



ПОВЕРХНОСТНАЯ ЭЛЕКТРОМИОГРАФИЯ В ОЦЕНКЕ ТЯЖЕСТИ ДВИГАТЕЛЬНЫХ НАРУШЕНИЙ У ПАЦИЕНТОВ С БОЛЕЗНЬЮ ПАРКИНСОНА

Н.Д. КОЗУЛИН*, А.А. МИГУЛИНА*, Д.А. МОКРУШИН*, Г.А. СОГОЯН**, А.Ф. АРТЕМЕНКО*,
А.Р. БИКТИМИРОВ*

* ФГАОУ ВО «Дальневосточный федеральный университет»,
п. Аякс, д.10, о. Русский, г. Владивосток, 690922, Россия

**Центр нейробиологии и реабилитации мозга им. Владимира Зельмана, Сколковский институт науки и технологий, Большой Бульвар, д. 30с1, г. Москва, 121205, Россия

Аннотация. Болезнь Паркинсона – распространенное нейродегенеративное заболевание, основными симптомами которого являются тремор покоя, ригидность, брадикинезия и постуральная неустойчивость. Оценка тяжести моторных симптомов проводится по шкале *MDS-UPDRS* III, основанной на субъективной оценке врача-невролога, что вызывает трудности в интерпретации результатов. Один из вариантов решения данной проблемы – привлечение к диагностике таких инструментальных методов, как *поверхностная электромиография (sEMG)*. **Цель исследования** – поиск специфических миографических паттернов, позволяющих оценить степень тяжести симптомов болезни Паркинсона. **Материалы и методы исследования.** В настоящем исследовании приняло участие 8 пациентов с болезнью Паркинсона, тяжесть состояния которых по Хену и Яру составляет 2–3 стадии. Производилась запись *sEMG* во время выполнения испытуемыми тестов 3.4 «постукивание пальцами» и 3.5 «кистевые движения» шкалы *MDS-UPDRS*. Тесты выполнялись дважды до и после принятия препарата леводопа для выявления паттернов, свидетельствующих об изменении моторных функций. **Результаты и их обсуждение.** При выполнении тестов наблюдалась пиковая активность сигнала *sEMG*, которая отражала моменты активации отдельных групп мышц, вовлеченных в реализацию движения. Для характеристики пиковой активности использовалось общее количество максимальных экстремумов *sEMG* сигнала, а также расстояние между ними. В тестах «постукивание пальцами» и «кистевые движения» было выявлено повышение пиковой активности после принятия *L-DOPA*, что свидетельствовало о снижении брадикинезии. Данные метрики частично коррелируют с изменениями оценок клиницистов, а также увеличивают схожесть предсказания моделью оценки *UPDRS* с оценками врачей. **Заключение.** Полученные результаты показывают эффективность использования *sEMG* и таких метрик, как количество пиков, соответствующих моментам активации мышц, и средний временной интервал между найденными пиками для оценки брадикинезии.

Ключевые слова: Болезнь Паркинсона, электромиография, брадикинезия, *L-DOPA*, *UPDRS*

SURFACE ELECTROMYOGRAPHY AT EVALUATION OF MOVEMENT DISORDERS SERIOUSNESS IN PATIENTS WITH PARKINSON'S DISEASE

N.D. KOZULIN*, A.A. MIGULINA*, D.A. MOKRUSHIN*, G.A. SOGOYAN**, A.F. ARTEMENKO*,
A.R. BIKTIMIROV*

* Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education “Far East Federal University”,
10 Ayax vil., Russkiy isl., Vladivostok, 690922, Russia

**Vladimir Zelman's Center for Neurobiology and Brain Rehabilitation, Skolkovo Institute for Science and Technologies, 30-1 Bolshoy Bulvar, Moscow, 121205, Russia

Abstract. Parkinson's disease is a widespread neurodegenerative disease whose main symptoms include resting tremor, rigidity, bradykinesia and postural instability. The severity of motor symptoms is assessed by *MDS-UPDRS* III scale based on the subjective evaluation by the neurologist, which causes difficulties in the results interpretation. One of the possible solutions is to use instrumental methods, such as *surface electromyography*, for diagnostics (*sEMG*). **Purpose of the research** was to find the specific myographical patterns allowing to evaluate the severity degree of Parkinson's disease symptoms. **Materials and methods of the research.** The study involved 8 patients with Parkinson's disease at 2nd-3rd stages according to the Hoehn-Yahr scale. While the subjects were performing 3.5 “finger knocking” and 3.5 “hand movements” *MDS-UPDRS* scale tests, *sEMG* was being recorded. The tests were performed twice: before and after taking levodopa medicine to reveal the patterns indicating the change in the motor functions. **Results and their discussion.** While performing the tests, a peak activity of *sEMG* signal was noticed, which reflected the activation moments of certain muscle groups involved in movements. To describe the peak activity, the total number of the highest *sEMG* signal extremums and

the distances between them were used. The “finger knocking” and “hand movement tests” revealed the increase of peak activity after taking *L-DOPA* medicine, which indicated a bradykinesia. These metrics are partly correlated with the changes of clinicians’ evaluation as well as increase the similarity between the prognosis using *UPDRS* evaluation model and doctors’ evaluation. **Conclusion.** The obtained results reveal the effectiveness of using *sEMG* as well as metrics, such as quantity of peaks, corresponding the moments of muscle activation and the average time interval between the found peaks to assess the bradykinesia.

Key words: Parkinson’s disease, electromyography, bradykinesia, *L-DOPA*, *UPDRS*

Введение.

Болезнь Паркинсона (БП) – одно из наиболее распространенных нейродегенеративных заболеваний, преимущественно обнаруживающееся у пожилых людей [13]. Основными симптомами БП являются такие двигательные нарушения, как ригидность, тремор покоя, брадикинезия и постуральная неустойчивость [10]. На сегодняшний день лекарства, останавливающего дегенерацию нейронов при БП, не существует. Все методы лечения направлены только на облегчение симптомов заболевания. Для улучшения качества жизни пациентов необходима своевременная и точная диагностика БП, позволяющая подобрать оптимальный способ лечения.

