

DOI: <https://doi.org/10.36425/rehab696968>

EDN: NKCMVD

Нарушение равновесия и ходьбы после проведения деструкции подкорковых структур головного мозга высокоинтенсивным фокусированным ультразвуком: клинический случай

А.С. Симонян¹, Е.С. Иконникова¹, А.Е. Слотина¹, Д.А. Колесников², А.Ю. Тропынина¹,
А.С. Филатов¹, А.О. Гуца¹, Н.А. Супонева¹

¹ Российский центр неврологии и нейронаук, Москва, Россия;

² Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет), Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Транскраниальный магнитно-резонансный направленный фокусированный ультразвук представляет собой активно развивающийся неинвазивный метод лечения неврологических заболеваний, связанных с расстройствами движений. Наибольший опыт накоплен в лечении пациентов с эссенциальным тремором и болезнью Паркинсона. Однако, несмотря на малую травматичность при проведении подобных вмешательств, существуют данные о некотором количестве побочных эффектов, одним из которых является нарушение функции равновесия, которое может встречаться в 75–90% случаев. Наиболее выраженные нарушения выявляются у пациентов с высокоэнергетическим воздействием, а также у пациентов с распространением области воздействия в субталамическую зону.

Настоящее клиническое наблюдение описывает характеристики нарушений равновесия, а также изменения в биомеханике ходьбы у пациента в возрасте 63 лет с фармакорезистентным течением эссенциального тремора, перенёвшего операцию на головном мозге фокусированным ультразвуком. В объёме предоперационной подготовки выполнены магнитно-резонансная и компьютерная томография головного мозга; по результатам компьютерной томографии рассчитан коэффициент ультразвуковой проводимости костной ткани черепа. С учётом низкого показателя коэффициента выполнена модификация стандартного протокола проведения фокусированного ультразвука. В послеоперационном периоде после высокоэнергетического воздействия в области вентрального промежуточного ядра левого таламуса с распространением в заднюю субталамическую зону отмечен регресс тремора в правых конечностях, однако результаты клинической оценки состояния пациента, а также сравнительный анализ стабилометрии в дооперационном и послеоперационном периодах демонстрируют изменения равновесия и ходьбы.

Таким образом, с одной стороны, наглядно показана безусловная эффективность метода фокусированного ультразвука при эссенциальном треморе, с другой — возможность развития побочных явлений, которые, несмотря на регресс основного клинического проявления заболевания, могут приводить к недостаточной удовлетворённости пациента лечением. Дальнейшие исследования помогут определить факторы, приводящие к нарушению равновесия, повысить качество отбора пациентов для проведения вмешательств методом фокусированного ультразвука, и разработать программы профилактики падений для уменьшения нарушений походки и равновесия у данной категории пациентов.

Ключевые слова: эссенциальный тремор; фокусированный ультразвук; магнитно-резонансный направленный фокусированный ультразвук; МР-ФУЗ; нарушения равновесия; анализ ходьбы; стабилометрия.

Как цитировать:

Симонян А.С., Иконникова Е.С., Слотина А.Е., Колесников Д.А., Тропынина А.Ю., Филатов А.С., Гуца А.О., Супонева Н.А. Нарушение равновесия и ходьбы после проведения деструкции подкорковых структур головного мозга высокоинтенсивным фокусированным ультразвуком: клинический случай // Физическая и реабилитационная медицина, медицинская реабилитация. 2026. Т. 8, № 1. С. 64–75. DOI: 10.36425/rehab696968 EDN: NKCMVD

DOI: <https://doi.org/10.36425/rehab696968>

EDN: NKCMVD

Disturbances of Balance and Gait Following High-Intensity Focused Ultrasound Ablation of Subcortical Brain Structures: a Case Report

Armen S. Simonyan¹, Ekaterina S. Ikonnikova¹, Anastasiya E. Slotina¹, Daniil A. Kolesnikov², Anastasiya Yu. Tropynina¹, Alexey S. Filatov¹, Artem O. Gushcha¹, Natalia A. Suponeva¹

¹ Russian Center of Neurology and Neurosciences, Moscow, Russia;

² Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

ABSTRACT

Transcranial magnetic resonance-guided focused ultrasound is a rapidly evolving noninvasive treatment modality for neurological disorders associated with movement disturbances. The greatest clinical experience has been accumulated in patients with essential tremor and Parkinson disease. Despite the minimally invasive nature of this intervention, adverse effects have been reported, including postural imbalance, which may occur in 75%–90% of cases. The most pronounced disturbances are detected in patients undergoing high-energy exposure, as well as in patients with extension of the treatment area into the subthalamic region.

The present clinical observation describes the characteristics of balance disturbances and changes in gait biomechanics in a 63-year-old patient with pharmacoresistant essential tremor who underwent focused ultrasound brain surgery. As part of the preoperative assessment, magnetic resonance imaging and computed tomography of the brain were performed; based on computed tomography findings, the skull density ratio was calculated. Given the low skull density ratio, modification of the standard magnetic resonance-guided focused ultrasound protocol was performed. In the postoperative period, following high-energy exposure in the region of the left ventral intermediate nucleus of the thalamus with extension into the posterior subthalamic region, regression of tremor in the right extremities was noted; however, clinical assessment of the patient's condition, as well as comparative stabilometric analysis in the preoperative and postoperative periods, demonstrated alterations in balance and gait.

Thus, on the one hand, the unequivocal efficacy of the focused ultrasound method in essential tremor is clearly demonstrated; on the other hand, the possibility of adverse events is evident, which, despite regression of the main clinical manifestation of the disease, may lead to insufficient patient satisfaction with treatment. Further studies will help identify factors leading to balance disturbances, improve the selection of patients for focused ultrasound interventions, and develop fall-prevention programs aimed at reducing gait and balance disorders in this patient population.

Keywords: essential tremor; focused ultrasound; magnetic resonance-guided focused ultrasound; MRgFUS; postural balance disorders; gait analysis; stabilometry.

To cite this article:

Simonyan AS, Ikonnikova ES, Slotina AE, Kolesnikov DA, Tropynina AY, Filatov AS, Gushcha AO, Suponeva NA. Disturbances of Balance and Gait Following High-Intensity Focused Ultrasound Ablation of Subcortical Brain Structures: a Case Report. *Physical and rehabilitation medicine, medical rehabilitation*. 2026;8(1):64–75. DOI: 10.36425/rehab696968 EDN: NKCMVD

Submitted: 25.11.2025

Accepted: 18.01.2026

Published online: 12.03.2026

ОБОСНОВАНИЕ

Транскраниальный магнитно-резонансный направленный фокусированный ультразвук (ФУЗ) является молодым и перспективным направлением лечения неврологических заболеваний, в первую очередь расстройств движений. Наибольший опыт накоплен в лечении пациентов с эссенциальным тремором и болезнью Паркинсона. Метод позволяет проводить воздействие на подкорковых структурах головного мозга в пределах 3,0–3,5 см от мидкомиссуральной (соединяющей переднюю и заднюю комиссуры головного мозга) линии, не прибегая к открытому хирургическому вмешательству. Воздействие проводится путём концентрации ультразвуковых волн в определённой точке головного мозга, что позволяет проводить контролируемое нагревание указанных структур с использованием термометрии в реальном времени. После пробного воздействия (нагревание до 50°C) и подтверждения «точки мишени» проводятся лечебные соники (ультразвуковая обработка) с формированием очага деструкции. Основными мишенями для фокусированного ультразвука служат вентральное промежуточное ядро таламуса (ventral intermediate nucleus, VIM) [1], иногда с дополнительным вовлечением задней субталамической области (posterior subthalamic area, PSA) [2], и область полей Фореля (A. Forel) — набирающая в последнее время популярность паллидоталамическая трактомия (pallidothalamic tractotomy, PTT) [3]. Описаны также редкие клинические наблюдения с использованием в качестве мишениocerebello-таламического тракта (cerebello-thalamic tract, CTT). Особенностью использования метода является малотравматичность, что позволяет проводить хирургическое лечение пациентам старшей возрастной группы, а также лицам с тяжёлой соматической патологией, препятствующей проведению открытых хирургических вмешательств.

