

# ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ ИНСТРУМЕНТАЛЬНАЯ ПРОБА ДВИЖЕНИЙ СГИБАНИЯ-РАЗГИБАНИЯ ЛУЧЕЗАПЯСТНОГО СУСТАВА: НОРМАТИВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ

Д.В. Скворцов<sup>1, 2, 3</sup>, Д.А. Лобунько<sup>1</sup>, Г.Е. Иванова<sup>1, 2</sup>

<sup>1</sup> Федеральный центр мозга и нейротехнологий, Москва, Россия;

<sup>2</sup> Российский национальный исследовательский медицинский университет имени Н.И. Пирогова, Москва, Россия;

<sup>3</sup> Федеральный научно-клинический центр специализированных видов медицинской помощи и медицинских технологий, Москва, Россия

## АННОТАЦИЯ

**Обоснование.** Инсульт представляет собой значимую медико-социальную проблему из-за высокой заболеваемости и смертности с тенденцией к увеличению общего числа заболевших. У 80% пациентов сохраняются нарушения функции верхней конечности. Существующие подходы, такие как клинические шкалы и опросники, критикуются за субъективность и недостаточную точность. Необходима разработка инструментального метода оценки функции верхней конечности, применимого в клинических условиях. **Цель исследования** — разработать функциональную пробу для объективной диагностики функции лучезапястного сустава, применимую в клинических условиях. **Методы.** Предложена функциональная проба для оценки биомеханики лучезапястного сустава с использованием инерционных сенсоров. Объектом исследования стали 15 здоровых добровольцев (5 мужчин и 10 женщин в возрасте от 23 до 33 лет), не имеющих заболеваний суставов и неврологических нарушений. Исследование проводилось в течение одного года (2022–2023). Первичной конечной точкой было определение амплитуды, времени и траектории движений лучезапястного сустава при выполнении двух тестов — «Кисть-0» и «Кисть-Сгиб». Проводилась оценка длительности цикла движения, максимальной амплитуды и фазы движения. **Результаты.** Оценка функции верхней конечности с помощью клинических шкал (ARAT, FMA-UE, MRC) показала, что параметры соответствуют показателям здоровых людей. В тесте «Кисть-0» амплитуда движений была достоверно ниже, чем в тесте «Кисть-сгиб» ( $p < 0,05$ ). Не найдено статистически значимых различий в амплитуде движений между правой и левой конечностями в обоих тестах ( $p > 0,05$ ). Фаза максимального сгибания в тесте «Кисть-0» наступает достоверно раньше, чем в тесте «Кисть-сгиб» для правой руки ( $p < 0,05$ ). Длительность цикла движения не отличалась достоверно между тестами для правой руки ( $p > 0,05$ ) и была достоверно выше в тесте «Кисть-сгиб» для левой руки ( $p < 0,05$ ). **Заключение.** Установлены нормативные параметры для функциональной пробы сгибания-разгибания лучезапястного сустава. Предложенная проба требует незначительного времени для проведения и может быть использована для объективной диагностики функции лучезапястного сустава у больных.

**Ключевые слова:** церебральный инсульт; верхняя конечность; лучезапястный сустав; функция; кинематика.

## Для цитирования:

Скворцов Д.В., Лобунько Д.А., Иванова Г.Е. Функциональная инструментальная проба движений сгибания-разгибания лучезапястного сустава: нормативные параметры. *Клиническая практика*. 2024;15(4):18–27. doi: <https://doi.org/10.17816/clinpract636242>

Поступила 19.09.2024

Принята 11.11.2024

Опубликована online 02.12.2024

## ОБОСНОВАНИЕ

Инсульт является важной медико-социальной проблемой из-за высокой заболеваемости и смертности. В России ежегодно регистрируется 170–380 случаев инсульта на 100 000 человек, общее количество случаев — ~380 000 в год. Всемир-

ная организация здравоохранения прогнозирует увеличение случаев острых нарушений мозгового кровообращения на 30% в период до 2025 года [1].

Инсульт вызывает нарушения в двигательной, чувствительной, зрительной, аффективной, когнитивной и речевой сферах. У 80% выживших после

# THE FUNCTIONAL INSTRUMENTAL TEST OF FLEXION-EXTENSION MOTION IN THE RADIOCARPAL JOINT: REFERENCE PARAMETERS

D.V. Skvortsov<sup>1, 2, 3</sup>, D.A. Lobunko<sup>1</sup>, G.E. Ivanova<sup>1, 2</sup>

<sup>1</sup> Federal Center of Brain Research and Neurotechnologies, Moscow, Russia;

<sup>2</sup> The Russian National Research Medical University named after N.I. Pirogov, Moscow, Russia;

<sup>3</sup> Federal Research and Clinical Center of Specialized Medical Care and Medical Technologies, Moscow, Russia