Тяжесть симптомов БП принято оценивать по *унифицированной шкале оценки болезни Паркинсона Международного общества расстройств движений (MDS-UPDRS)*, однако существуют проблемы с интерпретируемостью данной метрики. В частности, третья часть *MDS-UPDRS*, посвящённая исследованию двигательных функций пациента, полностью основана на субъективной оценке врача-клинициста. Вследствие вариабельности между наблюдателями и невозможности оценить некоторые параметры движения невооруженным глазом возникают неточности в диагностике [5, 7, 17]. Поэтому для повышения объективности оценок необходимо привлечение дополнительных методик.

В качестве дополнительного диагностического критерия может использоваться *поверхностная электромиография (sEMG)*. Эффективность вычисляемых метрик для интерпретации данного метода регистрации физиологической активности в обнаружении у пациентов с БП тремора покоя и постурального тремора была отмечена ранее [18, 19]. Существует большое количество метрик, которые могут характеризовать сигнал во временной, частотной и частотно-временной областях. Используются различные наборы характеристик, на которых могут обучаться классификаторы. К таковым можно отнести, к примеру, набор Дью [3] или набор Хаджинса [9].

Несмотря на большое количество различных метрик, до сих пор нет единого мнения по поводу использования той или иной характеристики. Из-за своих особенностей *sEMG* редко используют в оценке активной моторики рук. На наш взгляд, литературы, подтверждающей эффективность *sEMG* в оценке тестов *UPDRS*, связанных с активными кистевыми движениями, довольно мало, так как большее внимание уделяется обнаружению тремора.

В данном исследовании мы измеряем и анализируем сигналы *sEMG*, записанные во время выполнения пациентами тестов 3.4 (постукивание пальцами) и 3.5 (кистевые движения) шкалы *MDS-UPDRS III* до и после принятия *леводопы (L-DOPA)*.

Цель исследования – поиск специфических миографических паттернов, позволяющих оценить степень двигательных нарушений.

Материалы и методы исследования. Сбор данных проводился на базе Реабилитационного центра ДВФУ. В обсервационном, проспективном и не рандомизированном исследовании приняли участие 8 пациентов с установленным диагнозом БП. Пол, возраст и особенности течения заболевания описаны в табл. 1. Вследствие технических проблем данные двоих пациентов были исключены из анализа. Пациенты проходили процедуру оценки моторных нарушений по *MDS-UPDRS III* до приема *L-DOPA* (*OFF* состояние) и после (*ON* состояние). Оценки выставлялись врачом неврологом-паркинсологом (специалистом в области лечения экстрапирамидной патологии).

Каждый участник исследования предоставил добровольное письменное информированное согласие, подписанное им после разъяснения ему потенциальных рисков и преимуществ, а также характера предстоящего исследования. Протокол исследования одобрен Комитетом по биомедицинской этике Школы биомедицины и проводился в соответствии с Хельсинкской декларацией.

Демографические и клинические характеристики

Возраст (в годах)	64,2 ± 7,8
Ежедневная доза <i>L-DOPA</i> (в мг)	583,3 ± 292,3
Стадия по Хену и Яру (в стадиях)	2,6 ± 0,4
Время с постановки диагноза (в годах)	11 ± 7,4
<i>MDS-UPDRS III OFF</i> (в баллах)	38,5 ± 16,6
<i>MDS-UPDRS III ON</i> (в баллах)	25 ± 13,8

Тестирование пациентов осуществлялось дважды в один день в *ON* и *OFF* состоянии. Для достижения гарантированного *OFF* состояния, при котором моторная функция пациента будет типичной при отсутствии *L-DOPA*, испытуемые не принимали лекарства 12 и более часов [2], после чего происходила регистрация *sEMG* при выполнении тестов *MDS-UPDRS III* «постукивание пальцами» и «кистевые движения». Далее пациенты принимали дозу лекарства, превышающую стандартную разовую дозу в 1,5 раза. К моменту полного включения (через 30–60 мин после приема препарата) выполнялась повторная регистрация в *ON* состоянии с соблюдением всех условий, описанных выше. Параллельно с регистрацией пациента происходило классическое заполнение шкал тестов *MDS-UPDRS*. Процедура сопровождалась видеофиксацией.

Во время регистрации пациент садился на стул напротив оператора на расстоянии нескольких метров. Перед началом каждого теста оператор давал подробную инструкцию и демонстрировал правильное выполнение. Тест начинался и заканчивался по устной команде оператора и длился 23 секунды.

В тесте «постукивание пальцами» от пациента требовалось постукивать указательным пальцем по большому как можно быстрее и с максимально возможной амплитудой движения. Для выполнения теста «кистевые движения» пациенту давалась инструкция сжимать кисть в кулак и разжимать максимально быстро и полно. При этом предплечье испытуемого должно было быть согнуто таким образом, чтобы ладонь была обращена к оператору.

Данные *sEMG* были записаны с помощью системы *Delsys Trigno Wireless Biofeedback System*, оснащенной беспроводными датчиками. Размер корпуса датчика составляет 27x37x13 мм, есть два регистрирующих электрода, расстояние между электродами 10 мм. Полученные данные были записаны с частотой дискретизации 1260 Гц и полосой пропускания 20–450 Гц. Датчики размещались на предплечье, на группах мышц сгибателей (*Flexors*) и разгибателей (*Extensors*) пальцев. Локализация соответствующих мышц определялась пальпацией предплечья во время кистевых движений, положение датчиков *sEMG* показано на Рис. 1. Процедура постановки датчиков была проведена в соответствии с рекомендациями *SENIAM*: участки кожи испытуемых были предварительно очищены от волосяного покрова с помощью одноразовой медицинской бритвы и обезжирены изопропиловым спиртом за минуту до постановки [8].



Рис. 1. Расположение датчиков. (А) Группа мышц сгибателей. (В) Группа мышц разгибателей

Полученные данные поверхностной миографии были обработаны и проанализированы с использованием языка *Python* и библиотеки «*ruemgpipeline*» [20]. Предварительная обработка сигналов начиналась с удаления смещения базовой линии из-за действия постоянного тока и последующей полосовой фильтрации Баттерворта 8-го порядка с полосой пропускания 10–100 Гц. Для удаления возможных арте-

фактов инициации и окончания движения испытуемых каждый сигнал был обрезан по 2 секунды с начала и конца. Затем проводилось выпрямление и построение линейной огибающей, по которой вычислялись показатели.

Для анализа полученных сигналов были разработаны следующие метрики:

- количество пиков (максимумов), соответствующие моментам активации мышц (*peaks*);
- медианная амплитуда, характеризующая мощность сокращений (*median amplitude*);
- средний временной интервал между найденными пиками (*durations*).