Эффективность и безопасность метода в лечении эссенциального тремора и дрожательной формы болезни Паркинсона продемонстрирована в многочисленных клинических исследованиях [4–6]. При эссенциальном треморе возможно также проведение поэтапных двусторонних воздействий фокусированным ультразвуком (ФУЗ) с соблюдением определённых мер предосторожности [7]. Эффективность метода позволила включить его в европейские рекомендации по инвазивным методам лечения болезни Паркинсона [8]. Однако, несмотря на большое количество положительных характеристик, методика имеет свои недостатки и риски развития осложнений. Основными ограничениями/противопоказаниями к ФУЗ являются низкий коэффициент ультразвуковой проводимости костных структур (skull density ratio, SDR), клаустрофобия, наличие в теле пациента имплантатов, исключающих возможность проведения магнитно-резонансной томографии (МРТ), органические изменения структуры головного мозга, а также новообразования, артериовенозные мальформации

головного мозга и т.д. Одним из побочных явлений после ФУЗ, которое, по мнению некоторых авторов, встречается в 75–90% случаев, является нарушение равновесия. Отмечено, что наиболее выраженные изменения выявляются у пациентов с высокоэнергетическим воздействием. Объём послеоперационного очага деструкции, а также воздействие в области внутренней капсулы и субталамической зоны могут повысить риски формирования нарушений равновесия [9]. Нарушения равновесия в целом являются наиболее часто встречающимся в неврологической практике клиническим синдромом. Чаще всего они приводят к увеличению риска падения, что в свою очередь чревато серьёзными последствиями (травмы, переломы и др.). Как показывает практика крупных стационарных учреждений, наибольшая частота падений наблюдается именно в неврологических отделениях [10]. С точки зрения безопасности пациента, важно своевременно выявить этот синдром, оценить его выраженность и связанные с ним риски. Это необходимо для индивидуального сопровождения пациента в послеоперационном периоде и принятия профилактических мер.

Для диагностики нарушений равновесия в неврологии и реабилитации в первую очередь применяются клинические шкалы. Наиболее часто у неврологических пациентов используется шкала баланса Берг (Berg Balance Scale, BBS), которая демонстрирует высокую чувствительность и специфичность при определении степени выраженности нарушений равновесия и связанного с ним риска падений [11]. Однако, несмотря на высокую чувствительность, любые клинические шкалы обладают одним большим недостатком — высокой субъективностью. Кроме того, ввиду их неспецифичности, невозможно детально выявить связанные с падениями нарушения. Этот недостаток восполняется различными инструментальными методиками [12]. Золотым стандартом в диагностике статических нарушений равновесия является компьютерная стабилметрия, которая позволяет выявить даже тонкие нарушения компенсаторных стратегий, используемых для поддержания функции равновесия [13]. Для диагностики нарушений динамического равновесия требуется выполнение анализа походки, в котором наибольшей информативностью обладает анализ на оптических системах захвата движения, что активно применяется в научно-исследовательской и клинической практике, в том числе при нейродегенеративных заболеваниях, при которых применяется ФУЗ [14]. Наиболее полную картину позволяет получить сочетание клинической и инструментальной оценки.

В статье представлен клинический случай пациента, которому интраоперационно проведено воздействие ФУЗ по каудолатеральной границе вентрального промежуточного ядра таламуса (ventral intermediate nucleus, VIM) с распространением в заднюю субталамическую зону — каудальную неопределённую зону (от лат. *zona incerta*). До проведения и после оперативного лечения выполнена

клиническая оценка состояния пациента с использованием валидированной шкалы баланса Берг (BBS) и шкалы падений Морзе (Morse Fall Scale). Для детальной оценки проведены стабилметрия и видеонализ ходьбы, позволяющие объективно оценить изменения равновесия и походки исходно и в динамике.

Описание настоящего случая демонстрирует важность полноценного изучения нарушений равновесия и риска падения у неврологических пациентов, позволяющих оперативное лечение при помощи технологии МР-направленного фокусированного ультразвука.

ОПИСАНИЕ СЛУЧАЯ

0 пациенте

Пациент М., 63 года.

Анамнез заболевания. Впервые отметил появление дрожания правой руки, связанного в большей степени с эмоциональным перенапряжением, в период с 2004 по 2006 год. Симптомы были непостоянными и не доставляли особого дискомфорта. В период с 2019 по 2020 год отметил присоединение симптомов дрожания в левой

руке. Прогрессирование заболевания и нарастание выраженности дрожания отмечалось с 2021 по 2024 год. Впервые в 2022 году в ФГБНУ «Российский центр неврологии и нейронаук» был установлен диагноз «Эссенциальный тремор», проводилась фармакотерапия с использованием основных групп препаратов для лечения эссенциального тремора (бета-блокаторы, антиконвульсанты, бензодиазепины и т.д.) с незначительным положительным эффектом.

С учётом фармакорезистентности тремора в 2024 году консультирован нейрохирургом: по результатам компьютерной и магнитно-резонансной томографии головного мозга пациент был отобран для проведения вмешательства методом ФУЗ. В предоперационном периоде для последующей оценки эффекта проведённой операции были использованы следующие клинические шкалы: клиническая шкала оценки тремора (Clinical Rating Scale for Tremor, CRST), опросник качества жизни при эссенциальном треморе (Quality of Life in Essential Tremor Questionnaire, QUEST), Монреальская шкала оценки когнитивных функций (Montreal Cognitive Assessment, MoCA), госпитальная шкала тревоги и депрессии (Hospital Anxiety and Depression Scale, HADS); табл. 1.