## ABSTRACT

**BACKGROUND:** The stroke represents a significant medical-social problem due to its high morbidity and mortality with a tendency towards increasing the overall occurrence rates. A total 80% of the patients show persisting impaired functions of the upper limb. The current approaches, such as Clinical scales and Questionnaires, are being criticized for subjectivity and insufficient precision. It is necessary to develop an instrumental method for evaluating the functions of the upper limb, the method that is applicable in the clinical settings. **AIM:** To develop a functional test for the objective diagnostics of the wrist joint functions, applicable in the clinical settings. **METHODS:** A functional test was proposed for evaluating the biomechanics of the radiocarpal joint by means of using the inertial sensors. The research sample was a group of 15 healthy volunteers (5 males and 10 females aged from 23 to 33 years), not having any joint diseases or neurological disorders. The research was carried out within a period of one year (2022–2023). The primary endpoint was the determination of the amplitude, the time and the motion trajectory in the wrist joint when performing two tests - the “Wrist-0” and “Wrist-flex”. An assessment was done of the duration of the motion cycle, of the motion maximal amplitude and phase. **RESULTS:** The evaluation of the upper limb functions using the clinical scales (ARAT, FMA-UE, MRC) has demonstrated, that the parameters correspond to the ones in healthy individuals. When using the “Wrist-0” test, the motion amplitude was significantly lower than in the «Wrist-flex» test ( $p < 0.05$ ). No statistically significant differences were found in the motion amplitude between the right and left limbs determined using both tests ( $p > 0.05$ ). The maximal flexion phase for the “Wrist-0” tests occurs significantly earlier than for the “Wrist-flex” test for the right hand ( $p < 0.05$ ). The duration of the motion cycle did not significantly differ between the tests for the right hand ( $p > 0.05$ ) and was significantly higher for the “Wrist-flex” test in the left hand ( $p < 0.05$ ). **CONCLUSION:** A set of reference values was established for the functional tests. Insignificant differences were reported for the functions of the right and left radiocarpal joints. The test proposed requires insignificant time for its implementation and it can be used for objective diagnostics of the radiocarpal joint functions in patients.

**Keywords:** cerebral stroke; upper limb; wrist joint; function; kinematics.

### For citation:

Skvortsov DV, Lobunko DA, Ivanova GE. The functional instrumental test of flexion-extension motion in the radiocarpal joint: reference parameters. *Journal of Clinical Practice*. 2024;15(4):18–27. doi: <https://doi.org/10.17816/clinpract636242>

Submitted 19.09.2024

Revised 11.11.2024

Published online 02.12.2024

ишемического инсульта сохраняются нарушения функции верхней конечности, несмотря на проводимые реабилитационные мероприятия [2].

При оценке функции верхней конечности особое внимание уделяется активному разгибанию в лучезапястном суставе, так как это движение необходимо для выполнения захватов [3, 4] и удовлетворения основных бытовых потребностей

[5, 6]; активное разгибание кисти является также предиктором восстановления функции верхней конечности [7].

Основными методами диагностики функции верхней конечности остаются клинические шкалы и опросники. Такой подход часто подвергается критике за низкую достоверность и высокую степень субъективности. Объективные методы диаг-

ности активно изучаются научным сообществом, но информации о реальном функционировании верхней конечности по-прежнему недостаточно [8].

Важным аспектом реабилитации после инсульта являются инструментальная оценка двигательной активности и регистрация динамики восстановления объективными методами. Примером объективизации движений верхней конечности служит видеоанализ движений [9–11]. Несмотря на высокую точность систем захвата движения, этот метод является затратным, требует значительного количества времени для получения и обработки результатов и позволяет оценивать данные только в специальных лабораторных условиях.

В качестве инструмента объективизации может использоваться также метод миографии. Так, в исследовании I.S. Hwang и соавт. [12] благодаря данному методу оценки было выявлено, что уровень синкинезии в руке после инсульта связан с её функциональностью. Несмотря на то, что электромиография является важным инструментом диагностики функции мышц, метод предоставляет информацию только об электрической активности мышц и не позволяет получить информацию о движении конечности, не говоря уже о таких параметрах, как амплитуда и координация движений.

Эффективным инструментом для регистрации движения является метод гониометрии, часто применяемый при исследовании амплитуды движений в различных суставах верхних и нижних конечностей [13], однако важно отметить, что на сегодняшний день метод ручного измерения амплитуды движений с использованием гониометра следует расценивать как устаревший. Кроме того, метод гониометрии позволяет получить информацию о максимальной амплитуде движений, но не о процессе его выполнения.

Инерционные сенсоры, применяемые в технологии бесплатформенной навигации, являются новым поколением устройств, обладают высокой степенью автоматизации и точности измерения [14, 15]. Инерционные сенсоры демонстрируют преимущество перед методом видеоанализа движений, так как их применение, не предполагая специальных лабораторных условий для сбора информации, требует значительно меньше времени при подготовке к исследованию. Недавние исследования показали, что инерционные сенсоры обеспечивают достаточную точность оценки по сравнению с системами видеоанализа движений [16].

Существуют и другие методы объективизации функции верхней конечности, такие как электрогониометрия и видеорадиография, однако они сложны в воспроизведении и сопряжены с большим количеством внутренних ошибок при проведении оценки [17, 18].

Несмотря на значительное количество высокоточных инструментов для оценки функции кисти, единой методики на данный момент не представлено. Так, например, в исследовании Y. Li и соавт. [19] был разработан диагностический протокол из 11 тестовых движений для верхней конечности, заимствованных из шкалы Фугл–Мейера (Fugl-Meyer Assessment, FMA), однако в клинической практике его применение весьма трудоёмко ввиду большого количества информации, получаемой из разных источников.