Для того, чтобы каждый рассматриваемый пик в сигнале был самостоятельным и соответствовал конкретному моменту активации мышц, определялась его вершина. Вычисление производилось на основе расстояния по вертикали между высшей точкой и точкой, являющейся нижней контурной линией, что позволяло выделять пик из сигнала. В качестве нормализации в каждом сигнале *sEMG* рассчитывалось минимальное расстояние вершины, которое служило порогом для определения остальных. Алгоритм нахождения пиков представлен на рис. 2.

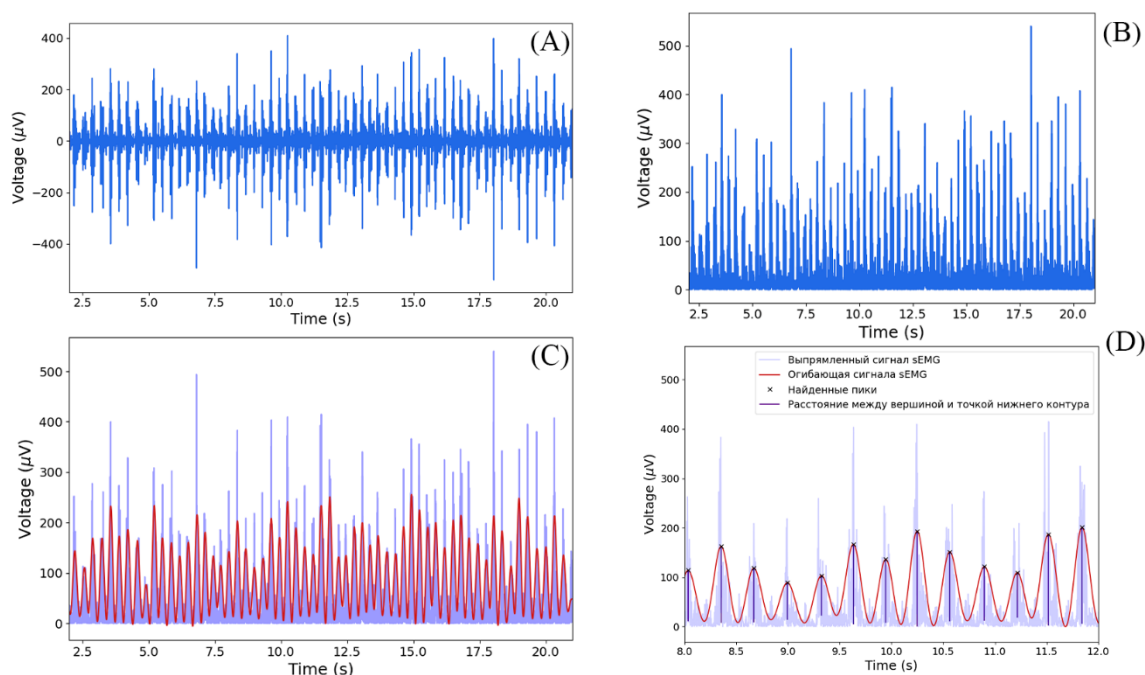


Рис. 2. Нахождение пиков. (А) Обработанный сигнал *sEMG*. (В) Выпрямленный сигнал *sEMG*. (С) Огибающая сигнала. (D) Нахождение вершин по расстоянию между высшей точкой пика и точкой нижней контурной линии

В полученных значениях вершин пиков находилась медиана, которая характеризовала медианную мощность сокращений мышц на протяжении всего теста. Расстояние между найденными пиками по оси *X* характеризовало интервал между каждым периодом активации мышц.

В предыдущих работах количественные характеристики сигнала *sEMG* использовались для предсказания оценки врача-невролога в моторных тестах [11]. Авторы объединили несколько существующих наборов метрик и использовали их для обучения модели, предсказывающей оценку клиницистов в тесте «постукивание пальцев».

Мы решили воспроизвести описанный метод на тестах «постукивание пальцами» и «кистевые движения», чтобы оценить, насколько предложенная архитектура эффективна для нашего набора данных. Далее мы интегрировали в процесс обучения дополнительные метрики - две модификации среднего абсолютного значения (*MAV1* и *MAV2*), приблизительную энтропию (*ApEn*) и энтропию образца (*SamrEn*) из [19], а также разработанные нами характеристики количества пиков и среднего временного интервала между ними. Для обучения использовали данные, собранные с мышц более пораженной руки, опираясь на оценки клиницистов.

Извлечение характеристик *sEMG* проводилась во временной области с использованием библиотек «*NeuroKit2*» [14] и «*PySioligy*» [4]. Обработанный сигнал сегментировался на 1 секундные фрагменты с перекрытием в 500 миллисекунд с использованием окна Хеннинга. Из каждого окна определялись характеристики, которые затем усреднялись для каждого канала *sEMG*.

В соответствии с оригинальным исследованием [11] в качестве алгоритма была использована модель случайного леса. Алгоритм реализации пакета «*Scikit-learn*» обучался на наборах характеристик, взятых из сигналов *sEMG* в состоянии *L-DOPA OFF*, а тестировался на данных сигналов в состоянии *L-DOPA ON*. Перед подачей характеристик на вход модели производилась стандартизация. Предсказанные значения *MDS-UPDRS III* были прокоррелированы с реальными оценками экспертов.

Статистическая обработка полученных характеристик сигнала *sEMG* проводилась с использованием пакета *MS Excel 2019*. Среди инструментов анализа был выбран парный *T*-тест для зависимых выборок. Сопоставление данных, полученных с датчика *sEMG* каждой руки и каждой групп мышц, производилась отдельно. Во всех данных значение с поправкой Бонферрони $p < 0,0125$ являлось статистически значимым.

Парный *T*-тест для зависимых выборок использовался для определения существенной разницы между показателями в *OFF* и *ON*. Также проводился корреляционный анализ Спирмена для изменения баллов *MDS-UPDRS III* и количества пиков в *OFF* и *ON*.

Результаты и их обсуждение. Результаты теста «постукивание пальцами» приведены в Табл. 2. Наблюдается увеличение количества пиков, что свидетельствует о повышении скорости движения после принятия *L-DOPA*.

Изменение медианной амплитуды до и после принятия *L-DOPA* на *Flexors* и *Extensors* не достигло уровня статистической значимости на обеих руках.

