критеріями включення були домінування тремору в клінічній картині ХП, прогресивний перебіг захворювання та недостатня ефективність медикаментозної терапії. Пацієнтів розподілили на дві групи: група Vim (n=19), в якій виконували класичну стереотаксичну радіочастотну таламотомію з використанням непрямого методу визначення координат мішені, та група DRTT (n=6), у якій мішень втручання визначали за допомогою МРТ-трактографії на основі diffusion tensor imaging (DTI). Клінічну ефективність оцінювали до операції та через 12 міс після хірургічного втручання за шкалами Unified Parkinson's Disease Rating Scale (UPDRS, частина III) і Clinical Rating Scale for Tremor (CRST, частини А та С).

Результати. У всіх пацієнтів безпосередньо після оперативного втручання досягнуто повного регресу тремору контралатеральних кінцівок. Через 12 міс середній показник за UPDRS III зменшився на 44% (з $83,2 \pm 8,7$) до $46,70 \pm 4,18$ бала, $p=0,04$). Статистично значуще поліпшення за UPDRS III виявлено в групі DRTT ($p=0,032$), тоді як у групі Vim різниці не досягла рівня значущості. Регрес тремору за шкалами CRST-A та CRST-C зафіксували в обох групах, але він був виразнішим у пацієнтів, яким виконували DRTT. Після операції відзначено зменшення добової дози леводопи: на 23,4% у групі Vim та на 27,7% у групі DRTT. Інтраопераційних ускладнень не зареєстровано. Транзиторні неврологічні ускладнення частіше виникали в групі Vim і повністю регресували в ранній післяопераційний період.

Висновки. Застосування МРТ-трактографії для визначення мішені стереотаксичних аблятивних втручань при хірургічному лікуванні ХП дає змогу індивідуалізувати хірургічний підхід і забезпечити цілеспрямованіший вплив на патогенетично значущі нейрональні шляхи. Трактографічно асистована деструкція денто-рубру-таламічного тракту асоціюється зі стабільнішим контролем тремору, тенденцією до кращого регресу супутніх моторних симптомів і потенційно нижчим ризиком неврологічних побічних ефектів.

Ключові слова: хвороба Паркінсона; глибинна стимуляція мозку; стереотаксична радіочастотна деструкція; денто-рубру-таламічний тракт (DRTT)

Вступ

Хвороба Паркінсона (ХП) є одним із найпоширеніших нейродегенеративних захворювань нервової системи, яке характеризується прогресивним перебігом і необхідністю довічного прийому леводопи-замісної терапії. Хірургічне лікування ХП було започатковане в середині минулого сторіччя. Упродовж останніх 25 років воно вдосконалюється. Основним методом хірургічного лікування ХП є глибинна стимуляція мозку (ГСМ) [1, 2]. В останнє десятиріччя спостерігається ренесанс аблятивних стереотаксичних операцій, які застосовували для хірургічного лікування ХП у 1950-х роках. Поряд з класичною стереотаксичною радіочастотною (РЧ) деструкцією підкіркових ядер, використовують неінвазивні втручання, такі як Гамма-ніж радіохірургічна та МРТ-направлена сфокусована ультразвукова деструкція [3–7].

Існують декілька шляхів підвищення ефективності хірургічних втручань при лікуванні ХП. Насамперед це розвиток сучасних нейровізуалізаційних технологій, який дає змогу отримати МРТ-зображення підкіркових структур головного мозку та трактів надвисокої якості. Впровадження високопольної магнітно-резонансної томографії (МРТ), яка дає змогу не лише візуалізувати окрему анатомічну структуру, а й розрізнити її сегменти та визначити зону хірургічного втручання. Установлено, що дорсальна частина субталамічного ядра (subthalamic nucleus (STN)) має найбільшу щільність проєкцій кортикальних моторних зон (гіперпрямий шлях) і вважається оптимальною мішенню для ГСМ [8]. У більшості лікарень у розвинених країнах Європи, Північної Америки й Азії для планування стереотаксичних втручань використовують МРТ 3 Тл, деякі центри мають тривалий

Copyright © 2026 К.Р. Костюк, А.О. Лісяний



Робота опублікована під ліцензією Creative Commons Attribution 4.0 International License
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

досвід використання надвисокопольного МРТ 7 Тл [9]. У недавно опублікованій роботі групи нідерландських фахівців доведено, що використання МРТ 7 Тл дає змогу імплантувати електрод у моторну субдіянку STN, що підвищило ефективність корекції рухових розладів більш ніж на 30% порівняно із застосуванням під час планування операції МРТ 3 Тл [10]. Ще одним шляхом поліпшення результатів нейростимуляції є створення електродів із направленою стимуляцією (directional stimulation) і впровадження технології адаптивної ГСМ, яка є системою із замкнутим контуром, що має здатність регулювати параметри стимуляції відповідно до біомаркерів, які відображують клінічний стан пацієнта [11–13].

Інший напрям підвищення ефективності та безпечності стереотаксичних втручань полягає в удосконаленні програмного забезпечення, яке дає змогу, використовуючи сучасні цифрові анатомічні атласи, що враховують індивідуальні особливості мозку в тривимірному просторі, чітко візуалізувати мішень нейрохірургічного втручання. Сучасні станції планування дають змогу об'єднати різні нейровізуалізаційні обстеження, точніше визначити координати мішені втручання та спланувати безпечну траєкторію введення електрода. Сучасне програмне забезпечення дає змогу створювати анатомічні моделі та визначати положення й орієнтацію електродів для кожного пацієнта, які потім можуть бути інтегровані з клінічним програматором для швидкого та ефективнішого налаштування параметрів нейростимуляції.

На сучасному етапі розвитку науки ХП розглядають як захворювання нейрональних ланцюгів і механізмів, відповідальних за контроль рухів. Є значні досягнення в розумінні етіології та патоморфологічних змін базальних ядер у пацієнтів із ХП. Провідну роль у патогенезі захворювання відіграють порушення функціональних зв'язків між ядрами. Новітні дослідження встановили чіткий зв'язок між основними моторними симптомами ХП і патофізіологічними змінами в окремих нейрональних ланцюгах головного мозку. Зокрема метааналіз, проведений N. Rajamani та співавт. (2024), виявив кореляцію між стимуляцією певних пучків білої речовини та позитивним впливом на контроль тремору, ригідності, брадикінезії та постуральних порушень [14].

