

УДК 612.821

МЕТОД ОБЪЕКТИВНОЙ ОЦЕНКИ ПРОПРИОЦЕПТИВНОГО ВОСПРИЯТИЯ ДВИЖЕНИЙ ГОЛЕНИ И СТОПЫ У ЧЕЛОВЕКА

© 2023 г. О. Г. Павлова^{1, *}, В. Ю. Рошин^{1, 2, 3}, С. Е. Хатькова⁴,
Е. А. Николаев⁴, В. А. Селионов⁵, И. А. Солопова⁵, Н. В. Ичетовкина⁶

¹ФГБУН Институт высшей нервной деятельности и нейрофизиологии РАН, Москва, Россия

²ООО “НейроБиоЛаб”, Москва, Россия

³ФГБУН ГНЦ РФ – Институт медико-биологических проблем РАН, Москва, Россия

⁴Лечебно-реабилитационный центр Минздрава РФ, Москва, Россия

⁵ФГБУН Институт проблем передачи информации
имени А.А. Харкевича РАН, Москва, Россия

⁶ФГАОУ ВО Российский национальный исследовательский медицинский университет
имени Н.И. Пирогова, Москва, Россия

*E-mail: pavlovao@mail.ru

Поступила в редакцию 30.09.2022 г.

После доработки 01.11.2022 г.

Принята к публикации 18.11.2022 г.

Авторы данной статьи ранее разработали метод объективной оценки состояния проприоцептивно-го восприятия движений верхней конечности. С целью апробации этого метода для оценки проприоцептивного восприятия движений нижних конечностей исследована точность копирования с открытыми и закрытыми глазами серии пассивных односуставных движений тестируемой ноги, непосредственно во время их выполнения, с помощью активных движений другой ноги. Копирование сгибаний-разгибаний в коленном и голеностопном суставах исследовали у 30 здоровых испытуемых для обеих ног и у 40 пациентов с односторонним парезом центрального генеза для паретичной ноги. Точность копирования движений оценивали по записям углов в тестируемом суставе и одноименном суставе противоположной конечности с использованием качественных и количественных объективных показателей. Показано, что здоровые испытуемые как под зрительным контролем, так и без него с высокой точностью и практически одновременно копируют пассивные движения правой и левой ног. На основе исследования значений качественных и количественных показателей точности копирования сформулирован объективный условный критерий сохранности проприоцептивного восприятия движений в коленном и голеностопном суставах. В отличие от здоровых испытуемых, в группе пациентов результаты копирования с открытыми и закрытыми глазами значительно отличались. В отсутствие зрительного контроля большинство пациентов либо допускали грубые ошибки в передаче направления и числа тестируемых движений, либо воспроизводили движения со значительным ухудшением точности (увеличенными задержками, искажением формы и др.). В тестах с открытыми глазами пациенты копируют движения качественно правильно, что указывало на то, что они понимали двигательную задачу теста и способны были выполнить ее условно-здоровой ногой. Показано, что проприоцептивное восприятие движений в голеностопном суставе нарушалось чаще и сильнее, чем в коленном суставе. В соответствии с выработанным условным критерием нормы нарушение проприоцептивного восприятия движений в коленном и/или голеностопном суставах выявлено у 69% пациентов.

Ключевые слова: проприоцепция, метод оценки, нижняя конечность, инсульт.

DOI: 10.31857/S0131164622600859, **EDN:** MWKKVC

Под проприоцептивной чувствительностью (ПЧ) понимают ощущение взаимного положения и движений конечностей и тела, которое формируется в центральной нервной системе на основе информации от мышечных, сухожильных, суставных и кожных рецепторов [1]. ПЧ играет важную роль в управлении движениями и двигательном обучении [2, 3].

По данным разных литературных источников у 19–47% пациентов с гемипарезом центрального генеза выявляют дефицит ПЧ в нижних конечностях [4–6]. Степень сохранности ПЧ у постинсультных пациентов служит важным прогностическим показателем возможности восстановления двигательных функций [7, 8]. В частности, степень сохранности проприоцептивного вос-

приятия движений в голеностопном суставе рассматривается как важнейший фактор, влияющий на поддержание равновесия при ходьбе [9].