Таблица 2

Результаты теста «постукивания пальцами»

Показатель		L-DOPA OFF	L-DOPA ON	Достигнутый уровень значимости (<i>p</i>)
Левая рука <i>Flexors</i>	<i>peaks</i>	36,3±13,9	48,7±12,5	0,0046
	<i>durations</i>	0,57±0,2	0,4±0,1	0,036
Левая рука <i>Extensors</i>	<i>peaks</i>	37,0±13,7	48,5±12,4	0,0073
	<i>durations</i>	0,58±0,3	0,4±0,1	0,054
Правая рука <i>Flexors</i>	<i>peaks</i>	44,7±14,0	52,7±12,3	0,0005
	<i>durations</i>	0,48±0,3	0,37±0,1	0,12
Правая рука <i>Extensors</i>	<i>peaks</i>	44,2±13,2	52,2±12,0	0,0005
	<i>durations</i>	0,47±0,2	0,38±0,1	0,097

Результаты теста «кистевые движения» приведены на табл. 3. Также наблюдается увеличение количества пиков, что свидетельствует о повышении скорости движения после принятия *L-DOPA*.

Изменение медианной амплитуды до и после принятия *L-DOPA* на обеих группах мышц предплечья так же, как и в тесте «постукивание пальцами» не достигло статистической значимости на левой и правой руках.

Таблица 3

Результаты теста «кистевые движения»

Показатель		L-DOPA OFF	L-DOPA ON	Достигнутый уровень значимости (<i>p</i>)
Левая рука <i>Flexors</i>	<i>peaks</i>	27,17±10,0	34,7±8,9	0,008
	<i>durations</i>	0,8±0,4	0,57±0,2	0,11
Левая рука <i>Extensors</i>	<i>peaks</i>	28,5±9,6	35,5±9,1	0,018
	<i>durations</i>	0,76±0,4	0,56±0,2	0,13
Правая рука <i>Flexors</i>	<i>peaks</i>	25,83±10,8	35,17±10,1	0,0135
	<i>durations</i>	0,75±0,2	0,545±0,2	0,0098
Правая рука <i>Extensors</i>	<i>peaks</i>	26,17±10,2	35,67±10,6	0,19
	<i>durations</i>	0,79±0,3	0,56±0,2	0,036

Стоит отметить, что наблюдалась общая тенденция к снижению расстояния между пиками в сигналах *sEMG*, что может свидетельствовать о снижении влияния брадикинезии после принятия *L-DOPA*. Графическое изображение результатов представлено на рис. 3.

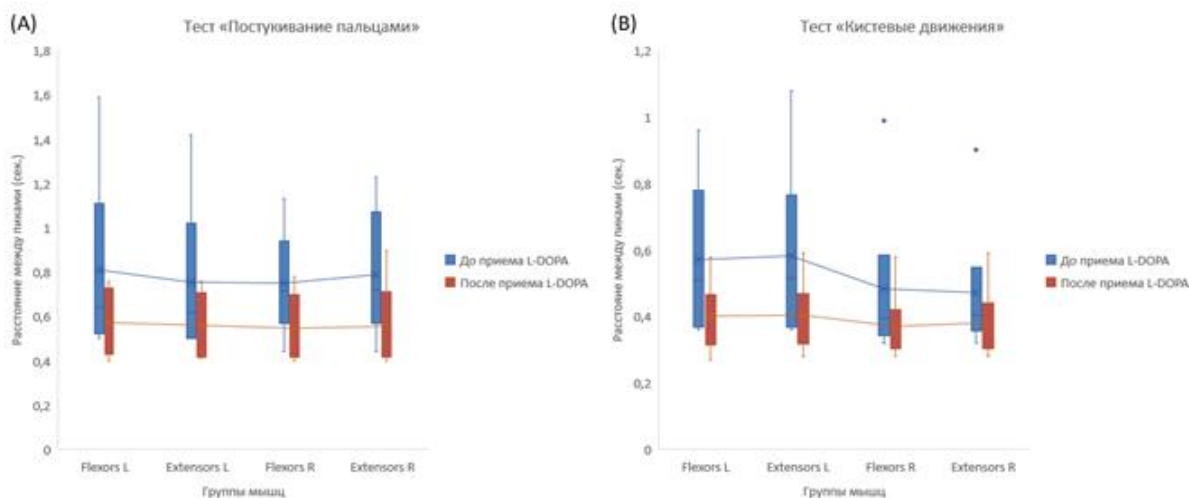


Рис. 3. Диаграмма размаха расстояний между пиками в различных группах мышц. (А) Тест «постукивания пальцами». (В) Тест «кистевые движения»

Также было заметно снижение стандартного отклонения во всех тестах, что может говорить о более частых и ритмичных движениях после принятия *L-DOPA*.

Для исследования взаимосвязи между изменениями оценок *MDS-UPDRS III* и характеристиками *sEMG* были рассчитаны коэффициенты корреляции Спирмена между разницей оценок после и до принятия препарата и разницей числа пиков и расстояния между пиками в *L-DOPA OFF* и *L-DOPA ON*.

В тесте «кистевые движения» наблюдалась отрицательная корреляция между значениями оценки по *MDS-UPDRS III* и числом пиков в *ON* состояниях. В правой руке на *Flexors* и *Extensors* наблюдалась отрицательная корреляция ($Z = -0,928$ $p < 0,05$). Однако, на левой руке на обеих группах мышц корреляции не достигли уровня значимости ($Z = -0,5$ $p > 0,05$ для сгибателей и $Z = -0,43$ $p > 0,05$ для разгибателей). Графики корреляции отображены на рис. 4.