Концепція ланцюгових порушень відповідає історичному розвитку хірургічного лікування ХП, зокрема усуненню одного з найбільш інвалідизаційних симптомів — тремору. З 1950-х років основною мішенню стереотаксичних втручань у лікуванні ХП була бліда куля. Хоча морфологічні зміни при ХП спостерігаються в чорній субстанції, яка припиняє синтезувати достатню кількість дофаміну, саме бліда куля є найчутливішою мозковою структурою до дофамінергічної недостатності, що призводить до порушення її фізіологічної активності та появи гіперкінетичних розладів.

У 1954 р. R. Hassler і співавт. провели стереотаксичну деструкцію нейронів, що отримували патологічні сигнали з блідої кулі. Ці нейрони локалізувалися в задньому вентральнооральному (Vop) і вентрально-проміжному (Vim) ядрах таламуса. З того часу численні дослідження довели високу ефективність деструкції Vim з метою контролю тремору різної етіології. Мішень Vim нині є золотим стандартом стереотаксичних операцій попри низку недоліків.

Найсуттєвіший із них — неможливість прямого визначення Vim за даними МРТ-досліджень. Ядро Vim — це група моторних нейронів, розташована на межі вентральнолатерального таламуса, вентральноорального та вентральнокаудального ядер. Під час стандартних МРТ-досліджень чітко визначити межу Vim неможливо, що змушує будувати траєкторію стереотаксичного втручання «непрямым» методом із використанням передньої та задньої комісур головного мозку як анатомічних орієнтирів і атласних координат. Триває пошук альтернативних структур, ядер або нейрональних провідників, стимуляція або деструкція яких могла би забезпечити більш ефективний і безпечний контроль над тремором різної етіології. Однією з альтернативних мішеней є задній субталамічний простір (posterior subthalamic area (PSA)), складовою якого є *zona incerta* (Zi). Ці мішені демонструють високу ефективність щодо контролю тремору, але мають недоліки. Вивчення цитоархітекtonіки базальних ядер і трактів білої речовини за допомогою секційних і МРТ-DWI-досліджень дало змогу встановити зв'язок тремору з денто-рубро-таламічним трактом (dentorubrothalamic tract (DRTT)), також відомим як *fasciculus cerebellothalamicus*). Цей тракт проходить безпосередньо поруч з усіма згаданими мішенями, що лягло в основу концепції «три мішені — один шлях» [15].

Останніми роками при плануванні стереотаксичних операцій важливе значення мають дані МРТ-трактографії, яка ґрунтується на технології diffusion tensor imaging (DTI). Сучасні дослідження показали, що ефективність хірургічного втручання визначається впливом на нейрональні тракти, залучені в патофізіологічні механізми розвитку рухових розладів. У регуляції тремору різного походження провідну роль відіграє DRTT, який походить із зубчатого ядра мозочка, проходить крізь контралатеральне червоне ядро й закінчується у вентральнолатеральному ядрі таламуса на протилежному боці. Раніше ідентифікувати DRTT було важко, оскільки це довгий мультисинаптичний нейронний тракт у протилежну півкулю. Однак використання МРТ DTI-технології та сучасного програмного забезпечення дало змогу його візуалізувати і впливати на нього різноманітними стереотаксичними технологіями. Показано, що хронічна стимуляція DRTT або його абляція сприяє кращому контролю за тремором порівняно з втручанням на загальноновизнані класичні підкіркові структури, залучені в патогенез ХП, такі як Vim, PSA або STN [14].

Нині відбувається зміна парадигми лікування тремору, оскільки DRTT фактично є основною хірургічною патогенетичною мішенню при стереотаксичних втручаннях на Vim. На відміну від ядер таламуса білу речовину DRTT можна виявити завдяки використанню МРТ-трактографії, що ґрунтується на DWI-зображеннях. Найдоцільнішою тактикою визначення мішені стереотаксичного втручання є комбінований метод, який передбачає коригування визначеної непрямим методом мішені з урахуванням даних трактографії. Це дає змогу знизити ризик побічних ефектів і забезпечити стабільну ефективність хірургічного лікування.

Мета: оцінити клінічну ефективність хірургічного лікування треморо-домінантної форми хвороби

Паркінсона з урахуванням можливості визначення мішені стереотаксичного втручання на основі даних МРТ-трактографії та порівняти результати класичної стереотаксичної радіочастотної таламотомії вентральнопроміжного ядра таламуса й трактографічно асистованої деструкції денто-рубром-таламічного тракту.

Матеріали і методи

Учасники дослідження

У ретроспективне дослідження було залучено 25 пацієнтів із ХП, прооперованих у відділенні функціональної нейрохірургії та нейростимуляції Інституту нейрохірургії імені акад. А.П. Ромоданова НАМН України у 2018–2025 рр.

Дослідження проведено відповідно до Гельсінської декларації (1964–2013), ICH GCP (1996), Директиви ЄС №609 (24.11.1986), наказів МОЗ України №690 (23.09.2009), №944 (14.12.2009), №616 (03.08.2012) і локальних протоколів. Комітет із етики Інституту нейрохірургії імені А.П. Ромоданова НАМН України не виявив порушень етичних і морально-правових норм під час проведення науково-дослідної роботи. Пацієнти надали інформовану згоду на участь у дослідженні, анонімність була забезпечена.

Критерії залучення

Критеріями відбору пацієнтів у дослідження були: домінування тремору в симптомокомплексі захворювання, низька ефективність специфічної протипаркінсонічної терапії, проградієнтний перебіг захворювання, використання програми Element (Brainlab, Німеччина) при визначенні мішені стереотаксичного втручання.

Критерії вилучення

З дослідження вилучали пацієнтів із домінуванням акінетичної форми ХП, виразними порушеннями рівноваги або координації, тяжкою супутньою соматичною патологією, що могла підвищити ризик хірургічного втручання, наявністю протипоказань до проведення МРТ.

Дизайн дослідження

Хворих розподілили на дві групи. У першій групі (група Vim) 19 (76%) хворим проведена класична РЧ-деструкція Vim із використанням стандартних методик розрахунків на основі міжкомісуральної лінії. У другій групі (група DRTT) 6 (24%) хворим виконана деструкція DRTT із трактографічною асистенцією.

Проаналізовано різницю між координатами мішеней хірургічного втручання двох груп. Неврологічний і функціональний статус хворих оцінювали до хірургічного втручання та через 12 міс.