Существуют различные методы, позволяющие оценивать наличие и степень нарушений проприоцептивного восприятия положения и движений отдельных сегментов нижних конечностей [10]. Для пациентов с гемипарезом используют преимущественно два метода.

Первый основан на определении точности копирования положения сегмента тестируемой конечности в отсутствие зрительного контроля [11]. Используют три варианта тестирования: а) пациенту с закрытыми глазами пассивно перемещают тестируемый сегмент конечности в определенное (целевое) положение, потом его просят воспроизвести такое же положение другой конечностью; б) тестируемый сегмент возвращают в исходное положение, и после этого целевое положение воспроизводится другой конечностью; в) после возвращения тестируемого сегмента в исходное положение, при повторном его смещении в направлении целевого положения, пациент демонстрирует распознавание достижения целевого положения речевым или двигательным сигналом. Недостатком метода является то, что он позволяет судить только о восприятии положения, но не движений. Кроме этого, на результаты отсроченного воспроизведения влияет кинестетическая память. Показано, что даже у здоровых испытуемых с увеличением времени отставления точность воспроизведения ухудшается [12]. А у пациентов с повреждением головного мозга дополнительно могут иметься и нарушения кинестетической памяти.

Второй метод, основанный на измерениях порогов чувствительности величины и скорости смещения в суставе [13–15], дает оценку и статической, и динамической чувствительности. Ограничением метода является то, что измерения проводятся при минимальных смещениях и скоростях, что не позволяет судить о качестве восприятия движений в естественном диапазоне функционально значимых движений. К тому же, тестирование этими методами можно проводить только в лабораторных условиях, поскольку для измерений требуется громоздкая аппаратура, специализированная для исследования движений в разных суставах.

В широкой клинической практике в настоящее время для оценки ПЧ чаще всего используют упрощенный тест “up-down”. Для того чтобы выяснить, чувствует ли испытуемый положение и движение определенного сегмента конечности, его просят закрыть глаза, пассивно перемещают сегмент вверх или вниз и просят описать это перемещение вербально или повторить его другой конечностью. На подобном тестировании базируется ряд балльных шкал оценки ПЧ [16–18].

Такое тестирование критикуется за недостаточную чувствительность, неточность и субъективность [19]. В этой связи разработка объективных и вместе с тем доступных методов исследования ПЧ является важной научно-практической задачей.

Ранее нами был предложен простой и наглядный способ объективной оценки проприоцептивного восприятия движений сегментов верхних конечностей (О.Г. Павлова, В.Ю. Рошин, М.В. Сидорова. Патент на изобретение. Способ объективной оценки проприоцептивной чувствительности в отдельных суставах конечностей у человека. Патент на изобретение № 2713454 РФ. Опубликовано 05.02.2020 Бюл. № 4) [20], который дает полное представление о том, насколько быстро, точно и уверенно испытуемый воспринимает тестируемое движение. Метод имеет две важные особенности: 1) пациенту предлагают в отсутствие зрительного контроля копировать здоровой рукой пассивные движения исследуемой конечности не после, а непосредственно во время их выполнения; 2) тестируется восприятие не одиночных смещений сегмента конечности, а серии отличающихся по амплитуде и скорости циклических движений в определенном суставе. Такое копирование не задействует кинестетическую память. Точность копирования оценивается на основе анализа записей копирующих и пассивных движений с использованием объективных пространственно-временных качественных и количественных показателей. На репрезентативной группе здоровых испытуемых было показано, что при сохранной ПЧ копирование пассивных тест-движений руки происходит точно и практически одновременно. Были получены оценки нормативных границ для количественных пространственно-временных показателей точности копирования, соответствующие сохранной ПЧ.

Обследование предложенным методом ПЧ верхних конечностей у постинсультных пациентов с гемипарезом показало, что более чем у 70% из них точность копирования движений отдельных сегментов паретичной руки по качественным и количественным показателям отличалась от здоровых, что указывало на наличие у них проприоцептивного дефицита.

С целью апробации предложенного метода для исследования ПЧ в нижних конечностях в настоящей работе проведена сравнительная оценка качественных и количественных показателей точности копирования движений голени и стопы у здоровых испытуемых и пациентов с гемипарезом.