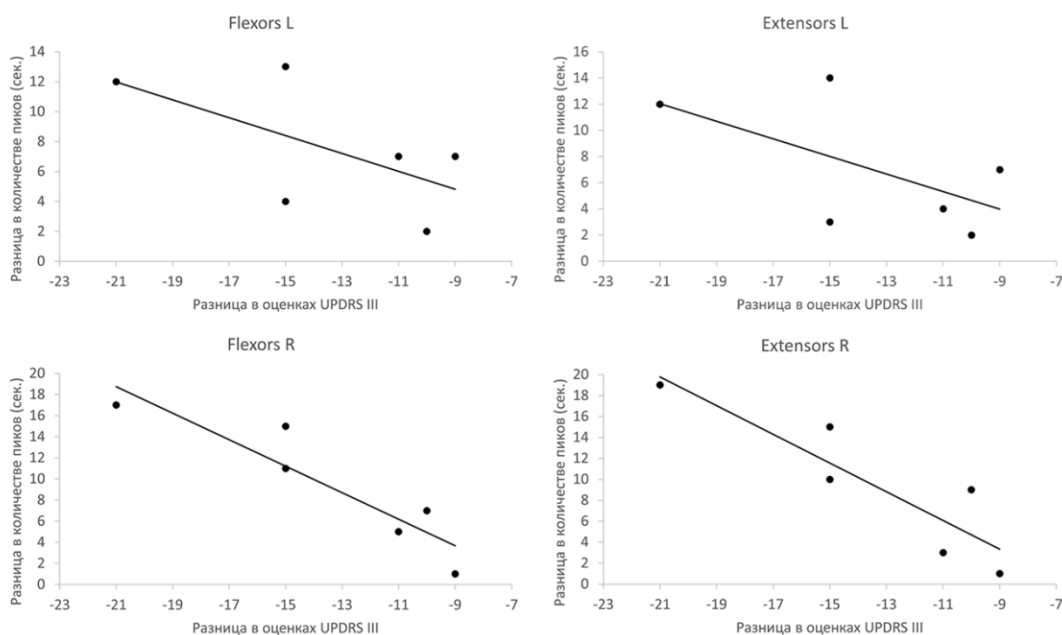


Рис. 4. Графики корреляции для теста «кистевые движения». *Flexors L* - сгибатели левой руки, *Flexors R* - сгибатели правой руки, *Extensors L* - разгибатели левой руки, *Extensors R* - разгибатели правой руки

В тесте «постукивания пальцами» корреляции между изменениями оценок и разницей между количеством пиков не было обнаружено. Корреляции между снижением оценок и снижением расстояния между пиками во всех тестах и руках обнаружено не было.

Согласно графикам, изображенным на рис. 5, наиболее близкая схожесть предсказания оценки UPDRS наблюдалась при попытке разработки модели на основе теста «постукивание пальцами». Корреляция предсказаний не превышала 0.06 даже при использовании расширенного набора характеристик. В то же время модель показала высокую корреляцию с истинными значениями по шкале UPDRS в тесте «кистевые движения». В то же время, при использовании расширенного состава характеристик качество предсказаний возрастает с 0.4 до 0.57.

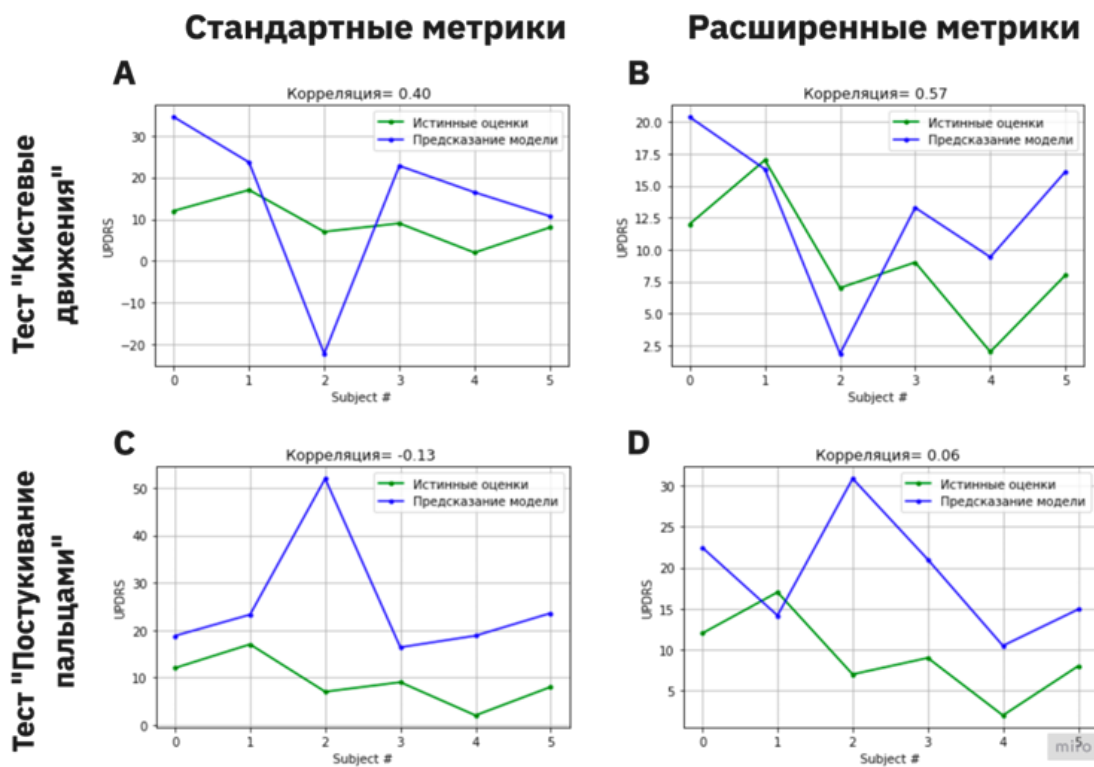


Рис.5. Графики предсказания оценки моделью. А) Обучение на стандартном наборе, тест «Кистевые движения». В) Обучение на расширенном наборе, тест «Кистевые движения». С) Обучение на стандартном наборе, тест «Постукивание пальцами». Д) Обучение на расширенном наборе, тест «Постукивание пальцами»

БП характеризуется такими моторными нарушениями, как гипо- и брадикинезия. Данные нарушения проявляются как генерализованное замедление движений, сопровождающееся снижением их амплитуды. Брадикинезия у пациентов с БП связана с нарушением функции базальных ганглиев, а именно со значительным (около 50–60%) истощением дофамина в полосатом теле. Вследствие этого возникает дисфункция сетей нейронов, затрагивающая базальные ганглии, области коры и мозжечок [1].

В настоящем исследовании мы использовали метод *sEMG* для выявления паттернов, свидетельствующих об изменении моторных функций в тестах «постукивание пальцами» и «кистевые движения» у пациентов с БП в состоянии медикаментозного *L-DOPA OFF* и *ON*. Данные, получаемые с помощью датчиков *sEMG*, могут потенциально обеспечить объективный количественный метод оценки мышечной функции. Применение *sEMG* в клинике позволит определять различия в моторике после хирургических и терапевтических вмешательств, оценивать эффективность реабилитации. Среди достоинств метода – его неинвазивность и мобильность. Последние разработки в области носимых сенсорных технологий позволяют регистрировать данные *sEMG* за пределами лаборатории в естественных условиях во время повседневной деятельности [15].