Характеристики групи

Вік хворих на момент хірургічного втручання становив від 44 до 81 року (у середньому – 63,7 року). Серед хворих переважали чоловіки (17 (68%)). Тривалість захворювання становила від 4 до 22 років (у середньому – 12 років). Вік пацієнтів і тривалість захворювання були дещо вищими в групі Vim, але різниця не була статистично значущою (Табл. 1).

Усі хворі приймали дофамін-замісну терапію в дозі від 450 до 1500 мг/добу (у середньому – 812,56 мг/добу). Тривалість прийому препарату леводопи до операції становила від 4 до 15 років (у середньому – 9 років). Не виявлено вірогідної різниці за тривалістю прийому та дозою препарату між групами. Побічні ефекти від дофамін-замісної терапії у вигляді

моторних флуктуацій зареєстрували в 4 (16%) хворих. Леводопа-спричинених дискінезій не було.

На момент хірургічного лікування пацієнти мали 2,5–3,0 стадію захворювання за шкалою Хен і Яра. Хоча пацієнти мали двобічні вияви ХП із помірними постуральними розладами, вони зберігали повну фізичну незалежність. У більшості хворих (88%) була тремтлива й тремтливо-ригідна форма ХП (Табл. 2). Стереотаксичну таламотомію та деструкцію DRTT не проводили пацієнтам із домінуванням акінетичної форми ХП, оскільки цей вид хірургічного втручання асоціюється з підвищеним ризиком появи розладів балансу, координації та підсилення виразності брадிகінезії.

Планування стереотаксичного втручання виконувалося з використанням програмного забезпечення Element (Brainlab, Німеччина). Для визначення координат ядра Vim використовували непрямий метод на основі індивідуальних характеристик міжкомісуральної лінії (лінія АС-РС), яка з'єднує передню та задню комісури. Координати деструкції DRTT розраховували прямим методом, використовуючи DTI-зображення під час проведення МРТ-трактографії. Візуалізацію DRTT проводили на основі визначення провідних структур його формування, а саме, іпсилатеральної первинної моторної кори M1 та контралатерального зубчастого ядра мозочка (Рис. 1 та 2).

Усі операції проводили на стереотаксичній рамці CRW Radionics (Radionics Inc., США) із використанням РЧ-електрода діаметром 2,1 мм із довжиною робочої поверхні 2,0 мм. Радіочастотну деструкцію виконували під «wake-up» анестезією із використанням тестової інтраопераційної макростимуляції на високих (75 Гц) та низьких (2 Гц) частотах, яка давала змогу визначити коректне й безпечне місце розміщення РЧ-електрода. Перед проведенням остаточної РЧ-деструкції виконували тестові деструкції за температури 45 і 55 °С протягом 30 с. За відсутності розвитку додаткових неврологічних порушень, таких як парестезії, спастичні скорочення контралатеральних кінцівок або порушення мовлення, виконували остаточно деструкцію запланованої мішені за температури 75 °С протягом 60–65 с.

Неврологічний і функціональний статус хворих оцінювали до хірургічного втручання та через 12 міс після операції за Уніфікованою шкалою ХП (Unified Parkinson's Disease Rating Scale (UPDRS)). Оцінку регресу тремору проводили за А і С частинами шкали клінічної оцінки тремору (Clinical Rating Scale for Tremor (CRST)) [16] та сумою показників у стані відсутності прийому протипаркінсонічних препаратів (OFF state) за частиною III шкали UPDRS (ступінь виразності тремору голови, верхніх і нижніх кінцівок, тремору дії та постурального тремору). За цієї субшкалою показники можуть становити від 0 до 28 балів [17].

Статистичний аналіз

Аналіз і обробку статистичних даних проводили з використанням IBM SPSS Statistics version 29 (ліцензія №512186485) і MS Excel. Застосовували W-критерій (Шапиро–Вілка) для перевірки розподілу даних на нормальність. У разі нормального розподілу використовували параметричний критерій Стьюдента. Якщо розподіл відрізнявся від нормального, то застосовували непараметричні критерії.

Таблиця 1. Клінічна характеристика пацієнтів (M±m)

Показник	Vim, n=19	DRTT, n=6	Разом, n=25	p
Середній вік, роки	65±2	60±4	63,7±2,0	0,925
Стать:				
чоловіки	12 (63%)	5 (83%)	17 (68%)	
жінки	7 (37%)	1 (17%)	8 (32%)	
Середня тривалість ХП, роки	12,4±1	9,8±1,3	12,0±1,0	0,978
Середня доза леводопи, мг/добу	874,8±94,3	725,8±64,2	812,56±76,50	0,962
Середня тривалість леводопи-терапії, роки	9,4±0,7	7±0,8	9,0±1,0	0,95
Моторні флуктуації	3 (15%)	1 (16%)	4 (16%)	

Таблиця 2. Форма хвороби Паркінсона

Форма ХП	Vim, n=19	DRTT, n=6	Разом, n=25
Тремтлива	10 (52%)	4 (67%)	14 (56%)
Тремтливо-ригідна	6 (32%)	2 (33%)	8 (32%)
Тремтливо-акінетико-ригідна	3 (16%)	0 (0%)	3 (12%)