C.I. Renner с соавт. [7], оценивая в своей работе динамические и силовые параметры верхней конечности у пациентов после инсульта с помощью динамометрии и инерционных сенсоров с последующим их сравнением с клиническими шкалами, подчеркнули важность динамических параметров для оценки восстановления функции верхней конечности, при этом анализ траектории движения авторами не был выполнен.

В исследовании S.I. Lee и соавт. [20] применены небольшие автономные инерционные сенсоры для оценки регулярности использования правой и левой кисти в повседневной бытовой активности у здоровых субъектов. Предложенный метод хотя и может применяться для оценки двигательной функции верхних конечностей с определением множества параметров, но больше предназначен для количественной оценки двигательной функции. В свою очередь, такие показатели, как амплитуда, время и траектория, могут быть ключевыми при составлении и корректировке программ реабилитационных мероприятий у пациентов с нарушениями функции верхней конечности, тем не менее сама возможность регистрации движений в быту на протяжении длительного времени является очень привлекательной.

Таким образом, существующие методы диагностики функции верхней конечности, включая клинические шкалы и опросники, подвергаются критике из-за их субъективности, фрагментарности и зачастую недостоверности результатов, при этом объективные методы диагностики включают параметры кинематики, функциональной электромиографии и динамики движения. Применение

всего комплекса биомеханического анализа оказывается сложной технической и методической проблемой. Кроме этого, большинство устройств, способных выполнить данный биомеханический анализ, ограниченно применимы в клинических условиях. С другой стороны, такие технологии, как инерционные сенсоры, позволяют регистрировать не доступные прежде параметры, в том числе в условиях, которые ранее даже не рассматривались (например, ежедневная бытовая деятельность).

Наибольшую проблему, однако, представляет то, что до сих пор не разработан единый и универсальный метод оценки функции лучезапястного сустава, а существующие методы сложно воспроизводимы [21]. При создании пробы важно учитывать особенности функционирования мышц и, в частности, тот факт, что мышца способна продемонстрировать большие силовые характеристики из положения максимального натяжения [22]. Создание универсального метода объективной диагностики, доступного для использования в условиях среднестатистического кабинета врача, могло бы существенно способствовать распространению инструментальных методов оценки в кабинетах, стационарах и отделениях медицинской реабилитации.

**Цель исследования** — разработать функциональную пробу для регистрации движений сгибания-разгибания лучезапястного сустава с возможностью использования в клинических условиях.

## МЕТОДЫ

### Дизайн исследования

Пилотное клиническое исследование с участием здоровых добровольцев.

### Критерии соответствия

**Критерии включения:** здоровые добровольцы без заболеваний опорно-двигательного аппарата или неврологических расстройств; возраст от 23 до 33 лет; отсутствие травм или заболеваний суставов в анамнезе; наличие письменного информированного согласия на участие в исследовании.

**Критерии невключения:** наличие хронических заболеваний суставов или неврологических расстройств; наличие травм или недавних повреждений, которые могут повлиять на функцию верхних конечностей; приём лекарств, которые могут повлиять на моторную функцию или кинематику; наличие когнитивных нарушений, которые могут мешать выполнению протоколов исследования.

**Критерии исключения:** несоблюдение исследовательских протоколов или требований по посещаемости; развитие осложнений или побочных эффектов в ходе исследования.

### Продолжительность исследования

Исследование проводилось в период с 2022 по 2023 год в лаборатории Научно-исследовательского центра медицинской реабилитации ФГБУ «Федеральный центр мозга и нейротехнологий» Федерального медико-биологического агентства России.

### Описание медицинского вмешательства

**Методика биомеханического исследования.**

Для оценки функции лучезапястного сустава разработана функциональная проба, состоящая из двух тестов, которые включают изолированные движения в лучезапястном суставе. Для проведения пробы использованы два инерционных сенсора комплекта «Стэдис-Кинематика» (Нейрософт, Россия) с креплениями на теле человека эластичными лентами с застёжками велкро (липучка), персональный компьютер с установленным штатным программным обеспечением, а также письменный стол и стул.

При проведении пробы испытуемый находился в положении сидя на стуле, касаясь спинки стула спиной, ноги согнуты под углом 90 градусов, стопы плотно касаются поверхности пола. Стол располагался со стороны исследуемой стороны. Предплечье исследуемой конечности находится на столе в положении пронации (ладонью вниз). Сенсоры закрепляются на верхней конечности основанием по направлению к пациенту следующим образом: сенсор № 1 фиксируется на латеральной поверхности и в проксимальном отделе предплечья (рис. 1), сенсор № 2 — на ребро кисти. Предложенная проба состоит из двух кинематических тестов — «Кисть-0» и «Кисть-Сгиб».

Тест «Кисть-0» выполняется в ограниченной амплитуде и предполагает разгибание в лучезапястном суставе из положения 0 градусов. В начале теста кисть и предплечье пациента находятся на поверхности письменного стола в положении пронации, плечо — в положении отведения ~20–30 градусов. По команде «Старт» пациенту необходимо выполнить как минимум 3, как максимум 10 разгибательных движений в лучезапястном суставе, достигая максимального угла движения в произвольном темпе. Проведение теста прекращается командой «Стоп».