В исследованиях, посвящённых моторным нарушениям при БП, *sEMG* широко используется для выявления тремора, значительно реже – для оценки брадикинезии [11]. Тем не менее, кроме тремор-доминантного подтипа БП, при котором тремор преобладает над другими моторными нарушениями, существуют также акинетико-ригидный подтип, при котором тремор слабо выражен при явной брадикинезии, и смешанный подтип. Существуют свидетельства преобладания акинетико-ригидной формы у паци-

ентов начиная с середины шестой декады [12]. Поэтому метод объективной количественной оценки должен совмещать оценку тремора и брадикинезии.

Для оценки брадикинезии преимущественно используются инерционные данные [6, 16], однако необходимость размещения инерционных датчиков на пальцах и кисти во время выполнения тестов на активные кистевые движения может создавать дополнительную нагрузку и влиять на результат, тогда как датчики *sEMG* размещаются на предплечье. Поэтому мы решили использовать для оценки брадикинезии *sEMG*.

Нами были разработаны метрики, которые могут дать объективную оценку о тяжести брадикинезии. Было обнаружено увеличение количества пиков (максимумов), свидетельствующее об увеличении количества мышечных активаций, после принятия *L-DOPA*. Также было обнаружено уменьшение интервалов между пиками в *ON* состоянии. Эти параметры свидетельствуют о снижении брадикинезии после принятия *L-DOPA* и потенциально могут служить диагностическим критерием, позволяющим количественно оценить данное моторное нарушение. При подсчете интервалов между мышечными активациями можно оценивать не только среднюю длительность интервала, но и длительность каждого интервала в сравнении с остальными. Это позволит выявлять на сигналах *sEMG* задержки и остановки движения, которые потенциально могут быть непосредственно соотнесены с критериями *UPDRS*.

Корреляции между изменением числа пиков и баллами *UPDRS* в *L-DOPA ON* и *OFF* состояниях, полученные даже на небольшой выборке, свидетельствуют о сопоставимости *UPDRS* и предложенных нами параметров.

Также мы проверили вклад разработанных нами метрик для обучения модели. Нам удалось воспроизвести результаты из статьи [11] на наших данных. Метод показал неплохие результаты, однако лучший результат наблюдался на тесте «кистевые движения», а не на «постукивание пальцами», как ожидалось. Мы это связываем с различными условиями проведения данного теста. У авторов статьи испытуемые стучали указательным пальцем по планшету, расположенному на столе, с фиксированным запястьем, в то время как в нашем исследовании рука испытуемых находилась на весу, что в совокупности с механическими артефактами из-за интенсивных колебаний подкожно-жировой клетчатки вносило дополнительный помехи в сигнал. Тем не менее, мы считаем обоснованным наш подход к проведению теста, т.к. он аналогичен клиническому и позволяет не проводить дополнительных тестирований при клинической оценке по *MDS-UPDRS III*.

Интеграция множества метрик, позволяющих оценить регулярность и ритмичность сигнала *sEMG*, а также разработанных нами показателей, увеличивает эффективность предсказаний в обоих тестах, что может говорить о перспективе добавленных метрик в дальнейшем использовании для обучения различных моделей, автоматизирующих выставление оценки *MDS-UPDRS III*.

Было замечено, что тест «постукивание пальцами» тяжелее оценить с точки зрения интервалов между пиками. Это может объясняться более высокой по сравнению с тестом «кистевые движения» интенсивностью мышечных сокращений, при которой возникают трудности в дифференцировке отдельных сокращений. Также в постукивании пальцами задействуется меньше мышц предплечья, которые залегают более глубоко. Поэтому для использования предложенной нами метрики больше подходит тест «кистевые движения».

В текущем исследовании мы описывали результаты на группе из 6 пациентов, для более детальной оценки предложенных методов на следующем этапе, необходимо расширять выборку участников. Кроме того, важным улучшением может быть привлечение группы контроля из здоровых людей той же возрастной группы. Также оценки моторных нарушений по *MDS-UPDRS III* выполнялись одним неврологом, что вносит некоторую долю субъективности. Для более полного и объективного представления о нарушениях необходимо собрать оценки нескольких опытных неврологов.

Заключение. Таким образом, в данном исследовании наблюдалось снижение брадикинезии при выполнении тестов *MDS-UPDRS III* «постукивание пальцами» и «кистевые движения» после принятия *L-DOPA* у пациентов с БП, характеризующееся увеличением количества пиков и снижением расстояния между пиками в сигнале *sEMG*. Данные метрики частично коррелируют с изменениями оценок клиницистов, а также увеличивают схожесть предсказания моделью оценки *UPDRS* с оценками врачей. Полученные нами результаты свидетельствуют о возможности использования *sEMG* в оценке брадикинезии и о перспективе данного метода в повышении объективности *MDS-UPDRS III*.

Литература

1. Bologna, Matteo, Giulia Paparella, Alfonso Fasano, Mark Hallett, and Alfredo Berardelli. "Evolving Concepts on Bradykinesia." // *Brain: A Journal of Neurology* 2020, №143 (3). P. 727–750.
2. Brown P., Corcos D. M., Rothwell J. C. "Does Parkinsonian Action Tremor Contribute to Muscle Weakness in Parkinson's Disease?" // *Brain: A Journal of Neurology* 1997. №120 . P. 401–408.
3. Du, Yi-Chun, Chia-Hung Lin, Liang-Yu Shyu, Tainsong Chen. "Portable Hand Motion Classifier for

Multi-Channel Surface Electromyography Recognition Using Grey Relational Analysis.” // *Expert Systems with Applications*. 2010. №37 (6). P. 4283–4291.

4. Gabrieli, Giulio, Atiqah Azhari, Gianluca Esposito. “PySiology: A Python Package for Physiological Feature Extraction.” In *Neural Approaches to Dynamics of Signal Exchanges*, edited by Anna Esposito, Marcos Faundez-Zanuy, Francesco Carlo Morabito, and Eros Pasero, 2020. P. 395–402.