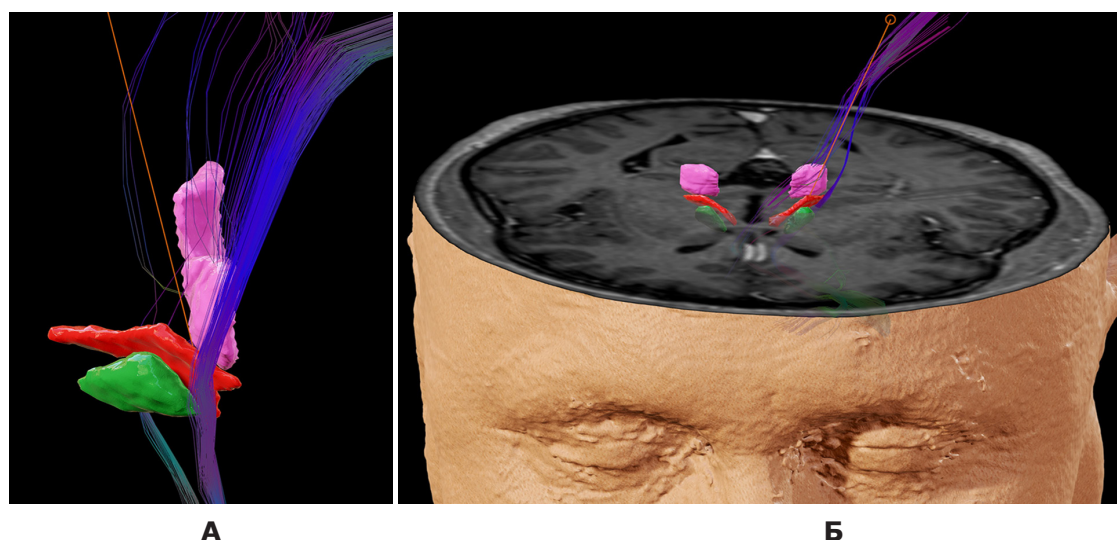


Рис. 1. Планування мішені РЧ-деструкції DRTT. 3D-модель реконструкції підкіркових ядер і тракту (фіолетовий колір – VIM; зелений колір – STN, червоний колір – задня субталамічна ділянка; синьо-бузковий колір – DRTT, помаранчевий колір – траєкторія DRTT-трактотомотомії): А – бічна проекція; Б – передньо-задня проекція

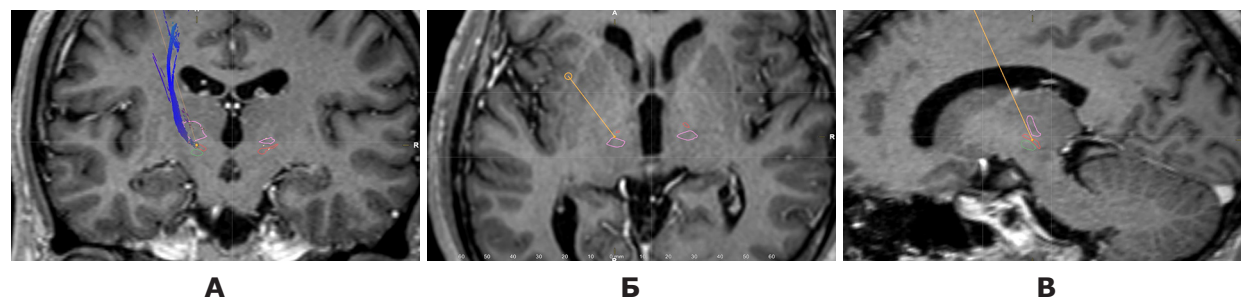


Рис. 2. Планування мішені РЧ-деструкції DRTT. МРТ головного мозку з внутрішньовенним введенням контрастної речовини (помаранчева лінія – траєкторія введення електрода, фіолетова – VIM, червона – задня субталамічна ділянка, зелена – STN): А – коронарна проекція; Б – аксіальна проекція; В – сагітальна проекція

Результати

Аналіз різниці між координатами мішеней хірургічного втручання двох груп з використанням описової статистики (середнє арифметичне значення, стандартне відхилення, стандартна похибка) значень координат у трьох проєкціях (передньо-задній напрямок, латеральність, висота відносно АС-РС) не виявив статистично значущої різниці (**Табл. 3**).

Виявлені відмінності не перевищували статистичну похибку та становили в середньому 0,5–1,0 мм. Оскільки середня ширина ядра становить близько 4 мм, навіть така, на перший погляд, незначна похибка може мати суттєве клінічне значення — до 25% від розміру мішені [18]. З огляду на допустиму ймовірність механічного відхилення електрода від запланованої траєкторії на відстань до 1 мм, сумарна похибка може досягати або навіть перевищувати половину діаметра ядра Vim. Це критично важливо, оскільки навіть мінімальне зміщення мішені деструкції може призвести до неефективного впливу на цільову зону або активації сусідніх структур, що знижує терапевтичний ефект і підвищує ризик побічних явищ.

Контрольне обстеження через 12 міс після операції проведено 9 із 19 (47,4%) хворих групи Vim та всім хворим групи DRTT. Установлено поліпшення неврологічного стану, зокрема регрес тремору в обох групах. У всіх пацієнтів одразу після операції досягнуто повного регресу тремору контралатеральних кінцівок. Спостерігали значний регрес тремору голови.

Через 1 рік після операції середній показник за шкалою UPDRS III поліпшився на 44% — з (83,2±8,7) до (46,70±4,18) бала ($p=0,04$). Однак статистично значуще поліпшення виявлено лише в групі DRTT ($p=0,032$). Регрес ригідності та тремору був виразнішим у групі DRTT, але різниця між групами не була статистично значущою ($p>0,05$). В обох групах за даними шкал CRST-A та CRST-C установлено значний регрес тремору. У всіх випадках спостерігали поліпшення рухових функцій, підвищення рівня самообслуговування та якості життя пацієнтів.

Після операцій в обох групах вдалося зменшити дозу леводопа терапії: у групі Vim на 23,4%, у групі DRTT — на 27,7% (**Табл. 4**). Зменшення леводопазамісної терапії запобігає розвитку її побічних ефектів.

Операційних (крововилив або розвиток ішемії в зоні деструкції), інфекційних та інших ускладнень не було. Неврологічні ускладнення виникли в 3 (12,0%) хворих (у 2 із групи Vim та 1 з групи DRTT). У всіх випадках ускладнення мали транзиторний характер і регресували в терміни від 1 тиж до 2 міс після операції. Після деструкції Vim в одного хворого виникла транзиторна дизартрія та помірний контралатеральний геміпарез, в іншого — дизартрія. Зазначені ускладнення були спричинені пошкодженням внутрішньої капсули. Після деструкції DRTT в одному випадку виникла транзиторна диспраксія та парестезія контралатеральних кінцівок унаслідок поширення зони деструкції на соматосенсорне вентральнокордаульне ядро таламуса (**Табл. 5**).