Таблица 1. Данные клинической оценки пациента до и после хирургического лечения по шкалам CRST, QUEST, MoCA и HADS
Table 1. Clinical assessment data before and after surgical treatment according to the CRST, QUEST, MoCA, and HADS scales

Part A			Part B		
	Pre-op	Post-op		Pre-op	Post-op
1	1	1	10	2	1
2	1	1	11	4	1
	1	1		3	3
3	0	0	12	4	1
4	1	1		3	3
	1	1	13	3	1
5	2	0		2	2
	3	1	14	3	1
	4	1		2	2
6	1	1	Part C		
	2	2		Pre-op	Post-op
	3	3	15	0	0
7	0	0	16	1	1
	0	0	17	3	1
8	0	0	18	1	1
	0	0	19	1	1
	0	0	20	2	1
9	0	0	21	2	2
	0	0	CRST		
	0	0			

Таблица 1. Продолжение

Table 1. Continuation

Scale	QUEST					MoCA	HADS
	Communication	Work and Finances	Hobbies and Leisure	Physical	Psychosocial		
Pre-op	16.6%	45.83%	58.33%	52.77%	16.6%	27	4
Post-op	16.6%	41.6%	50%	33,3%	16,6%	27	4

Примечание. По клинической шкале оценки тремора отмечено снижение суммарного балла, а также балла по частям А, В, С, что свидетельствует о положительной динамике. При катamnестической оценке по частям шкалы QUEST, затрагивающим «коммуникацию» и «психосоциальные способности», а также по шкалам MoCA и HADS изменений не выявлено. По частям, затрагивающим «работу и финансы», «хобби и досуг», «физическая активность», отмечена положительная динамика (уменьшение в процентах).

Лечение

Хирургическое лечение пациента проведено с применением устройства InSightec Exablate Neuro (Израиль). Стандартный протокол высокоинтенсивного воздействия модифицирован в связи с индивидуальными особенностями пациента. С учётом относительно больших размеров вентрального промежуточного ядра таламуса (VIM), отсутствия возможности прямой визуализации ядра на МРТ и индивидуальной вариабельности прохождения в ядре дентаторуброталамического тракта (dentatorubrothalamic tract, DRTT) могло потребоваться большое количество «пробных» воздействий на указанную область, в связи с чем принято решение об избрании точкой мишени каудолатеральной границы VIM (по нижнелатеральной границе таламуса) с одновременным распространением в заднюю субталамическую зону (каудальная *zona incerta*). С учётом высокой вероятности формирования ультразвуковой резистентности и ограниченного количества воздействий были сокращены воздействия в режиме Align (выравнивания). Проведены 4 воздействия фокусированным ультразвуком

(соникации) (табл. 2), два из которых были лечебными (рис. 1), однако у пациента отмечено формирование выраженной головной боли и тошноты. Принято решение о прекращении воздействий.

Через сутки выполнено МРТ головного мозга. На представленных изображениях в аксиальной плоскости отмечается формирование очага деструкции и небольшой зоны отёка (рис. 2): размеры очага (диаметр 2,2 мм) значительно меньше классического очага деструкции при ФУЗ.

С учётом отсутствия клинических признаков отёка мозга (капсулярная симптоматика в виде парезов мимической мускулатуры и парезов конечностей, нарушения чувствительности, появление ранее не отмеченных гиперкинезов) принято решение воздержаться от проведения противоотёчной терапии. На изображениях в коронарном срезе подтверждено полное соответствие очага воздействия запланированной гипотезе, очаг расположен в указанной зоне. Через сутки после вмешательства проведена повторная оценка пациента по клиническим шкалам (сравнительные результаты до- и послеоперационного тестирования приведены в табл. 2), также

Таблица 2. Параметры интраоперационного воздействия

Table 2. Intraoperative sonication parameters

Номер соникации	1	2	3	4
Режим	Align	Verify	Treat Low	Treat Low
Энергия (Дж)	5000	14000	30000	30000
Лимит силы (Вт)	400	700	850	900
Время	15	23	38	42
Температура (максимальная)	41	45	49	51
Температура (средняя)	41	43	48	49
Терапевтический эффект	-	Кратковременный регресс тремора	Регресс тремора	Регресс тремора
Побочные явления	-	-	Ощущение «сдавления головы», головная боль, тошнота	Ощущение «сдавления головы», головная боль, тошнота

Примечание. Приведены параметры интраоперационного воздействия (режим, время, энергия и сила воздействия), достигнутые температуры в зоне воздействия (максимальная, средняя), а также терапевтический эффект и побочные явления после каждого воздействия. Align: Верификация точности воздействия; Verify: Пробное воздействие; Treat Low: Лечебное воздействие.

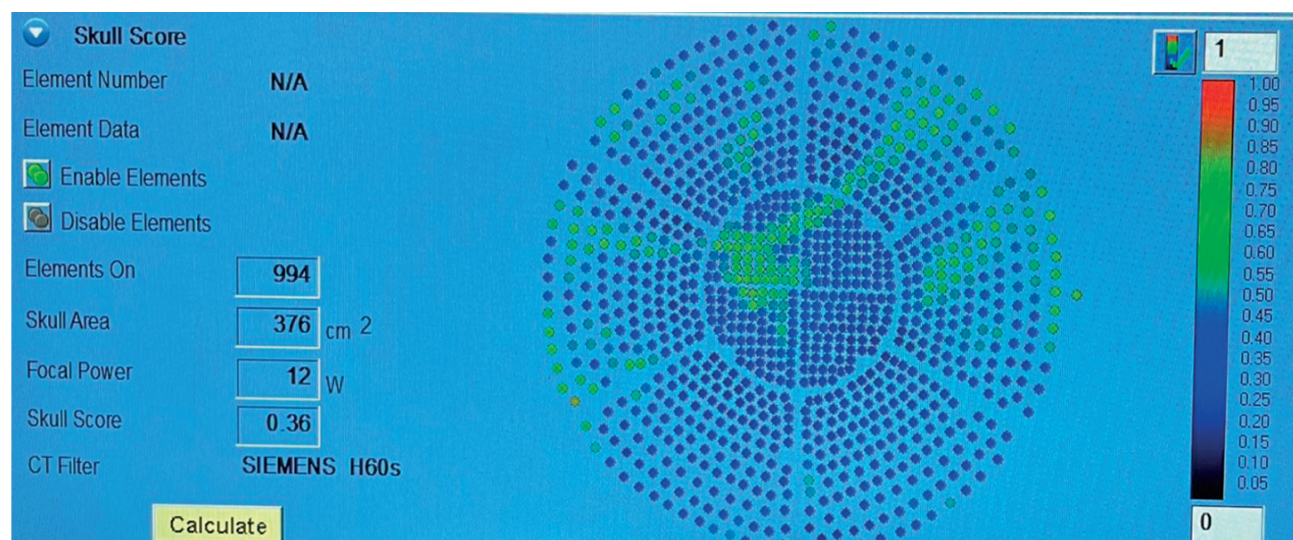


Рис. 1. Интраоперационная картина интерфейса оборудования перед первым пробным воздействием. Продемонстрированы количество активных элементов (994), площадь черепа (376 см²), фокальная энергия (12 W), коэффициент ультразвуковой проводимости (0,36).

Fig. 1. Intraoperative interface display prior to the first test sonication. Shown are the number of active transducer elements (994), skull surface area (376 cm²), focal energy (12 W), and skull density ratio (0.36).