5. Guo, Zhilin, Weiqi Zeng, Taidong Yu, Yan Xu, Yang Xiao, Xuebing Cao, Zhiguo Cao. “Vision-Based Finger Tapping Test in Patients With Parkinson’s Disease via Spatial-Temporal 3D Hand Pose Estimation.” // *IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics* 2022. №26 (8): P. 3848–3859. .

6. Hasan, Hasan, Dilan S. Athauda, Thomas Foltynie, Alastair J. Noyce. “Technologies Assessing Limb Bradykinesia in Parkinson’s Disease.” // *Journal of Parkinson’s Disease* 2017. №7 (1): P. 65–77. .

7. Heldman, Dustin A., Joseph P. Giuffrida, Robert Chen, Megan Payne, Filomena Mazzella, Andrew P. Duker, Alok Sahay, Sang Jin Kim, Fredy J. Revilla, Alberto J. Espay. “The Modified Bradykinesia Rating Scale for Parkinson’s Disease: Reliability and Comparison with Kinematic Measures.” *Movement Disorders: Official Journal of the Movement Disorder Society* 2011. №26 (10). P. 1859–1863.

8. Herrmann, Christine M., Michael L. Madigan, Bradley S. Davidson, Kevin P. Granata. “Effect of Lumbar Extensor Fatigue on Paraspinal Muscle Reflexes.” *Journal of Electromyography and Kinesiology: Official Journal of the International Society of Electrophysiological Kinesiology* 2006. №16 (6). P. 637–641. .

9. Hudgins B., P. Parker, R. N. Scott. “A New Strategy for Multifunction Myoelectric Control.” // *IEEE Transactions on Bio-Medical Engineering* 1993. №40 (1). P. 82–94.

10. Jankovic J. “Parkinson’s Disease: Clinical Features and Diagnosis.” // *Journal of Neurology, Neurosurgery, and Psychiatry* 2008. №79 (4). P. 368–376.

11. Kleinheldermann, Urs, Max Wullstein, David Pedrosa. “Prediction of Motor Unified Parkinson’s Disease Rating Scale Scores in Patients with Parkinson’s Disease Using Surface Electromyography.” *Clinical Neurophysiology: Official Journal of the International Federation of Clinical Neurophysiology* 2021. №132 (7): P. 1708–1713.

12. Korchounov, Alexei, Hayo I. Schipper, Irina S. Preobrazhenskaya, Kirn R. Kessler, Nikolay N. Yakhno. “Differences in Age at Onset and Familial Aggregation between Clinical Types of Idiopathic Parkinson’s Disease.” *Movement Disorders: Official Journal of the Movement Disorder Society* 2004. №19 (9) P. 1059–1064.

13. Lau, Lonke M. L. de, and Monique M. B. Breteler. “Epidemiology of Parkinson’s Disease.” // *Lancet Neurology* 2006. №5 (6). P. 525–535.

14. Makowski, Dominique, Tam Pham, Zen J. Lau, Jan C. Brammer, François Lespinasse, Hung Pham, Christopher Schölzel, and S. H. Annabel Chen. “NeuroKit2: A Python Toolbox for Neurophysiological Signal Processing.” // *Behavior Research Methods* 2021. №53 (4). P. 1689–1696.

15. McManus, Lara, Giuseppe De Vito, Madeleine M. Lowery. “Analysis and Biophysics of Surface EMG for Physiotherapists and Kinesiologists: Toward a Common Language With Rehabilitation Engineers.” *Frontiers in Neurology* 11 (October): 2020.

16. Memar, Sara, Mehdi Delrobaei, Marcus Pieterman, Kenneth McIsaac, and Mandar Jog. “Quantification of Whole-Body Bradykinesia in Parkinson’s Disease Participants Using Multiple Inertial Sensors.” // *Journal of the Neurological Sciences* 2018. №387 (April). P. 157–165.

17. Piro, Neltje E., Lennart K. Piro, Jan Kassubek, Ronald A. Blechschmidt-Trapp. “Analysis and Visualization of 3D Motion Data for UPDRS Rating of Patients with Parkinson’s Disease.” // *Sensors* 2016. №16 (6).

18. Sturman, Molly M., David E. Vaillancourt, Leo Verhagen Metman, Roy A. E. Bakay, Daniel M. Corcos. “Effects of Subthalamic Nucleus Stimulation and Medication on Resting and Postural Tremor in Parkinson’s Disease.” // *Brain: A Journal of Neurology* 2004. №127 (Pt 9). P. 2131–2143.

19. Wang, Kai-Liang, Mathew Burns, Dan Xu, Wei Hu, Shi-Ying Fan, Chun-Lei Han, Qiao Wang, et al. “Electromyography Biomarkers for Quantifying the Intraoperative Efficacy of Deep Brain Stimulation in Parkinson’s Patients With Resting Tremor.” // *Frontiers in Neurology* 2020. №11 (February). P. 142.

20. Wu, Tsung-Lin Alhossary, Amr Pataky, Todd Ang, Wei & Donnelly, Cyril. pyemgpipeline: A Python package for electromyography processing // *Journal of Open Source Software*. 2022. №7. P. 4156.

References

1. Bologna, Matteo, Giulia Paparella, Alfonso Fasano, Mark Hallett, and Alfredo Berardelli. “Evolving Concepts on Bradykinesia.” *Brain: A Journal of Neurology* 2020;143 (3):727-50.

2. Brown P, Corcos DM., Rothwell JC. “Does Parkinsonian Action Tremor Contribute to Muscle Weakness in Parkinson’s Disease?” *Brain: A Journal of Neurology* 1997;120: 401-8.

3. Du, Yi-Chun, Chia-Hung Lin, Liang-Yu Shyu, Tainson Chen. “Portable Hand Motion Classifier for Multi-Channel Surface Electromyography Recognition Using Grey Relational Analysis.” *Expert Systems with Applications*. 2010;37 (6):4283-91.