Таблиця 3. Середнє значення координат мішені Vim

Вісь координат	Середнє значення, мм		Середнє квадратичне відхилення		Стандартна похибка	
	Vim	DRTT	Vim	DRTT	Vim	DRTT
Вертикальність	-0,22	-0,43	0,49	0,46	0,11	0,19
Латеральність	12,71	13,12	0,78	1,21	0,49	0,17
Передньо-задня вісь	-5,37	-5,85	0,77	0,56	0,17	0,22

Таблиця 4. Результати радіочастотної стереотаксичної таламотомії через 12 міс після операції

Показник	Група Vim		Група DRTT		p
	до операції	після операції	до операції	після операції	
Тремор (діапазон 0–28)	19,1±0,9	7,56±1,40	21,17±1,60	6,67±4,18	0,047
CRST-A (діапазон 0–88)	36,00 ± 0,88	9,4±1,2	42,50±5,08	7,33±1,97	0,038
CRST-C (діапазон 0–32)	16,6±0,7	11,1±1,6	17,40±3,45	12,67±3,54	>0,1
Доза леводопа-препаратів, мг/добу	874,8±94,3	670,4±54,3	725,8±64,2	524,4±38,3	>0,1

Таблиця 5. Неврологічні ускладнення

Ускладнення	Vim, n=2	DRTT, n=1
Контралатеральний геміпарез	1 (5%)	0
Дизартрія	2 (10%)	0
Диспраксія	0	1 (16%)
Парестезії	0	1 (16%)

Клінічний випадок

Пацієнтка Д., 53 роки, обстежена в Інституті нейрохірургії імені акад. А.П. Ромоданова НАМН України. Установлено діагноз «Хвороба Паркінсона, тремтливо-ригідна форма, стадія 2,5 за шкалою Хен і Яра, прогресуючий перебіг. Тривалість захворювання – 6 років. На момент госпіталізації приймала леводопа/карбідопа в дозі 625 мг/добу, разагілін (інгібітор моноаміноксидази) у дозі 1 мг/добу, праміпекс (агоніст допамінових рецепторів) у дозі 1,25 мг/добу. У клінічній картині захворювання домінував виразний тремор у стані спокою та постуральний тремор, переважно в лівих кінцівках.

Проведено операцію – РЧ-деструкцію DRTT справа з використанням програм Element (Brainlab) для визначення координат мішені втручання (**Рис. 3**). Після операції в лівих кінцівках тремор припинився, регресувала ригідність, зросла рухова активність. Через один рік після операції пацієнтка зменшила дозу леводопа-терапії до 375 мг/добу, праміпекс – до 0,375 мг/добу, припинила прийом разагіліну.

Через 12 міс після операції проведено МРТ (**Рис. 4**). Установлено, що показники UPDRS у період «Виключення» знизилися з 88 до 61 бала, тобто на 31%.

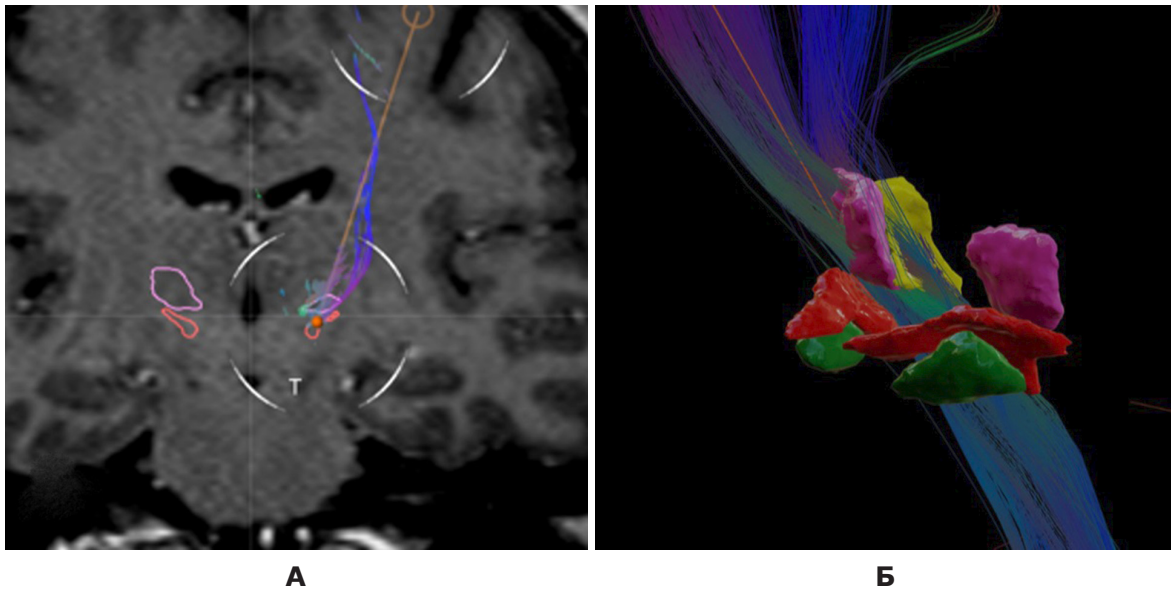


Рис. 3. Планування мішені РЧ-деструкції DRTT (помаранчева лінія – траєкторія введення РЧ-електрода, фіолетовий колір – Vim, зелений колір – STN, червоний колір – задня субталамічна ділянка, синьо-бузковий колір – DRTT): А – коронарна проекція; Б – 3D-реконструкція підіркових ядер і DRTT

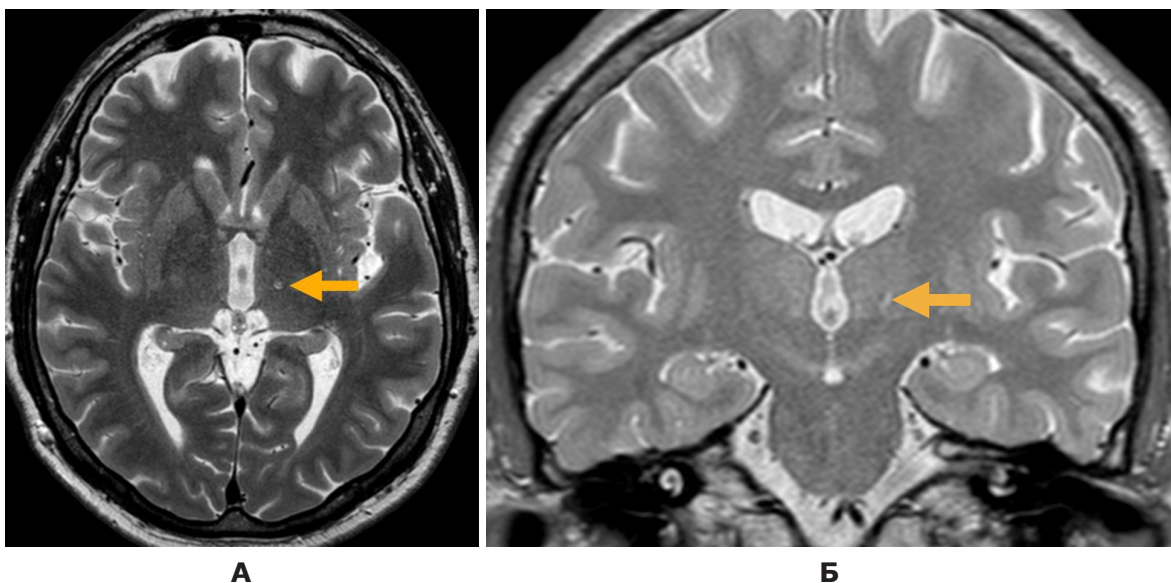


Рис. 4. Зона деструкції через 12 міс після DRTT-трактомії: А – аксіальна проекція; Б – коронарна проекція