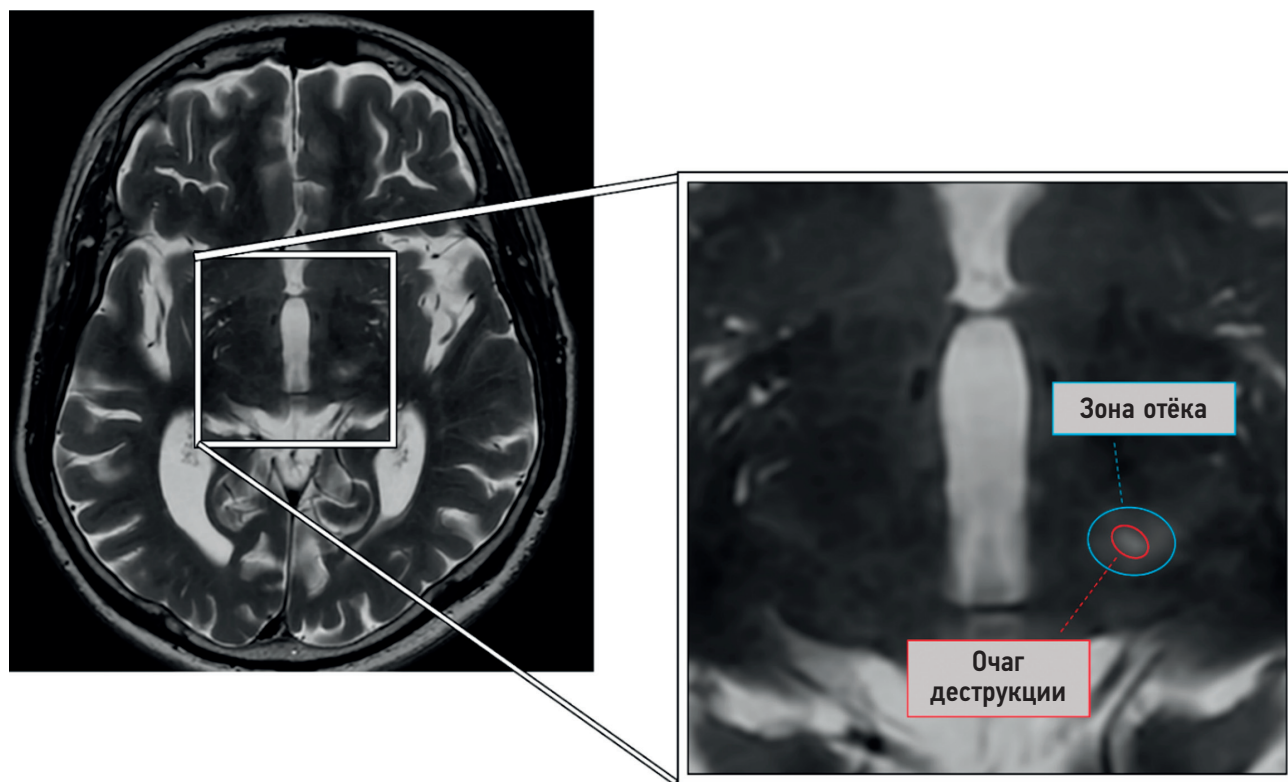


Рис. 2. Очаг деструкции и перифокальный отёк после операции с применением технологии фокусированного ультразвука (диаметр очага деструкции 2,2 мм).

Fig. 2. Postoperative lesion focus and perifocal edema following focused ultrasound treatment (lesion diameter 2.2 mm).

представлен фрагмент теста CRST, наглядно демонстрирующий положительную динамику в состоянии пациента в виде значительного регресса кинетического тремора (рис. 3).

Таким образом, продемонстрирована эффективность проведённого оперативного вмешательства по основному

заболеванию: отмечен значительный регресс тремора по тесту CRST (часть А: было 20, стало 13; часть Б: было 26, стало 15; часть С: было 10, стало 7; суммарный балл: был 56, стал 35); улучшилось качество жизни за счёт разделов, касающихся работы и финансов, хобби и досуга, физического состояния.

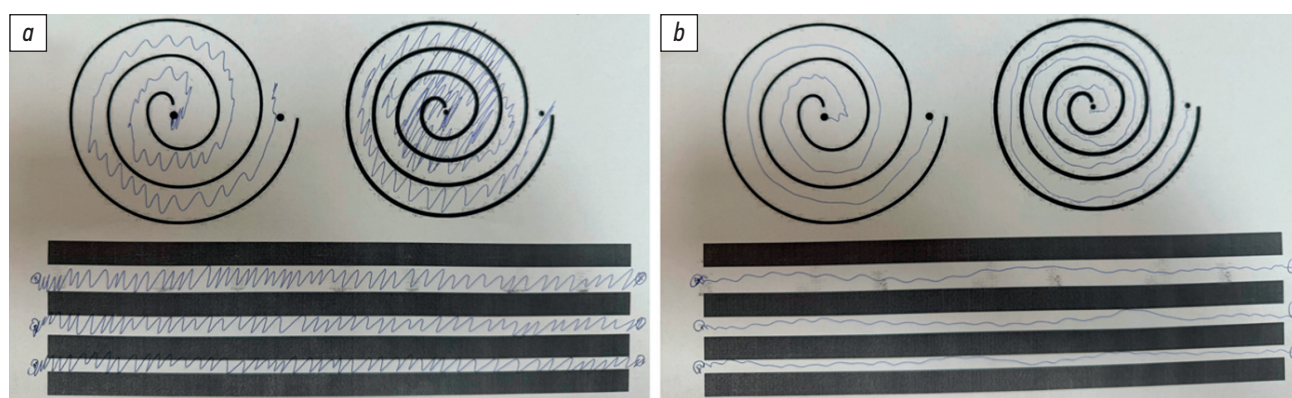


Рис. 3. Фрагмент теста CRST в дооперационном (а) и послеоперационном (б) периодах, демонстрирующий положительную динамику в состоянии пациента в виде значительного регресса кинетического тремора.

Fig. 3. Fragment of the CRST assessment in the preoperative (a) and postoperative (b) periods demonstrating positive trends in the patient's condition manifested by substantial regression of kinetic tremor.

Динамика и исходы

В послеоперационном периоде у пациента отмечено появление нарушения равновесия и шаткости при ходьбе. Для оценки использованы шкала Морзе и шкала балланса Берг (перед оперативным лечением и на вторые сутки после оперативного лечения). Клиническая оценка показала отсутствие рисков падений (0 баллов по шкале Морзе) как до, так и после операции. По шкале балланса Берг также не выявлено нарушений функции равновесия: балл до проведения лечения составил 54 (ниже нормы на 2 балла за счёт лёгкого нарушения статического равновесия), после лечения — 52 (к сохраняющемуся лёгкому нарушению статического равновесия добавилось лёгкое ухудшение при выполнении динамических проб). Эти значения относятся к лёгким нарушениям [15]. Полученные данные оказались малочувствительными к динамике функции равновесия, при том что сам пациент отчётливо описывал ухудшение, в том числе негативное влияние на походку.