4. Gabrieli, Giulio, Atiqah Azhari, Gianluca Esposito. "PySiology: A Python Package for Physiological Feature Extraction." In *Neural Approaches to Dynamics of Signal Exchanges*, edited by Anna Esposito, Marcos Faundez-Zanuy, Francesco Carlo Morabito, and Eros Pasero; 2020.
5. Guo, Zhilin, Weiqi Zeng, Taidong Yu, Yan Xu, Yang Xiao, Xuebing Cao, Zhiguo Cao. "Vision-Based Finger Tapping Test in Patients With Parkinson's Disease via Spatial-Temporal 3D Hand Pose Estimation." *IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics* 2022;26 (8):3848-59. .
6. Hasan, Hasan, Dilan S. Athauda, Thomas Foltynie, Alastair J. Noyce. "Technologies Assessing Limb Bradykinesia in Parkinson's Disease." *Journal of Parkinson's Disease* 2017;7 (1): 65-77. .
7. Heldman, Dustin A., Joseph P. Giuffrida, Robert Chen, Megan Payne, Filomena Mazzella, Andrew P. Duker, Alok Sahay, Sang Jin Kim, Fredy J. Revilla, Alberto J. Espay. "The Modified Bradykinesia Rating Scale for Parkinson's Disease: Reliability and Comparison with Kinematic Measures." *Movement Disorders. Official Journal of the Movement Disorder Society* 2011;26 (10):1859–63.
8. Herrmann, Christine M., Michael L. Madigan, Bradley S. Davidson, Kevin P. Granata. "Effect of Lumbar Extensor Fatigue on Paraspinal Muscle Reflexes." *Journal of Electromyography and Kinesiology: Official Journal of the International Society of Electrophysiological Kinesiology* 2006;16 (6):637-41. .
9. Hudgins B., P. Parker, R. N. Scott. "A New Strategy for Multifunction Myoelectric Control." *IEEE Transactions on Bio-Medical Engineering* 1993;40 (1):82–94.
10. Jankovic J. "Parkinson's Disease: Clinical Features and Diagnosis." *Journal of Neurology, Neurosurgery, and Psychiatry* 2008;79 (4):368-76.
11. Kleinholdermann, Urs, Max Wullstein, David Pedrosa. "Prediction of Motor Unified Parkinson's Disease Rating Scale Scores in Patients with Parkinson's Disease Using Surface Electromyography." *Clinical Neurophysiology: Official Journal of the International Federation of Clinical Neurophysiology* 2021;132 (7): 1708-13.
12. Korchounov, Alexei, Hayo I. Schipper, Irina S. Preobrazhenskaya, Kirn R. Kessler, Nikolay N. Yakhno. "Differences in Age at Onset and Familial Aggregation between Clinical Types of Idiopathic Parkinson's Disease." *Movement Disorders: Official Journal of the Movement Disorder Society* 2004;19 (9):1059-64.
13. Lau, Lonneke ML. de, Monique MB. Breteler. "Epidemiology of Parkinson's Disease." *Lancet Neurology* 2006;5 (6):525–35.
14. Makowski, Dominique, Tam Pham, Zen J. Lau, Jan C. Brammer, François Lespinasse, Hung Pham, Christopher Schölzel, and S. H. Annabel Chen. "NeuroKit2: A Python Toolbox for Neurophysiological Signal Processing." *Behavior Research Methods* 2021;53 (4):1689–96.
15. McManus, Lara, Giuseppe De Vito, Madeleine M. Lowery. "Analysis and Biophysics of Surface EMG for Physiotherapists and Kinesiologists: Toward a Common Language With Rehabilitation Engineers." *Frontiers in Neurology* 11 (October): 2020.
16. Memar, Sara, Mehdi Delrobaei, Marcus Pieterman, Kenneth McIsaac, and Mandar Jog. "Quantification of Whole-Body Bradykinesia in Parkinson's Disease Participants Using Multiple Inertial Sensors." *Journal of the Neurological Sciences* 2018;387 (April):157-65.
17. Piro, Neltje E, Lennart K. Piro, Jan Kassubek, Ronald A. Blechschmidt-Trapp. "Analysis and Visualization of 3D Motion Data for UPDRS Rating of Patients with Parkinson's Disease." *Sensors* 2016;16 (6).
18. Sturman, Molly M., David E. Vaillancourt, Leo Verhagen Metman, Roy A. E. Bakay, Daniel M. Corcos. "Effects of Subthalamic Nucleus Stimulation and Medication on Resting and Postural Tremor in Parkinson's Disease." *Brain: A Journal of Neurology* 2004;127 (Pt 9): 2131–43.
19. Wang, Kai-Liang, Mathew Burns, Dan Xu, Wei Hu, Shi-Ying Fan, Chun-Lei Han, Qiao Wang, et al. "Electromyography Biomarkers for Quantifying the Intraoperative Efficacy of Deep Brain Stimulation in Parkinson's Patients With Resting Tremor." *Frontiers in Neurology* 2020;11 (February):142.
20. Wu, Tsung-Lin Alhossary, Amr Pataky, Todd Ang, Wei & Donnelly, Cyril. *pyemgpipeline: A Python package for electromyography processing* *Journal of Open Source Software*. 2022;7:4156.

Библиографическая ссылка:

Козулин Н.Д., Мигулина А.А., Мокрушин Д.А., Согоян Г.А., Артеменко А.Ф., Биктимиров А.Р. Поверхностная электромиография в оценке тяжести двигательных нарушений у пациентов с болезнью Паркинсона // Вестник новых медицинских технологий. Электронное издание. 2024. №1. Публикация 1-1. URL: <http://www.medtsu.tula.ru/VNMT/Bulletin/E2024-1/1-1.pdf> (дата обращения: 15.01.2024). DOI: 10.24412/2075-4094-2024-1-1-1. EDN OFOWKC*

Bibliographic reference:

Kozulin ND, Migulina AA, Mokrushin DA, Sogoyan GA, Artemenko AF, Biktimirov AR. Poverhnostnaja jelektromiografija v ocenke tjazhesti dvigatel'nyh narushenij u pacientov s boleznu Parkinsona [Surface electromyography at evaluation of movement disorders seriousness in patients with Parkinson's disease]. *Journal of New Medical Technologies, e-edition*. 2024 [cited 2024 Jan 15];1 [about 10 p.]. Russian. Available from: <http://www.medtsu.tula.ru/VNMT/Bulletin/E2024-1/1-1.pdf>. DOI: 10.24412/2075-4094-2024-1-1-1. EDN OFOWKC

* номера страниц смотреть после выхода полной версии журнала: URL: <http://medtsu.tula.ru/VNMT/Bulletin/E2024-1/e2024-1.pdf>

**идентификатор для научных публикаций EDN (eLIBRARY Document Number) будет активен после выгрузки полной версии журнала в eLIBRARY