Обговорення

Попри домінування технології нейростимуляції, аблятивні втручання відіграють значну роль у хірургічному лікуванні ХП та деяких інших рухових розладів. Поряд з традиційною РЧ-деструкцією широкого поширення набули новітні аблятивні технології, зокрема МРТ-керована фокусована ультразвукова абляція та радіохірургічна Гамма-ніж-деструкція [7, 19–21].

Перевагою операцій абляції є відносна простота й невелика тривалість нейрохірургічного втручання, висока ефективність, низький рівень операційних ускладнень, запобігання розвитку ускладнень, пов'язаних з імплантацією системи для глибокої стимуляції мозку та відсутність потреби в регулярних візитах до лікаря для корекції параметрів стимуляції.

Останніми роками спостерігається ренесанс деструктивних стереотаксичних операцій як односторонніх, так і поетапних двобічних. Сучасні нейроінвазивні діагностичні технології та комп'ютерне програмне забезпечення дають змогу деталізовано візуалізувати мозкові структури, які є мішенями хірургічного втручання, з високою точністю визначити їхні координати, що поліпшує ефективність і безпечність операцій [7, 22].

Упровадження трактомії є новітнім кроком у лікуванні ХП як системного нейродегенеративного захворювання головного мозку, що призводить до порушення нейромедіаторної системи. Трактомія діє не на уражені анатомічні структури головного мозку, а на шляхи передачі нейрональних імпульсів, що дає змогу впливати на порушені нейромедіаторні зв'язки. Сучасні високопольні МРТ-апарати дають змогу ідентифікувати тракти, залучені в патогенез ХП і визначити місце проведення їх ефективної деструкції.

Наведено результати хірургічного лікування 25 хворих на ХП, яких розподілили на дві групи. Групі VIm проведено класичну РЧ-термоталамотомію, групі DRTT – стереотаксичну РЧ-трактомію.

При порівнянні результатів хірургічного втручання в групах виявлено виразніше поліпшення контролю за тремором, що сприяло збільшенню денної активності пацієнтів, у групі DRTT. Регрес тремору й ригідності, зниження дози леводопа-терапії та помірний регрес брадикінезії дали змогу збільшити рухову активність, можливість самообслуговування та поліпшити якість життя практично в усіх прооперованих хворих.

Обмеженням дослідження є мала вибірка хворих, яким виконані хірургічні втручання зі застосуванням трактографічної асистенції. При збільшенні розміру вибірки різниця перевищить 0,05%.

Основною особливістю втручань на VIm є можливість досягти контролю над тремором навіть при неоптимальному розташуванні електрода шляхом збільшення амплітуди стимуляції або зони деструкції, що мало місце в усіх прооперованих хворих. Однак збільшення об'єму деструкції призводить до збільшення ризику сенсорних, статокординаторних розладів, порушення мови та появи контралатерального геміпарезу внаслідок ушкодження внутрішньої капсули («капсулярний ефект») і вентральнокаудального ядра таламуса. У нашому дослідженні такі побічні явища мали транзиторний характер і регресували впродовж 12 міс після операції. Лише в 2 пацієнтів із групи, прооперованої непрямим методом, зареєстрували

новий неврологічний дефіцит через рік після операції. В одному випадку пацієнт відзначав парестезії на пролікованій руці, в іншого було відчуття оніміння пальців і кисті пролікованої руки. Такі наслідки були відсутні в групі, пролікованій із використанням трактографічної асистенції. Це узгоджується з даними літератури [18, 22].

Триває вдосконалення МРТ-трактографії для точнішої візуалізації DRTT при хірургічному лікуванні ХП. Не існує консенсусу щодо оптимального визначення ділянки інтересу (Region of Interest (ROI)) при побудові тракту. Не слід вважати DRTT суцільним безперервним нервовим волокном, оскільки він має значну кількість розгалужень. У нашому випадку як ROI застосовували іпсилатеральне ядро мозочка, контралатеральні ядра таламуса та контралатеральну прецентральну звивину.

Однак існують інші підходи до реконструкції DRTT, які відрізняються вибором ROI. З огляду на те, що частина волокон DRTT не перехрещується, у деяких протоколах вважається достатнім визначення ROI в межах однієї півкулі. Важливим анатомічним орієнтиром є проходження тракту через верхню ніжку мозочка, яку іноді додають до ROI для підвищення специфічності реконструкції. Крім того, топографічну близькість DRTT до медіальної петлі (*Iemniscus medialis*), яка має відносно стабільне анатомічне розташування, можна використовувати як додатковий орієнтир для верифікації коректності трактографії [22, 23].

Іншим важливим питанням є технічне забезпечення трактографії. Основним завданням нейровізуалізаційного дослідження є визначення вектора проведення електричних імпульсів білою речовиною в кожному вокселі [24, 25].

Пробабілістичні (або ймовірнісні) методи трактографії дають змогу оцінити найімовірніші шляхи поширення нервових волокон, урахувавши невизначеність напрямку дифузії в кожному вокселі, що підвищує точність реконструкції складних і перехресних трактів. Однак такі методи потребують спеціального обладнання та часу для розрахунків, тому можуть застосовуватися лише в наукових центрах. Нині доступні комерційні детерміністичні методи, які ґрунтуються на «середньостатистичному» напрямку передачі на кожному відрізьку. Такий метод трактографії дає змогу точно визначити необхідний тракт. В опублікованих дослідженнях детерміністичні методи давали похибку в середньому до 1,4 мм. Вона була суттєвою, але прийнятною для планування стереотаксичних втручань. Деякі автори, окрім розташування мішені, рекомендують використовувати напрямок тракту в тривимірній проекції для побудови траєкторії втручання [26, 27].