Инструментальная оценка равновесия позволила получить более детальную информацию. Для этого была использована стабилметрическая платформа (Балфит, ООО «Неврокор», Россия). Тестирование включало в себя три базовые пробы:

1) тест Ромберга: тест состоит из двух проб с открытыми и закрытыми глазами, при этом стопы пациента располагаются в позиции, позволяющей достаточно устойчиво поддерживать равновесие (европейская позиция: стопы развёрнуты друг к другу под углом 30°, пятки расположены на расстоянии 2 см друг от друга). В данном тесте проводится анализ перемещения центра давления и поддержания равновесия под контролем зрения и без него. Таким образом можно оценить не только базовые показатели функции равновесия, но и роль зрения в его поддержании;

- 2) тест лимита стабильности: данный тест позволяет измерить устойчивость пациента в максимальном отклонении в четырёх направлениях (вперёд, назад, вправо и влево);
- 3) усложнённый тест Ромберга (стопы вместе): представляет собой модификацию классического теста Ромберга, в котором стопы располагаются вместе (в наименее устойчивом положении при узкой базе опоры), что позволяет выявить более тонкие нарушения функции равновесия.

Результаты проведённого стабилметрического исследования позволили выявить более тонкие нарушения функции равновесия, которые не были выявлены при рутинном клиническом обследовании (табл. 3). Изменения, полученные при анализе классического теста Ромберга, показали следующее: несмотря на то, что площадь статокинезиограммы до операции находилась в пределах нормальных значений, наблюдалось значимое увеличение параметров коэффициента LFS (Length/Forced Surface), который отражает длину статокинезиограммы в рамках площади колебаний и позволяет оценить истинное значение колебаний центра давления. Увеличение коэффициента LFS свидетельствовало о том, что у пациента имелись постуральные нарушения, которые на тот момент находились в стадии компенсации (ограничены нормальной площадью статокинезиограммы). Обращало на себя внимание и уменьшение данного коэффициента в положении с открытыми глазами после оперативного лечения, а также его увеличение с закрытыми глазами. В случае с открытыми глазами уменьшение коэффициента, вероятнее всего, связано с увеличением площади статокинезиограммы после операции ФУЗ и сохранением колебаний центра давления на прежнем уровне. В пробе с закрытыми глазами отмечено не только увеличение площади, но и увеличение длины статокинезиограммы после проведённого вмешательства, что, безусловно, свидетельствует о большей неустойчивости с закрытыми

Таблица 3. Результаты стабилотрии по тесту Ромберга до и после применения технологии фокусированного ультразвука**Table 3.** Stabilometric results of the Romberg test before and after focused ultrasound treatment

Показатель	До лечения	После лечения
Глаза открыты		
Площадь статокинезиограммы, S, мм ²	51	69 (+18)
Отношение длины статокинезиограммы к её площади, LFS, 1/мм	5,5	3,41 (-2,09)
Скорость перемещения центра давления, V, мм/с	14,27	11,86 (-2,41)
Глаза закрыты		
Площадь статокинезиограммы, S, мм ²	148	168 (+20)
Отношение длины статокинезиограммы к её площади, LFS, 1/мм	2,71	3,09 (+0,38)
Скорость перемещения центра давления, V, мм/с	20,29	26,35 (+6,06)
Общий показатель		
Коэффициент Ромберга, QR, %	285	242 (-43)

глазами. Помимо данных изменений, обращает на себя внимание увеличение скорости перемещения центра давления, причём изменения для пробы с открытыми и закрытыми глазами аналогичны показателю LFS. Показатели коэффициента Ромберга указывают на то, что до операции у пациента в поддержании равновесия большую роль играло зрение (значение выше 250). Несмотря на то, что после операции значение коэффициента снизилось (за счёт увеличения площади колебаний центра давления с открытыми глазами), опора на зрение в поддержании равновесия осталась достаточно высокой. Таким образом, классический тест Ромберга показал, что у пациента с открытыми глазами после операции ФУЗ наблюдалось относительное улучшение показателей, которое, вероятнее всего, было связано с компенсаторными реакциями системы контроля равновесия. В свою очередь изменения, наблюдаемые с закрытыми глазами (т.е. при исключении зрительной компенсации), показывают умеренное ухудшение равновесия.

Далее нами был проведён анализ усложнённого теста Ромберга (стопы вместе), который создаёт узкую базу опоры, что посредством вывода пациента из зоны компенсации позволяет выявить и оценить более лёгкие нарушения равновесия, слабо выявляемые в классическом тесте Ромберга (табл. 4). На первый взгляд, после операции в усложнённом тесте Ромберга с открытыми глазами у пациента уменьшилась площадь статокинезиограммы, что может ложно восприниматься как улучшение функции поддержания равновесия в данном состоянии. Однако анализ динамики остальных показателей свидетельствует о том, что длина движения центра давления на данной площади (показатель LFS) увеличивается так же, как и показатель скорости, затрачиваемой на поддержание равновесия. Эти изменения свидетельствуют о том, что пациенту после оперативного лечения, несмотря на уменьшение площади, в рамках которой происходит перемещение центра давления, требуется затрачивать большее количество компенсаторных движений для его поддержания,

Таблица 4. Результаты стабилотрии по усложнённому тесту Ромберга (стопы вместе)**Table 4.** Results of stabilometry during the modified Romberg test (feet together)

Показатель	До лечения	После лечения
Глаза открыты		
Площадь статокинезиограммы, S, мм ²	131	97 (-34)
Отношение длины статокинезиограммы к её площади, LFS, 1/мм	2,10	2,91 (+0,81)
Скорость перемещения центра давления, V, мм/с	13,8	14,17 (+0,37)
Глаза закрыты		
Площадь статокинезиограммы, S, мм ²	272	413 (+141)
Отношение длины статокинезиограммы к её площади, LFS, 1/мм	1,97	1,50 (-0,47)
Скорость перемещения центра давления, V, мм/с	27,22	31,33 (+4,11)
Общий показатель		
Коэффициент Ромберга, QR, %	207	425 (+218)

что и проявляется увеличением остальных показателей теста. Однако наиболее отчётливые нарушения после операции наблюдались при исключении зрения из процесса поддержания равновесия. Так, площадь статокинезиограммы в усложнённом тесте Ромберга с закрытыми глазами увеличилась практически в 2 раза, что свидетельствует о выраженном ухудшении функции равновесия. Данные изменения подтверждаются также возрастанием скорости перемещения центра давления и затраченной механической работой, что говорит об использовании пациентом компенсаторных реакций для поддержания вертикальной позы в усложнённых условиях. Уменьшение показателя, отражающего длину перемещения центра давления, вероятнее всего, связано со значимым ростом площади, в рамках которой происходят движения. В свою очередь двукратное увеличение коэффициента Ромберга после проведённого лечения (было 207, стало 425) свидетельствует о значительной роли зрения в поддержании равновесия. Это означает, что в условиях плохой освещённости помещения или в тёмное время суток такие нарушения сопровождаются увеличением риска падения. Таким образом, анализ пробы Ромберга на узкой базе опоры позволил подтвердить наличие у пациента нарушений равновесия после операции ФУЗ, которые достаточно хорошо были компенсированы в обычных условиях (простой тест Ромберга), однако требуют определённой коррекции и соблюдения осторожности при ходьбе в условиях недостаточной освещённости или снижения зрения.