МЕТОДИКА

В исследовании участвовали 30 здоровых испытуемых: 18 женщин и 12 мужчин в возрасте от

Таблица 1. Характеристики пациентов

Показатели		Сторона пареза	
		правая (<i>n</i> = 19)	левая (<i>n</i> = 21)
Пол		М 13, Ж 6	М 15, Ж 6
Возраст		54.4 (22–72)	50.1 (19–73)
Тип повреждения: [ИИ, ГИ, ЧМТ]		[12, 6, 1]	[12, 9, 0]
Период после инсульта: [О, ПО, РВ, ПВ, ОП]		[0, 3, 4, 7, 5]	[0, 4, 5, 7, 5]
Мышечная сила сгибателей/разгибателей по шкале <i>MRC</i> [0, 1, 2, 3, 4, 5]	КоСР	[0, 2, 7, 7, 3, 0]/ [0, 0, 1, 3, 8, 7]	[0, 2, 5, 9, 5, 0]/ [0, 0, 1, 2, 6, 12]
	ГсСР	[4, 5, 4, 5, 1, 0]/ [0, 4, 2, 4, 8, 1]	[2, 6, 7, 3, 3, 0]/ [0, 0, 1, 6, 11, 3]
Когнитивные нарушения по шкале <i>MoCA</i> : [отс., сл., ум., выр.]		[5, 4, 9, 1]	[2, 0, 6, 13]
Локализация повреждений мозга (по результатам МРТ)		СМАл 15, ВБК 3, (СМАл + ВБК) 1	СМАп 20, ВБК 1

Примечание: М – мужчины, Ж – женщины; ИИ – ишемический инсульт, ГИ – геморрагический инсульт, ЧМТ – черепно-мозговая травма; О – острый, ПО – подострый, РВ – ранний восстановительный, ПВ – поздний восстановительный, ОП – отдаленных последствий; КоСР – сгибание-разгибание в коленном суставе, ГсСР – сгибание-разгибание в голеностопном суставе; отс. – отсутствие, сл. – слабые, ум. – умеренные, выр. – выраженные; СМА – бассейн Средне-мозговой артерии, ВБК – бассейн Вентробазального комплекса, п – справа, л – слева.

25 до 79 лет ($48/1 \pm 17$) и 40 пациентов с гемипарезом центрального генеза, обучающихся ходьбе: 12 женщин и 28 мужчин в возрасте от 19 до 73 лет ($52/5 \pm 14/6$). Все испытуемые были правшами. Здоровые испытуемые были отобраны из штата сотрудников ИВНД и НФ РАН и ЛРЦ МЗ России, пациенты – из проходивших реабилитацию в ЛРЦ МЗ России (г. Москва).

Критериями включения для здоровых испытуемых и пациентов являлись: возраст от 18 до 80 лет, отсутствие неврологических и ортопедических нарушений, ограничивающих функциональный диапазон пассивных движений в суставах обеих ног; для пациентов также: односторонний верифицированный церебральный инсульт или внутричерепная травма, сопровождавшиеся парезом ноги, способность без усилий удерживать спину без опоры в положении сидя в течение 7–10 мин обследования.

Критериями исключения были: двусторонний инсульт, мышечный тонус голени и/или стопы более 3 баллов по шкале *Ashworth* [21]; состояние пациента, требующее, по мнению врача, прекращения исследования.

У всех пациентов по шкале *MRC* [22] оценивали силу мышц, осуществляющих сгибание и разгибание в коленном суставе (КоСР) и тыльное и подошвенное сгибания стопы, в дальнейшем называемые сгибаниями-разгибаниями в голеностопном суставе (ГсСР). По 30-балльной шкале *MoCA* [23] проводили оценку состояния когни-

тивных функций. Характеристики обследованных пациентов приведены в табл. 1.

Для исследования ПЧ испытуемого усаживали на высокую жесткую кушетку (кровать) так, чтобы ноги свободно свисали вниз и не касались пола даже при максимальном подошвенном сгибании (рис. 1). Ногам придавали симметричное положение. Из этого исходного положения за 10–25 с исследователь производил серию из 3–5 циклов плавных, разных по амплитуде сгибательно-разгибательных движений в исследуемом суставе (рис. 2). Движения в коленном суставе осуществлялись в диапазоне 90° (от исходного положения до полного разгибания), в голеностопном – в пределах общего размаха сгибательно-разгибательных движений 60° – 70° . Способ выполнения пассивных движений не отличался от общепринятого в тесте “*up down*”. Непосредственно во время выполнения пассивных движений испытуемый, согласно заранее полученной инструкции, должен был по возможности точно копировать их движениями другой ноги в том же суставе. У здоровых испытуемых исследовали копирование пассивных движений обеих ног, у пациентов – паретичной ноги.