Останніми роками опубліковано багато клінічних досліджень використання детерміністичних DRTT-трактомії різної модальності при хірургічному лікуванні тремору методами РЧ-деструкції та високочастотної фокусованої ультразвукової абляції. Висока ефективність трактомії при лікуванні тремору дала підставу для застосування таких методів для контролю інших моторних розладів ХП. Триває вивчення ролі палідоталамічного тракту як основного патогенетичного шляху розвитку ригідності та феномену «застигання ходи». Зокрема проводяться дослідження для визначення проекції палідоталамічного тракту в субталамічній зоні. Непрямі розрахунки цієї мішені характеризуються значною варіабельністю, тому проведення трактографічного

дослідження є перспективним напрямом для майбутніх втручань [28].

Іншим важливим напрямом є дослідження «гіперпрямого» нейронального сполучення STN із премоторною корою головного мозку. Відомо, що STN має сегменти, відповідальні за зв'язки з іншими базальними ядрами кори великих півкуль. Останні відповідають як за моторні, так і за когнітивно-емоційні стани пацієнтів із ХП [8]. На «гіперпрямий» шлях можна впливати лише нейромодуляційними технологіями (глибинна стимуляція мозку) через високий ризик побічних неврологічних ускладнень деструктивних втручань.

Окремого розгляду потребують можливості низки аксіальних волокон, які пов'язані з брадикінезією та постуральною нестійкістю пацієнтів із ХП. Вивчають кортика-таламічні тракти й волокна, що поєднують педунколопонтинне ядро (pedunculopontine nucleus (PPN)) зі стовбуром мозку. Вплив на ці тракти мало вивчено.

Висновки

Поглиблене розуміння патогенезу ХП як патології нейрональних зв'язків змінює підхід до лікування захворювання. Сучасні нейрохірургічні методи не впливають на патологічно змінені ділянки, а коригують нейрональні ланцюги, залучені в розвиток моторних розладів. МРТ-трактографія цих шляхів, насаперед денто-рубро-таламічного тракту, дає змогу вибірково ефективно компенсувати патологічний вплив шляхом як деструкції, так і нейромодуляції, мінімізуючи вплив на суміжні нейрональні структури. Застосування цього методу забезпечує високу ефективність втручання з урахуванням індивідуальних анатомічних особливостей для вибору мішені для операції.

Розкриття інформації

Конфлікт інтересів

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів.

Фінансування

Дослідження не мало спонсорської підтримки.

Використання штучного інтелекту

Під час написання статті не застосовували системи штучного інтелекту.

Список літератури

- Krauss JK, Lipsman N, Aziz T, Boutet A, Brown P, Chang JW, Davidson B, Grill WM, Hariz MI, Horn A, Schulder M, Mammis A, Tass PA, Volkmann J, Lozano AM. Technology of deep brain stimulation: current status and future directions. *Nat Rev Neurol*. 2021 Feb;17(2):75-87. doi: 10.1038/s41582-020-00426-z
- Hariz M, Blomstedt P. Deep brain stimulation for Parkinson's disease. *J Intern Med*. 2022 Nov;292(5):764-778. doi: 10.1111/joim.13541
- Higuchi Y, Matsuda S, Serizawa T. Gamma knife radiosurgery in movement disorders: Indications and limitations. *Mov Disord*. 2017 Jan;32(1):28-35. doi: 10.1002/mds.26625
- Taira T, Horisawa S, Takeda N, Ghate P. Stereotactic Radiofrequency Lesioning for Movement Disorders. *Prog Neurol Surg*. 2018;33:107-119. doi: 10.1159/000481079
- Fukutome K, Hirabayashi H, Osakada Y, Kuga Y, Ohnishi H. Bilateral Magnetic Resonance Imaging-Guided Focused Ultrasound Thalamotomy for Essential Tremor. *Stereotact Funct Neurosurg*. 2022;100(1):44-52. doi: 10.1159/000518662
- Giammalva GR, Maugeri R, Umana GE, Paolini F, Bonosi L, Meccio F, Scalia G, Palmisciano P, Gerardi RM, Iacopino DG. DBS, tMRGfUS, and gamma knife radiosurgery for the treatment of essential tremor: a systematic review on techniques, indications, and current applications. *J Neurosurg Sci*. 2022 Dec;66(6):476-484. doi: 10.23736/S0390-5616.22.05524-2
- Kostiuk K. Stereotactic Staged Asymmetric Bilateral Radiofrequency Lesioning for Parkinson's Disease. *Stereotact Funct Neurosurg*. 2023;101(6):359-368. doi: 10.1159/000534084
- Haynes WI, Haber SN. The organization of prefrontal-subthalamic inputs in primates provides an anatomical substrate for both functional specificity and integration: implications for Basal Ganglia models and deep brain stimulation. *J Neurosci*. 2013 Mar 13;33(11):4804-14. doi: 10.1523/JNEUROSCI.4674-12.2013
- Verlaet L, Rijks N, Dilai J, Admiraal M, Beudel M, de Bie RMA, van der Zwaag W, Schuurman R, van den Munckhof P, Bot M. 7-Tesla Magnetic Resonance Imaging Scanning in Deep Brain Stimulation for Parkinson's Disease: Improving Visualization of the Dorsolateral Subthalamic Nucleus. *Mov Disord Clin Pract*. 2024 Apr;11(4):373-380. doi: 10.1002/mdc3.13982
- Kremer NI, Roberts MJ, Potters WV, Dilai J, Mathiopoulou V, Rijks N, Drost G, van Laar T, van Dijk JMC, Beudel M, de Bie RMA, van den Munckhof P, Janssen MLF, Schuurman PR, Bot M. Dorsal subthalamic nucleus targeting in deep brain stimulation: microelectrode recording versus 7-Tesla connectivity. *Brain Commun*. 2023 Nov 11;5(6):fcad298. doi: 10.1093/braincomms/fcad298
- Little S, Brown P. Debugging Adaptive Deep Brain Stimulation for Parkinson's Disease. *Mov Disord*. 2020 Apr;35(4):555-561. doi: 10.1002/mds.27996
- Wang S, Zhu G, Shi L, Zhang C, Wu B, Yang A, Meng F, Jiang Y, Zhang J. Closed-Loop Adaptive Deep Brain Stimulation in Parkinson's Disease: Procedures to Achieve It and Future Perspectives. *J Parkinsons Dis*. 2023;13(4):453-471. doi: 10.3233/JPD-225053
- Ramanathan PV, Salas-Vega S, Shenai MB. Directional Deep Brain Stimulation-A Step in the Right Direction? A Systematic Review of the Clinical and Therapeutic Efficacy of Directional Deep Brain Stimulation in Parkinson Disease. *World Neurosurg*. 2023 Feb;170:54-63.e1. doi: 10.1016/j.wneu.2022.11.085
- Rajamani N, Friedrich H, Butenko K, Dembek T, Lange F, Navrátil P, Zvarova P, Hollunder B, de Bie RMA, Odekerken VJJ, Volkmann J, Xu X, Ling Z, Yao C, Ritter P, Neumann WJ, Skandalakis GP, Komaitis S, Kalyvas A, Koutsarnakis C, Stranjalis G, Barbe M, Milanese V, Fox MD, Kühn AA, Middlebrooks E, Li N, Reich M, Neudorfer C, Horn A. Deep brain stimulation of symptom-specific networks in Parkinson's disease. *Nat Commun*. 2024 May 31;15(1):4662. doi: 10.1038/s41467-024-48731-1
- Coenen VA, Allert N, Paus S, Kronenbürger M, Urbach H, Mädler B. Modulation of the cerebello-thalamo-cortical network in thalamic deep brain stimulation for tremor: a diffusion tensor imaging study. *Neurosurgery*. 2014 Dec;75(6):657-69; discussion 669-70. doi: 10.1227/NEU.0000000000000540
- Fahn S, Tolosa E, Marin C. Clinical rating scale for tremor. In: Jankovic J, Tolosa E, editors. *Parkinson's disease and movement disorders*. Baltimore-Munich: Urban & Schwarzenberg; 1988. p. 225-234.
- Goetz CG, Tilley BC, Shaftman SR, Stebbins GT, Fahn S, Martinez-Martin P, Poewe W, Sampaio C, Stern MB, Dodel R, Dubois B, Holloway R, Jankovic J, Kulisevsky J, Lang AE, Lees A, Leurgans S, LeWitt PA, Nyenhuis D, Olanow CW, Rascol O, Schrag A, Teresi JA, van Hilten JJ, LaPelle N; Movement Disorder Society UPDRS Revision Task Force. Movement Disorder Society-sponsored revision of the Unified Parkinson's Disease Rating Scale (MDS-UPDRS): scale presentation and clinimetric testing results. *Mov Disord*. 2008 Nov 15;23(15):2129-70. doi: 10.1002/mds.22340
- Sammartino F, Krishna V, King NK, Lozano AM, Schwartz ML, Huang Y, Hodaie M. Tractography-Based Ventral Intermediate Nucleus Targeting: Novel Methodology and Intraoperative Validation. *Mov Disord*. 2016 Aug;31(8):1217-25. doi: 10.1002/mds.26633
- Rodriguez-Oroz MC, Martínez-Fernández R, Lipsman