Тест, направленный на определение лимита стабильности в крайних точках поддержания равновесия (Limits of Stability Test, LOS), показал, что после деструктивной операции у пациента ухудшилось поддержание равновесия при переносе центра давления на левую ногу, что отразилось на увеличении площади статокинезиограммы (S , мм²) на левой ноге с 89 мм² до 109 мм², но показатель скорости перемещения центра давления при этом значительно не менялся. Стоит отметить, что коэффициент, отражающий стабильность, сохранял высокие значения (93–96%) как до, так и после операции, что свидетельствует в целом о достаточно хорошей устойчивости в крайних точках. Таким образом, тест LOS выявил небольшое ухудшение баланса при перемещении центра давления на левую ногу при сохранении хорошей устойчивости (стабильности) после проведённого оперативного лечения.

Вторым методом, который был использован для инструментальной оценки пациента, был видеонализ ходьбы на оптической системе VICON (Великобритания). Данный метод является золотым стандартом анализа движений, позволяет выявить нарушения всех компонентов шага и кинематических характеристик движений суставов во время ходьбы и сделать на их основании выводы о поддержании функции динамического равновесия. Согласно полученным данным, у пациента после проведённой операции ФУЗ отмечалось незначительное уменьшение скорости ходьбы (с 1,17 до 1,10 м/с), что в целом можно

рассматривать как нормальные показатели вариабельности скорости ходьбы. Однако наибольшие изменения наблюдались в параметрах цикла шага. Так, после операции было отмечено значительное уменьшение средней ширины шага правой ноги (с 0,20 до 0,092 м), что, вероятнее всего, связано со снижением уверенности в походке и ухудшении в поддержании динамического равновесия в левой ноге, что в свою очередь подтверждается значительным (более чем в 2 раза) уменьшением процента времени отрыва правой ноги (с 9,4% до 4,76% от цикла шага). Данные изменения свидетельствуют о том, что пациент после оперативного лечения в меньшей степени стал опираться на левую ногу и демонстрирует стремление к более быстрому и короткому переносу правой ноги для постановки в опору и большей уверенности. В свою очередь в левой ноге происходило небольшое компенсаторное увеличение длины шага (с 1,31 до 1,42 м), которое требовалось для сохранения и поддержания симметричности походки, а также незначительное уменьшение времени отрыва (полного переноса) левой ноги.

Анализ кинематических параметров углов движения и угловых скоростей в тазобедренном, коленном и голеностопном суставах статистически значимых изменений не показал, что свидетельствует об отсутствии грубых нарушений ходьбы, влияющих на функцию динамического равновесия у данного пациента.

ОБСУЖДЕНИЕ

Таким образом, представленный клинический случай позволил продемонстрировать, что после проведения процедуры высокоэнергетического МР-направленного ФУЗ у пациентов могут формироваться нарушения функции равновесия, незаметные при рутинном клиническом осмотре с использованием стандартизированных шкал (Морзе, балланса Берг). Это подтверждается и другими исследованиями, которые также не обнаруживали значимых изменений функции равновесия при использовании простых визуальных клинических шкал [16]. Нарушения равновесия у представленного пациента проявлялись в основном при усложнении стабилметрических проб путём закрывания глаз и постановки стоп в позиции узкой базы опоры (стопы вместе). Выявленные изменения параметров стабилметрии свидетельствуют о значительном ухудшении функции равновесия с закрытыми глазами и возросшей роли зрения в поддержании равновесия после оперативного лечения.

Как показывают ранее проведённые исследования, нарушения равновесия являются достаточно частым проявлением и достигают своего пика через 1 неделю после операции ФУЗ. Ключевыми факторами, приводящими к формированию нарушений равновесия, авторы называют размер и распространённость послеоперационного поражения в таламических ядрах с распространением в сторону внутренней капсулы и субталамической области [9]. В представленном клиническом случае возможными

факторами риска нарушений походки и равновесия являются расположение очага (охват субталамической области), а также высокоэнергетическое воздействие. По данным изучения значительных групп пациентов, необходимо отметить, что после проведения ФУЗ-таламотомии длительное (постоянное) сохранение симптомов нарушения равновесия и ходьбы наблюдается у 15% пациентов, что включает факт, объясняющий данное осложнение исключительно развитием послеоперационного отёка [9]. Нарушение равновесия и ходьбы у пациентов с эссенциальным тремором после проведения ФУЗ и без него подтверждает современное представление о мультисимптомном характере данной нозологии, сопровождающейся развитием мозжечковой дегенерации [17, 18]. Сложная двусторонняя осцилляторная гиперфункция мозжечка, вероятно, реализуется многообразными симптомами эссенциального тремора через церебелло-таламический и руброталамический тракты путём воздействия на VIM, являющееся основной законной мишенью абляции при ФУЗ. Учитывая структурную и функциональную связь VIM и других ядер таламуса с ядрами мозжечка, разрушение этих структур, вероятно, и обуславливает нарушение контроля баланса [19, 20]. Кроме того, высказано предположение, что поражения, распространяемые вниз по направлению к дентато-таламическим путям (как в описываемом клиническом случае), также могут способствовать дисбалансу ходьбы и нарушению равновесия у пациентов [21], в связи с чем требуется проведение дальнейших исследований для изучения механизмов формирования нарушений равновесия и походки при ФУЗ.

Представленный случай позволяет не только подтвердить возникновение нарушений равновесия после перенесённого вмешательства, но и определить ключевые механизмы (увеличение опоры на зрение при поддержании равновесия и уменьшение опорной нагрузки при поддержании равновесия на конечности, ипсилатеральные очаги деструкции), лежащие в их основе. Нами описаны также изменения ходьбы, возникшие после операции, которые позволяют сделать вывод, что у пациента отмечалось перераспределение в поддержании равновесия и уменьшение уверенности в левой ноге, что выражалось укорочением времени переноса и ширины шага правой ногой после проведённого лечения. Как показывают метаанализы, у пациентов также достаточно часто наблюдается нарушение походки после операции с применением ФУЗ, которое может быть связано с использованием модифицированных координат нацеливания [22]. Однако сторонность данных нарушений и их структура требуют дальнейшего уточнения и изучения на релевантной выборке пациентов. В продемонстрированном нами клиническом случае у пациента с левосторонним деструктивным вмешательством ухудшение динамического равновесия и снижение опорной нагрузки наблюдалось с той же стороны (в левой ноге), что может исключать повреждение каких-либо проводящих путей, но свидетельствовать о возможном

воздействии ФУЗ на вестибулярный анализатор. В целом исследования на крупных выборках пациентов говорят о том, что в большинстве случаев нарушения равновесия, которые наблюдаются у пациентов после перенесённых деструктивных вмешательств с применением ФУЗ, являются обратимыми и, как правило, регрессируют уже спустя 3 месяца [9]. В представленном клиническом случае через 6 месяцев после процедуры ФУЗ пациент субъективно отметил регресс нарушений равновесия и походки.