## «Кисть-0»



## «Кисть-Сгиб»



**Рис. 1.** Крепление сенсоров на верхней конечности: проба «Кисть-0» (1 — положение верхней конечности перед началом движения; 2 — положение максимального разгибания кисти; 3 — положение верхней конечности в конце цикла движения) и проба «Кисть-сгиб» (4 — положение верхней конечности перед началом движения; 5 — положение максимального разгибания кисти; 6 — положение верхней конечности в конце цикла движения).

Тест «Кисть-Сгиб» выполняется из положения сгибания кисти (при этом кисть свободно свешена со стола) и в полной амплитуде. В начале теста предплечье пациента находится на поверхности письменного стола в положении пронации, плечо — в положении отведения  $\sim 20\text{--}30$  градусов, при этом кисть — в положении сгибания (свободно свешивается со стола). По команде «Старт» пациенту необходимо выполнить такое же количество движений в произвольном темпе, как и в тесте «Кисть-0». Проведение теста прекращается командой «Стоп» (см. рис. 1).

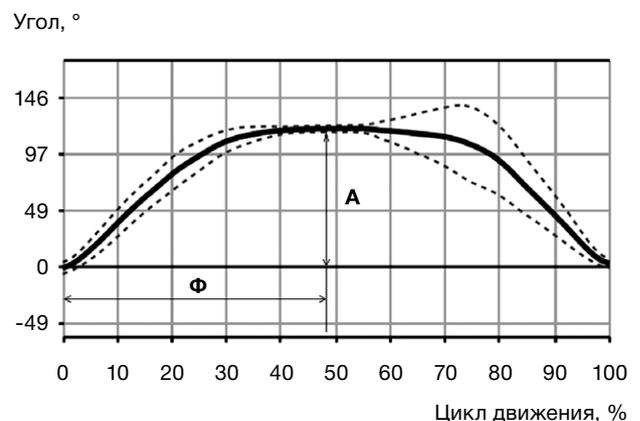
Программное обеспечение предоставляет следующую информацию: длительность цикла полного движения (от начала разгибания до возвращения в исходное положение) в секундах; среднюю гониограмму движения (функция амплитуда-время) по выполненным циклам движения; максимальную среднюю амплитуду движений в градусах; среднюю фазу максимальной амплитуды (время наступления максимальной амплитуды в цикле движения) в процентах (%) от времени цикла движения (рис. 2).

Наличие двух вариантов пробы позволяет получить больше информации о функционировании верхней конечности пациента, а также оценить минимальные, но осознанные движения пациента в положении с максимальным натяжением мышц-

разгибателей запястья за счёт веса собственной кисти («Кисть-сгиб»).

## Исходы исследования

*Основной исход исследования.* Получены биомеханические параметры функции лучезапястного сустава, изученные с помощью двух функциональных тестов («Кисть-0» и «Кисть-Сгиб»). Ключевыми показателями являются амплитуда движений, фаза максимального сгибания и длительность цикла движения. Эти показатели необходимы для дости-



**Рис. 2.** Гониограмма: А — амплитуда движения; Ф — фаза максимального угла разгибания (от полного цикла движения).

жения цели исследования, так как они позволяют объективно оценить эффективность предложенной функциональной пробы.

*Дополнительные исходы исследования.* Обнаружены незначительные отличия функции левой и правой стороны.

### Этическая экспертиза

Организация исследования одобрена локальным этическим комитетом ФГБУ «Федеральный научно-клинический центр специализированных видов медицинской помощи и медицинских технологий» Федерального медико-биологического агентства России (протокол № 11/25-04-22 от 25.04.2022).

### Статистический анализ

Обработка полученных результатов проведена стандартными методами описательной вариационной статистики с расчётом медианы, 25% и 75% квартиля. Использован программный пакет Statistica 12. Оценка достоверности различий выполнена с помощью критерия Вилкоксона при  $p < 0,05$ . Проведена сравнительная оценка аналогичных параметров левой и правой кисти, а также тестов «Кисть-0» и «Кисть-сгиб».

## РЕЗУЛЬТАТЫ

### Объекты (участники) исследования

В исследовании приняли участие 15 практически здоровых добровольцев, не имеющих в анамнезе травм и заболеваний опорно-двигательного аппарата, из них 10 женщин и 5 мужчин; средний возраст  $26,5 \pm 3,5$  (23–33) года. Информированное согласие получено от всех субъектов до начала исследования. Здоровые испытуемые не страдали заболеваниями суставов и не имели неврологических расстройств или травм. Перед проведением исследования все участники прошли оценку функции верхних конечностей с помощью следующих клинических шкал: оценка мышечной силы (Medical

Research Council, MRC), Фугл–Мейер для верхней конечности (Fugl-Meyer Assessment Upper Extremity, FMA-UE), оценка двигательных возможностей верхней конечности (Action Research Arm Test, ARAT).

### Основные результаты исследования

Результаты оценки функции верхней конечности у здоровых добровольцев с помощью клинических шкал, как и ожидалось, соответствовали показателям здорового человека (табл. 1).