- N, Horisawa S, Moro E. Bilateral Lesions in Parkinson's Disease: Gaps and Controversies. *Mov Disord.* 2025 Feb;40(2):231-240. doi: 10.1002/mds.30090
20. Chintapalli R, Chang S, Kaprelian T, Savjani R, Tenn S, Bari A. Gamma knife versus linear accelerator thalamotomy for essential tremor and Parkinson's disease: A systematic review and meta-analysis. *J Clin Neurosci.* 2025 Mar;133:111050. doi: 10.1016/j.jocn.2025.111050
21. Paschen S, Natera-Villalba E, Pineda-Pardo JA, Del Álamo M, Rodríguez-Rojas R, Hensler J, Deuschl G, Obeso JA, Helters AK, Martínez-Fernández R. Comparative Study of Focused Ultrasound Unilateral Thalamotomy and Subthalamotomy for Medication-Refractory Parkinson's Disease Tremor. *Mov Disord.* 2025 May;40(5):823-833. doi: 10.1002/mds.30159
22. Ranjan M, Elias GJB, Boutet A, Zhong J, Chu P, Germann J, Devenyi GA, Chakravarty MM, Fasano A, Hynynen K, Lipsman N, Hamani C, Kucharczyk W, Schwartz ML, Lozano AM, Hodaie M. Tractography-based targeting of the ventral intermediate nucleus: accuracy and clinical utility in MRgFUS thalamotomy. *J Neurosurg.* 2019 Sep 27;133(4):1002-1009. doi: 10.3171/2019.6.JNS19612
23. Muller J, Alizadeh M, Matias CM, Thalheimer S, Romo V, Martello J, Liang TW, Mohamed FB, Wu C. Use of probabilistic tractography to provide reliable distinction of the motor and sensory thalamus for prospective targeting during asleep deep brain stimulation. *J Neurosurg.* 2021 Oct 8;136(5):1371-1380. doi: 10.3171/2021.5.JNS21552
24. Nowacki A, Schlaier J, Debove I, Pollo C. Validation of diffusion tensor imaging tractography to visualize the dentatorubrothalamic tract for surgical planning. *J Neurosurg.* 2019 Jan 1;130(1):99-108. doi: 10.3171/2017.9.JNS171321
25. Coenen VA, Allert N, Mädler B. A role of diffusion tensor imaging fiber tracking in deep brain stimulation surgery: DBS of the dentato-rubro-thalamic tract (drt) for the treatment of therapy-refractory tremor. *Acta Neurochir (Wien).* 2011 Aug;153(8):1579-85; discussion 1585. doi: 10.1007/s00701-011-1036-z
26. Tsolaki E, Kashanian A, Chiu K, Bari A, Pouratian N. Connectivity-based segmentation of the thalamic motor region for deep brain stimulation in essential tremor: A comparison of deterministic and probabilistic tractography. *Neuroimage Clin.* 2024;41:103587. doi: 10.1016/j.nicl.2024.103587
27. Rodrigues NB, Mithani K, Meng Y, Lipsman N, Hamani C. The Emerging Role of Tractography in Deep Brain Stimulation: Basic Principles and Current Applications. *Brain Sci.* 2018 Jan 29;8(2):23. doi: 10.3390/brainsci8020023
28. Magara A, Bühler R, Moser D, Kowalski M, Pourtehrani P, Jeanmonod D. First experience with MR-guided focused ultrasound in the treatment of Parkinson's disease. *J Ther Ultrasound.* 2014 May 31;2:11. doi: 10.1186/2050-5736-2-11
29. Hassler R, Riechert T. Indications and localization of stereotactic brain operations. *Confin Neurol.* 1954;14:1-15.