Таким образом, перспективным является изучение не только клинических, но также стабилметрических и биомеханических показателей равновесия и походки у данной категории пациентов как до и после оперативного вмешательства, так и в отдалённом периоде (спустя 3 и 6 месяцев). Всё это позволит в дальнейшем разработать персонализированные программы профилактики падений, коррекции нарушений равновесия и походки для данной категории пациентов, число которых, с учётом развития метода ФУЗ, будет неуклонно расти. Это обеспечит безопасность пациентов в послеоперационном периоде, а также поможет разработать стратегии профилактики, сопровождения и реабилитации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

МР-направленный фокусированный ультразвук является высокоэффективным методом воздействия на структуры головного мозга. Возможно формирование нарушений равновесия при наличии высокоэнергетического воздействия на каудолатеральную границу VIM (по нижнелатеральной границе таламуса) с одновременным распространением в заднюю субталамическую зону (каудальная *zona incerta*).

Приведённые данные наглядно демонстрируют, с одной стороны, безусловную эффективность метода ФУЗ при эссенциальном треморе, с другой — возможность развития побочных явлений в виде нарушений статического и динамического равновесия, которые, несмотря на регресс основного клинического проявления заболевания, могут приводить к увеличению риска падения.

Полученные по данным клинических шкал стабилметрические изменения при отсутствии яркой симптоматики позволяют сделать вывод о необходимости применения более точных инструментальных методов диагностики при оценке функции равновесия у пациентов, проходящих лечение с использованием ФУЗ. Дальнейшие исследования не только позволят определить факторы, приводящие к нарушению равновесия, но и помогут разработать необходимые программы профилактики падений через компенсаторные стратегии, тренировки для уменьшения нарушений походки и равновесия у данной категории пациентов, что в свою очередь приведёт к улучшению качества оказания медицинской помощи и обеспечит преемственность между нейрохирургическими и реабилитационными направлениями медицины.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Вклад авторов. А.С. Симонян, Е.С. Иконникова — дизайн, концепция и проведение исследования, написание и редактирование рукописи; А.Е. Слотина, Д.А. Колесников, А.Ю. Тропынина, А.С. Филатов — проведение исследования, написание и редактирование рукописи; А.О. Гуща, Н.А. Супонева — руководство исследованием, редактирование рукописи. Все авторы одобрили рукопись (версию для публикации), а также согласились нести ответственность за все аспекты работы, гарантируя надлежащее рассмотрение и решение вопросов, связанных с точностью и добросовестностью любой её части.

Согласие на публикацию. Авторы получили письменное информированное добровольное согласие пациента на публикацию персональных данных, в том числе фотографий (с закрытием лица), в научном журнале, включая его электронную версию (дата подписания 27.01.2025). Объём публикуемых данных с пациентом согласован.

Источники финансирования. Исследование финансируется из бюджета ФГБНУ «Российский центр неврологии и нейронаук», Москва, Россия.

Раскрытие интересов. Авторы заявляют об отсутствии отношений, деятельности и интересов за последние три года, связанных с третьими лицами (коммерческими и некоммерческими), интересы которых могут быть затронуты содержанием статьи.

Оригинальность. При проведении исследования и создании настоящей работы авторы не использовали ранее опубликованные сведения (текст, иллюстрации, данные).

Доступ к данным. Авторы предоставляют полный открытый (неограниченный) доступ к данным, размещённым на внешнем ресурсе (репозитории).

Генеративный искусственный интеллект. При создании настоящей статьи технологии генеративного искусственного интеллекта не использовали.

Рассмотрение и рецензирование. Настоящая работа подана в журнал в инициативном порядке и рассмотрена по обычной процедуре.

ADDITIONAL INFORMATION

Author contributions: A.S. Simonyan, E.S. Ikonnikova, research design, concept, conducting research, writing and editing of the manuscript; A.E. Slotina, D.A. Kolesnikov, A.Y. Tropynina, A.S. Filatov, conducting research, writing and editing of the manuscript; A.O. Gushcha, N.A. Suponeva, research management, editing of the manuscript. Thereby, all authors provided approval of the version to be published and agree to be accountable for all aspects of the work in ensuring that questions related to the accuracy or integrity of any part of the work are appropriately investigated and resolved.

Consent for publication: The authors received written informed voluntary consent from the patient to publish personal data, including photographs (with the face covered), in a scientific journal, including its electronic version (signed on 2025 Jan 27). The volume of published data was agreed upon with the patient.

Funding source: The study was funded by Russian Center of Neurology and Neurosciences, Moscow, Russia.

Disclosure of interests: The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

Statement of originality: The authors did not utilize previously published information (text, illustrations, data) in conducting the research and creating this paper.

Data availability statement: The authors provide full open (unlimited) access to the data hosted on an external resource (repository).

Generative AI: Generative AI technologies were not used for this article creation.

Provenance and peer-review: This paper was submitted to the journal on an initiative basis and reviewed according to the usual procedure.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ | REFERENCES

1. Chua MM, LeBlang S, Powlovich L, et al. Brain targeting for focused ultrasound essential tremor ablation: proceedings from the 2023 Focused Ultrasound Foundation workshop. *Neurosurg Focus*. 2024;57(3):E3. doi: 10.3171/2024.6.FOCUS2494 EDN: IQBGB
2. Kyle K, Peters J, Jonker B, et al. Magnetic resonance-guided focused ultrasound for treatment of essential tremor: ventral intermediate nucleus ablation alone or additional posterior subthalamic area lesioning? *Mov Disord Clin Pract*. 2024;11(5):504–514. doi: 10.1002/mdc3.14005
3. Gallay MN, Moser D, Rossi F, et al. MRgFUS pallidothalamic tractotomy for chronic therapy-resistant Parkinson's disease in 51 consecutive patients: single center experience. *Front Surg*. 2020;6:76. doi: 10.3389/fsurg.2019.00076 EDN: WRMHUT
4. Elias WJ, Lipsman N, Ondo WG, et al. A randomized trial of focused ultrasound thalamotomy for essential tremor. *N Engl J Med*. 2016;375(8):730–739. doi: 10.1056/NEJMoa1600159
5. Balduino de Souza AL, Mendes TP, Rocha dos Santos MA, et al. Safety of focused ultrasound ablation in Parkinson's disease: a meta-analysis of randomized controlled trials. *J Clin Neurosci*. 2025;135:111159. doi: 10.1016/j.jocn.2025.111159 EDN: AJKGMS
6. Silva N, Green M, Roque D, Krishna V. The use of focused ultrasound ablation for movement disorders. *Magn Reson Imaging Clin N Am*. 2024;32(4):651–659. doi: 10.1016/j.mric.2024.04.003 EDN: NYXKST
7. Kaplitt MG, Krishna V, Eisenberg HM, et al. Safety and efficacy of staged, bilateral focused ultrasound thalamotomy in essential tremor: an open-label clinical trial. *JAMA Neurol*. 2024;81(9):939–946. doi: 10.1001/jamaneurol.2024.2295 EDN: IEFGXO
8. Deuschl G, Antonini A, Costa J, et al. European Academy of Neurology/Movement Disorder Society: European Section guideline on the treatment of Parkinson's disease: I. Invasive therapies. *Eur J Neurol*. 2022;29(9):2580–2595. doi: 10.1111/ene.15386 EDN: IFHECF
9. Jha R, Wadhwa A, Chua MM, et al. Tremor severity and operative parameters predict imbalance in patients undergoing focused ultrasound thalamotomy. *Mov Disord Clin Pract*. 2024;11(12):1542–1549. doi: 10.1002/mdc3.14237 EDN: NJCUJN
10. Skolka MP, Neth BJ, Brown A, et al. Improving neurology inpatient fall rate: effect of a collaborative interdisciplinary quality improvement initiative. *Mayo Clin Proc Innov Qual Outcomes*. 2023;7(4):267–275. doi: 10.1016/j.mayocpiqo.2023.05.004 EDN: HHYELD
11. Park SH. Tools for assessing fall risk in the elderly: a systematic review and meta-analysis. *Aging Clin Exp Res*. 2018;30(1):1–16. doi: 10.1007/s40520-017-0749-0 EDN: GDWJRB
12. Ferreira RN, Ribeiro NF, Santos CP. Fall risk assessment using wearable sensors: a narrative review. *Sensors (Basel)*. 2022;22(3):984. doi: 10.3390/s22030984 EDN: TCPDXD
13. Slotina AE, Ikonnikova ES, Kotsoev GA, et al. Strategies for maintaining balance in patients with Parkinson's disease. *Annals of clinical and experimental neurology*. 2025;19(2):5–15. doi: 10.17816/ACEN.1292 EDN: DEYLLG
14. Di Biase L, Di Santo A, Caminiti ML, et al. Gait analysis in Parkinson's disease: an overview of the most accurate markers for diagnosis and symptoms monitoring. *Sensors (Basel)*. 2020;20(12):3529. doi: 10.3390/s20123529 EDN: YHKQBD
15. Berg K, Wood-Dauphine S, Williams JL, Gayton D. Measuring balance in the elderly: preliminary development of an instrument. *Physiotherapy Canada*. 1989;41:304–311. doi: 10.3138/ptc.41.6.304
16. Gryaznev RA, Shipilova NN, Dzharfarov VM, et al. A prospective study of MRI-guided focused ultrasound thalamotomy in essential tremor. *S.S. Korsakov journal of neurology and psychiatry*. 2025;125(9):79–89. doi: 10.17116/jnevro202512509179 EDN: WBXZZU