Результаты по исследуемым параметрам представлены в табл. 2. Амплитуда движений при проведении теста «Кисть-0» достоверно ниже амплитуды движений, полученных при проведении теста «Кисть-сгиб» ( $p < 0,05$ ). При сравнении амплитуды движений в правой и левой конечностях в обоих тестах статистически значимых отклонений не получено ( $p > 0,05$ ).

Фаза максимального сгибания в тесте «Кисть-0» происходит достоверно раньше, чем для теста «Кисть-сгиб» для правой стороны ( $p < 0,05$ ). Для левой стороны фаза максимального сгибания не имеет достоверных отличий ( $p > 0,05$ ).

Длительность цикла движения не отличается достоверно между тестами «Кисть-0» и «Кисть-сгиб» для правой стороны ( $p > 0,05$ ) и достоверно выше в тесте «Кисть-сгиб» для левой ( $p < 0,05$ ).

### ОБСУЖДЕНИЕ

По результатам исследования, все испытуемые (здоровые добровольцы) продемонстрирова-

Таблица 1

Оценка функции верхней конечности с помощью клинических шкал

Параметр	Правая	Левая
ARAT, балл	57	57
FMA-UE, балл	126	126
MRC, балл	5	5

Таблица 2

Исследуемые параметры амплитуды, фазы и длительности цикла для правого и левого лучезапястных суставов

Параметр	Правый			Левый		
	Амплитуда, град.	Фаза, %	Цикл, сек	Амплитуда, град.	Фаза, %	Цикл, сек
Кисть-0	79 [67; 86]*	41 [38; 45]*	1,78 [1,53; 2,46]	80 [74; 86]*	46 [39; 48]	1,85 [1,4; 2,06]*
Кисть-сгиб	137 [123; 156]	47 [42; 58]	2,27 [1,7; 2,57]	138 [124; 158]	43 [39; 53]	2,07 [1,74; 2,67]

*Примечание.* \* Статистически значимо по сравнению с таким же параметром теста «Кисть-Сгиб» ( $p < 0,05$ ).

ли максимальные баллы при оценке с использованием клинических шкал, что было ожидаемым результатом.

Параметры амплитуды продемонстрировали полное совпадение между левой и правой рукой в обоих тестах, однако были выявлены различия в фазе максимальной амплитуды и продолжительности движения. В частности, фаза максимального угла разгибания в тесте «Кисть-0» наступает достоверно раньше для правой стороны, тогда как для левой стороны таких различий не обнаружено, что может свидетельствовать о наличии асимметрии в управлении движениями у правшей, что соответствует данным о межполушарных различиях в управлении моторикой. Продолжительность цикла движения для правой руки была одинаковой в обоих тестах, несмотря на почти двукратную разницу в амплитуде движений. Для левой руки продолжительность цикла движения «Кисть-сгиб» была достоверно выше, что может указывать на особенности двигательной активности левой руки у правшей. При этом прямое сравнение одноимённых параметров правой и левой руки не показало достоверных различий: это позволяет сделать вывод, что межполушарные отличия имеют, скорее, косвенный характер. Полученные данные указывают на то, что межполушарные различия оказались незначительными, что позволяет предположить возможность формирования общих нормативов для обеих конечностей.

В исследовании P.S. Santos и соавт. [23], как и в нашем исследовании, использовались схожие положения руки и кисти для оценки функции кисти, однако основное внимание уделялось изучению тремора, а не характеристикам амплитуды движений.

Исследования под руководством V. Costa [15] и M.A. Wirth [16] также сосредоточены на амплитудных характеристиках сгибания-разгибания кисти, и их результаты сопоставимы с нашими: в частности, показатели разгибания кисти ( $\sim 68^\circ$  в исследовании V. Costa [15] и  $79^\circ$  в нашем исследовании для теста «Кисть-0», а также  $\sim 126^\circ$  в исследовании M.A. Wirth [16] и  $137^\circ$  для теста «Кисть-Сгиб» в нашем исследовании) соответствуют данным, полученным в этих исследованиях. Положение кисти в пронации в нашем исследовании могло оказать влияние на мышечную активность и амплитуду движений, особенно у пациентов с неврологическими нарушениями. Например, положение, при котором предплечье расположено на столе, а кисть высту-

пает за пределы рабочей поверхности и находится в напряжённом состоянии параллельно полу, как у V. Costa [15], может быть приемлемым для здоровых испытуемых, но приводит к затруднениям у пациентов с мышечной слабостью. Учитывая это, наше исследование может быть более подходящим для пациентов с неврологическими нарушениями, так как положение, в котором исходно мышцы предплечья находятся в расслабленном состоянии, лучше отражает реальные двигательные способности. В работе M.A. Wirth [16], в отличие от нашего исследования, кисть во время оценки находилась в положении большим пальцем вверх между пронацией и супинацией, тогда как в нашем исследовании — в положении пронации. Использованное авторами положение позволяет практически исключить влияние собственного веса самой кисти. Это различие также может оказать значительное влияние на результаты, особенно у пациентов с неврологическими нарушениями, так как положение кисти влияет на распределение мышечной активности и координацию движений.

Параметры амплитуды, полученные в исследованиях под руководством P.S. Santos [23] и M.R. Pourahmadi [24], также оказались схожими с нашими результатами для теста «Кисть-0», однако оценка в этих исследованиях проводилась с использованием акселерометров, встроенных в смартфон. В этом случае нужно принимать во внимание масс-инерционные характеристики смартфона, которые могут препятствовать выполнению тестового движения у пациентов с парезом.

Что касается сопоставимости результатов исследования биомеханическими и клиническими методами, то в работе S. Patel и соавт. [25] отмечена высокая корреляция между оценкой качества движений верхней конечности в каждой функциональной задаче (Functional Ability Scale, FAS) и данными инерционных сенсоров. Аналогичный результат был получен применительно к тестам для верхней конечности ARAT и FMA в статье M.N. McDonnell и соавт. [26], что указывает на сопоставимость данных, полученных с помощью инерционных сенсоров, с традиционными клиническими методами оценки.

Сопоставимость данных, полученных с помощью инерционных сенсоров и золотого стандарта — видеоанализа движений, изучена для данной локализации в исследовании R. Pérez и соавт. [27]. Авторы получили высокую корреляцию между системой анализа движений на основе инерционных сенсоров и видеоанализом движений, что подтверждает

надёжность инерционных систем. Однако различие между сигналами, обусловленное местом установки сенсоров на одежде испытуемых, может стать источником ошибок, что подчёркивает необходимость строгой калибровки сенсоров с целью повышения точности измерений. Эти данные полезно учитывать при разработке будущих протоколов исследований. При этом инерционная технология позволяет проводить исследования в реальных жизненных условиях, что недоступно видеосистемам.

Таким образом, у здоровых испытуемых положение кисти и воздействие силы тяжести не являются значимыми факторами, ограничивающими амплитуду движений. Этот факт также можно использовать в клинической практике.

В проанализированных нами исследованиях основное внимание уделялось параметрам амплитуды движения, тогда как оценка длительности цикла движения проводилась реже. Однако ни в одном из них не встречалось примеров анализа фазы максимального угла, что представляет собой важный недооценённый аспект. Этот параметр играет ключевую роль в оценке качества выполнения движения, поскольку отражает момент достижения максимальной амплитуды в течение цикла движения. Кроме того, анализ фазы максимального угла позволяет косвенно оценить степень контроля испытуемого над движением на всех этапах выполнения. В частности, синхронность и точность фазового распределения движений могут свидетельствовать о координации работы мышц и межполушарных различиях, что делает этот параметр особенно важным для объективной диагностики двигательной функции.

На основании данного исследования были получены нормативные значения для предложенной функциональной пробы. Функциональная проба для оценки сгибания-разгибания в лучезапястном суставе предоставляет более детальную количественную и качественную информацию по сравнению с традиционными клиническими шкалами. Метод прост в выполнении, занимает всего несколько минут и может быть внедрён в повседневную клиническую практику для диагностики и мониторинга реабилитации пациентов, например, с парезом в результате церебрального инсульта.

### Ограничения исследования

Данное исследование имеет ряд ограничений. Прежде всего, небольшой размер выборки испытуемых. Малый размер выборки также может снижать статистическую мощность анализа, особенно

при оценке тонких различий между правой и левой рукой. Важным направлением будущих исследований станет увеличение выборки, что позволит повысить достоверность выводов и охватить более широкий спектр вариаций двигательных функций кисти у различных категорий людей.

Ещё одно ограничение заключается в том, что в исследовании не использовались методы миографии для оценки мышечной активности. Это могло бы предоставить более детальную информацию о мышечной координации и её вкладе в характеристики движения. Для дальнейшего улучшения метода и его внедрения в клиническую практику необходимо проведение дополнительных исследований с использованием миографии, что позволит более точно оценить включение основных мышц в движение. Важно также отметить, что позиция установки инерционных сенсоров и особенности их калибровки могли повлиять на результаты. Индивидуальные различия в биомеханике конечностей у участников, такие как анатомические особенности, также могли оказывать влияние на данные, что требует дополнительного анализа.

В предстоящих исследованиях предполагается уделить больше внимания расширению выборки, включая пациентов с нарушением функции кисти для более точной оценки кинематических параметров и их сравнительного анализа с группой здоровых испытуемых. Это позволит выявить особенности нарушений и точнее определить диагностическую ценность параметров, таких как фаза максимального угла, амплитуда и продолжительность цикла движения.

Кроме того, перспективным направлением является включение метода функциональной электромиографии совместно с кинематической оценкой. Это позволит исследовать, как функционируют мышцы в разные фазы движения, и провести одновременный мониторинг мышечной активности. Такой подход даст более полное представление о механизмах движения и позволит сопоставить кинематические данные с мышечным контролем, что особенно важно для выявления тонких отличий в координации движений и имеет большое значение в работе с пациентами, страдающими неврологическими патологиями.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Получены нормативные данные для предложенной функциональной пробы движений сгибания-разгибания лучезапястного сустава. Чувствитель-

ность биомеханической диагностики позволяет получить отличия между левой и правой конечностями, при этом характер отличий позволяет применять общие нормативные границы.