17. Arkadir D, Louis ED. The balance and gait disorder of essential tremor: what does this mean for patients? *Ther Adv Neurol Disord*. 2013;6(4):229–236. doi: 10.1177/1756285612471415

18. Louis ED, Faust PL. Essential tremor: the most common form of cerebellar degeneration? *Cerebellum Ataxias*. 2020;7(1):12. doi: 10.1186/s40673-020-00121-1 EDN: ZRWZDT

19. Bertino S, Basile GA, Bramanti A, et al. Ventral intermediate nucleus structural connectivity-derived segmentation: anatomical reliability and variability. *Neuroimage*. 2021;243:118519. doi: 10.1016/j.neuroimage.2021.118519 EDN: YCZZAO

20. Su JH, Choi EY, Tourdias T, et al. Improved VIM targeting for focused ultrasound ablation treatment of essential tremor: a probabilistic and patient-specific approach. *Hum Brain Mapp*. 2020;41(17):4769–4788. doi: 10.1002/hbm.25157 EDN: GAYCYM

21. Petersen KJ, Reid JA, Chakravorti S, et al. Structural and functional connectivity of the nondecussating dentato-rubro-thalamic tract. *Neuroimage*. 2018;176:364–371. doi: 10.1016/j.neuroimage.2018.04.074

22. Kondapavulur S, Silva AB, Molinaro AM, Wang DD. A systematic review comparing focused ultrasound surgery with radiosurgery for essential tremor. *Neurosurgery*. 2023;93(3):524–538. doi: 10.1227/neu.0000000000002462 EDN: TBKYQD

ОБ АВТОРАХ

* Симонян Армен Самвелович;

адрес: Россия, 125367, Москва, Волоколамское ш., д. 80;

ORCID: 0000-0001-8848-801X;

eLibrary SPIN: 9365-7622;

e-mail: simonyan@neurology.ru

Иконникова Екатерина Сергеевна;

ORCID: 0000-0001-6836-4386;

eLibrary SPIN: 8869-6778;

e-mail: ikonnikovaes@list.ru

Слотина Анастасия Евгеньевна, канд. мед. наук;

ORCID: 0000-0003-1395-6645;

eLibrary SPIN: 4824-1240;

e-mail: nastushkapal@gmail.com

Колесников Даниил Алексеевич;

ORCID: 0000-0002-1550-2041;

eLibrary SPIN: 5600-8856;

e-mail: kolesnikovda@student.bmstu.ru

Тропынина Анастасия Юрьевна;

ORCID: 0000-0001-5607-8745;

eLibrary SPIN: 5433-3081;

e-mail: a.tropynina@g.nsu.ru

Филатов Алексей Сергеевич, канд. мед. наук;

ORCID: 0000-0002-5706-6997;

eLibrary SPIN: 5196-5880;

e-mail: filatov@neurology.ru

Гуща Артем Олегович, д-р мед. наук, профессор РАН;

ORCID: 0000-0003-3451-5750;

eLibrary SPIN: 6658-4179;

e-mail: agou@endospine.ru

Супонева Наталья Александровна, д-р мед. наук,

чл.-корр. РАН;

ORCID: 0000-0003-3956-6362;

eLibrary SPIN: 3223-6006;

e-mail: nasu2709@mail.ru

AUTHORS' INFO

* Armen S. Simonyan, MD;

address: 80 Volokolamskoe hwy, Moscow, Russia, 125367;

ORCID: 0000-0001-8848-801X;

eLibrary SPIN: 9365-7622;

e-mail: simonyan@neurology.ru

Ekaterina S. Ikonnikova, MD;

ORCID: 0000-0001-6836-4386;

eLibrary SPIN: 8869-6778;

e-mail: ikonnikovaes@list.ru

Anastasiya E. Slotina, MD, Cand. Sci. (Medicine);

ORCID: 0000-0003-1395-6645;

eLibrary SPIN: 4824-1240;

e-mail: nastushkapal@gmail.com

Daniil A. Kolesnikov;

ORCID: 0000-0002-1550-2041;

eLibrary SPIN: 5600-8856;

e-mail: kolesnikovda@student.bmstu.ru

Anastasiya Yu. Tropynina;

ORCID: 0000-0001-5607-8745;

eLibrary SPIN: 5433-3081;

e-mail: a.tropynina@g.nsu.ru

Alexey S. Filatov, MD, Cand. Sci. (Medicine);

ORCID: 0000-0002-5706-6997;

eLibrary SPIN: 5196-5880;

e-mail: filatov@neurology.ru

Artem O. Gushcha, MD, Dr. Sci. (Medicine), Professor of the Russian

Academy of Sciences;

ORCID: 0000-0003-3451-5750;

eLibrary SPIN: 6658-4179;

e-mail: agou@endospine.ru

Natalia A. Suponeva, MD, Dr. Sci. (Medicine), Corresponding

member of the Russian Academy of Sciences;

ORCID: 0000-0003-3956-6362;

eLibrary SPIN: 3223-6006;

e-mail: nasu2709@mail.ru

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author