Предложенная функциональная проба может быть использована для объективной оценки функционального состояния и динамики у больных с неврологической патологией верхней конечности и нарушениями функции лучезапястного сустава.

### ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

**Источник финансирования.** Работа проведена в рамках государственного задания ФМБА России (Исследование и разработка новых технологий медицинской реабилитации пациентов с поражениями и болезнями головного мозга) — ААААА-А19-119042590030-2.

**Конфликт интересов.** Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

**Вклад авторов.** Д.В. Скворцов — дизайн исследования, поиск и обработка литературы, написание рукописи; Д.А. Лобунько — поиск и обработка литературы, проведение исследования, обработка данных, статистическая обработка, написание рукописи; Г.Е. Иванова — общее руководство, дизайн исследования. Все авторы подтверждают соответствие своего авторства международным критериям ICMJE (все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией).

### ADDITIONAL INFORMATION

**Funding source.** The work was carried out within the framework of the state task of the FMBA of Russia (Research and Development of new technologies for medical rehabilitation in patients with brain lesions and diseases) — ААААА-А19-119042590030-2.

**Competing interests.** The authors declare that they have no competing interests.

**Authors' contribution.** D.V. Skvortsov — research design, literature search and processing, manuscript writing; D.A. Lobunko — literature search and processing, research, statistical analysis, manuscript writing; G.E. Ivanova — general guidance, research design. All authors made a substantial contribution to the conception of the work, acquisition, analysis, interpretation of data for the work, drafting and revising the work, final approval of the version to be published and agree to be accountable for all aspects of the work.

### ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Скворцова В.И., Стаховская Л.В., Айриян Н.Ю., Эпидемиология инсульта в Российской Федерации // *Системные гипертензии*. 2005. № 1. С. 10–12. [Skvortsova VI, Stakhovskaya LV, Ayriyan NY. Epidemiology of stroke in the Russian Federation. *Systemnye gipertenzii = Systemic hypertension*. 2020;(1):10–12. (In Russ.)] EDN: RDYUOL
2. Hatem SM, Saussez G, Della Faille M, et al. Rehabilitation of motor function after stroke: A multiple systematic review focused on techniques to stimulate upper extremity recovery. *Front Hum Neurosci*. 2016;10:442. doi: 10.3389/fnhum.2016.00442
3. Mateo S, Revol P, Fourtassi M, et al. Kinematic characteristics of tenodesis grasp in C6 quadriplegia. *Spinal Cord*. 2013;51(2):144–149. doi: 10.1038/sc.2012.101
4. Su FC, Chou YL, Yang CS, et al. Movement of finger joints induced by synergistic wrist motion. *Clin Biomech (Bristol)*. 2005;20(5):491–497. doi: 10.1016/j.clinbiomech.2005.01.002
5. Moser N, O'Malley MK, Erwin A. Importance of wrist movement direction in performing activities of daily living efficiently. *Annu Int Conf IEEE Eng Med Biol Soc*. 2020;2020:3174–3177. doi: 10.1109/embc44109.2020.9175381
6. Nadeem M, Loss JG, Li ZM, Seitz WH. Ulnar extension coupling in functional wrist kinematics during hand activities of daily living. *J Hand Surg*. 2022;47(2):187.e1–187.e13. doi: 10.1016/j.jhsa.2021.03.026
7. Renner CI, Bungert-Kahl P, Hummelshaim H. Change of strength and rate of rise of tension relate to functional arm recovery after stroke. *Arch Phys Med Rehabil*. 2009;90(9):1548–1556. doi: 10.1016/j.apmr.2009.02.024
8. Santisteban L, Teremetz M, Bleton J, et al. Upper limb outcome measures used in stroke rehabilitation studies: A systematic literature review. *PLoS One*. 2016;11(5):e0154792. doi: 10.1371/journal.pone.0154792
9. Ao D, Sun R, Tong KY, Song R. Characterization of stroke-related aging-related changes in the complexity of EMG signals during tracking tasks. *Anna Biomed Eng*. 2015;43(4):990–1002. doi: 10.1007/s10439-014-1150-1
10. Corazza S, Mündermann L, Gambaretto E, et al. Markerless motion capture through visual hull, articulated ICP and subject specific model generation. *Int J Computer Vision*. 2010;87(1):156–169. doi: 10.1007/s11263-009-0284-3
11. Sethi A, Patterson T, McQuirk T, et al. Temporal structure of variability decreases in upper extremity movements post stroke. *Clin Biomech (Bristol)*. 2013;28(2):134–139. doi: 10.1016/j.clinbiomech.2012.11.006
12. Hwang IS, Tung LC, Yang JF, et al. Electromyographic analyses of global synkinesis in the paretic upper limb after stroke. *Phys Ther*. 2005;85(8):755–765. doi: 10.1093/ptj/85.8.755
13. Hettle M, Braddom RL. Curriculum needs in physical medicine and rehabilitation for primary care physicians: Results of a survey. *Am J Phys Med Rehabil*. 1995;74(4):271–275. doi: 10.1097/00002060-199507000-00003
14. Shim S, Jung J. Effects of bilateral training on motor function, amount of activity, and activity intensity measured with an accelerometer of patients with stroke. *J Phys Ther Sci*. 2015;27(3):751–754. doi: 10.1589/jpts.27.751
15. Costa V, Ramírez O, Otero A, et al., Validity and reliability of inertial sensors for elbow and wrist range of motion assessment. *Peer J*. 2020;8:e9687. doi: 10.7717/peerj.9687
16. Wirth MA, Fischer G, Verdú J, et al. Comparison of a new inertial sensor-based system with an optoelectronic motion capture system for motion analysis of healthy human wrist joints. *Sensors*. 2019;19(23):5297. doi: 10.3390/s19235297
17. McHugh BP, Morton AM, Akhbari B, et al. Accuracy of an electrogoniometer relative to optical motion tracking for quantifying wrist range of motion. *J Med Eng Technol*. 2020;44(2):49–54. doi: 10.1080/03091902.2020.1713240
18. Akhbari B, Morton AM, Moore DC, et al. Accuracy of biplane videoradiography for quantifying dynamic

- wrist kinematics. *J Biomech.* 2019;92:120–125. doi: 10.1016/j.jbiomech.2019.05.040
19. Li Y, Zhang X, Gong Y, et al. Motor function evaluation of hemiplegic upper-extremities using data fusion from wearable inertial and surface EMG sensors. *Sensors.* 2017;17(3):582. doi: 10.3390/s17030582
20. Lee SI, Liu X, Rajan S, et al. A novel upper-limb function measure derived from finger-worn sensor data collected in a free-living setting. *PLoS One.* 2019;14(3):e0212484. doi: 10.1371/journal.pone.0212484
21. Белова А.Н., Шейко Г.Е., Рахманова Е.М., и др. Оценка использования функции рук: тесты для взрослых пациентов с патологией центральной нервной системы // *Физическая и реабилитационная медицина, медицинская реабилитация.* 2024. Т. 6, № 2. С. 172–187. [Belova AN, Sheiko GE, Rakhmanova EM. Hand function assessment: Tests for adult patients with central nervous system disorders. *Phys Rehabil Medicine, Medical Rehabil.* 2024;6(2):172–187]. EDN: QKMHPQ doi: 10.36425/rehab625507
22. Ada L, Canning CG, Low SL. Stroke patients have selective muscle weakness in shortened range. *Brain.* 2003;126(3):724–731. doi: 10.1093/brain/awg066
23. Santos PS, Santos EG, Monteiro LC, et al. The hand tremor spectrum is modified by the inertial sensor mass during lightweight wearable and smartphone-based assessment in healthy young subjects. *Sci Rep.* 2022;12(1):16808. doi: 10.1038/s41598-022-21310-4
24. Pourahmadi MR, Takamjani IE, Sarrafzadeh J, et al. Reliability and concurrent validity of a new iPhone® goniometric application for measuring active wrist range of motion: A cross-sectional study in asymptomatic subjects. *J Anat.* 2017;230(3):484–495. doi: 10.1111/joa.12568
25. Patel S, Hughes R, Hester T, et al. A novel approach to monitor rehabilitation outcomes in stroke survivors using wearable technology. *Proc IEEE.* 2010;98(3):450–461. doi: 10.1109/jproc.2009.2038727
26. McDonnell MN, Hillier SL, Ridding MC, Miles TS. Impairments in precision grip correlate with functional measures in adult hemiplegia. *Clin Neurophysiol.* 2006;117(7):1474–1480. doi: 10.1016/j.clinph.2006.02.027
27. Pérez R, Costa Ú, Torrent M, et al. Upper limb portable motion analysis system based on inertial technology for neurorehabilitation purposes. *Sensors.* 2010;10(12):10733–10751. doi: 10.3390/s101210733

## ОБ АВТОРАХ

Автор, ответственный за переписку:

**Лобунько Данила Александрович;**

адрес: Россия, 117513, Москва,  
ул. Островитянова, д. 1, стр. 10;  
ORCID: 0009-0009-7741-2904;  
eLibrary SPIN: 6226-5283;  
e-mail: doctorlobunko@gmail.com

Соавторы:

**Скворцов Дмитрий Владимирович,** д-р мед. наук;  
ORCID: 0000-0002-2794-4912;  
eLibrary SPIN: 6274-4448;  
e-mail: skvortsov.biom@gmail.com

**Иванова Галина Евгеньевна,** д-р мед. наук;  
ORCID: 0000-0003-3180-5525;  
eLibrary SPIN: 4049-4581;  
e-mail: reabilivanova@mail.ru

## AUTHORS' INFO

The author responsible for the correspondence:

**Danila A. Lobunko;**

address: 1/10 Ostrovityanova street,  
117342 Moscow, Russia;  
ORCID: 0009-0009-7741-2904;  
eLibrary SPIN: 6226-5283;  
e-mail: doctorlobunko@gmail.com

Co-authors:

**Dmitry V. Skvortsov,** MD, PhD;  
ORCID: 0000-0002-2794-4912;  
eLibrary SPIN: 6274-4448;  
e-mail: skvortsov.biom@gmail.com

**Galina E. Ivanova,** MD, PhD;  
ORCID: 0000-0003-3180-5525;  
eLibrary SPIN: 4049-4581;  
e-mail: reabilivanova@mail.ru