Каждое исследование начинали с предварительного теста с открытыми глазами, когда испытуемого просили зрительно отслеживать пассивные движения. Если испытуемый копировал пассивные движения правильно, что свидетельствовало о том, что он понимает двигательную за-

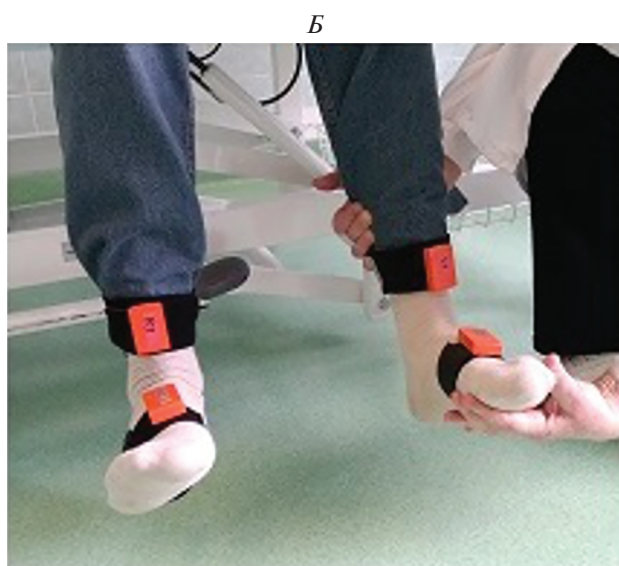


Рис. 1. Расположение беспроводных инерционно-магнитометрических сенсоров при регистрации движений в коленных (А) и голеностопных (Б) суставах.

В ходе тестирования регистрировали углы в исследуемом суставе и одноименном суставе другой ноги с помощью системы *ProprioSense* (ООО “НейроБиоЛаб”, Россия), использующей беспроводные инерционно-магнитометрические сенсоры (рис. 1), или суставных гониометров. Подробно эти способы регистрации описаны в работе [20].

По записям суставных углов оценивали степень схожести пассивных и активных движений. Сначала определяли наличие качественных ошибок копирования (правильность суставной локализации, направления и количества движений), а при их отсутствии для определения точности копирования использовали четыре количественных показателя [20]: 1) коэффициент амплитуды (*Камп*) — среднее по тесту отношение размахов активных движений к пассивным, 2) коэффициент формы (*Кфор*), отражающий точность передачи формы циклических движений, 3) латентность начала копирования (*Кнлат*) и 4) среднюю в пределах теста латентность повторных циклических копирующих движений (*Кцлат*).

Для каждого количественного показателя определяли нормативные границы так, чтобы включать 90% его значений по исследованной группе. Они ограничивались 5-м и 95-м процентилями распределения для *Камп* и 90-м для *Кнлат*, *Кцлат* и *1-Кфор*. На основе анализа значений качественных и количественных показателей точности копирования с закрытыми глазами движений голени и стопы, полученных на группе здоровых испытуемых, вырабатывали условный критерий нормы ПЧ.

Оценку степени сохранности проприоцептивного восприятия движений голени и стопы паретичной ноги у пациентов проводили на основе сравнения показателей точности копирования тест-движений с закрытыми глазами с нормативными значениями.

По качественным и количественным показателям сравнивали точность копирования с открытыми и закрытыми глазами в группах здоровых и пациентов, а также между этими группами. Для оценки достоверности различий количественных показателей точности копирования использовали непараметрические методы статистики (критерии Уилкоксона и Манна-Уитни). Для *Кфор* предварительно производили нормализацию с помощью преобразования Фишера:

$$z(F) = \lg((1+r)/(1-r))/2.$$

В качестве статистически значимых принимали различия с $p < 0.01$.

дачу и способен выполнить ее противоположной конечностью, проводили основной тест с закрытыми глазами.

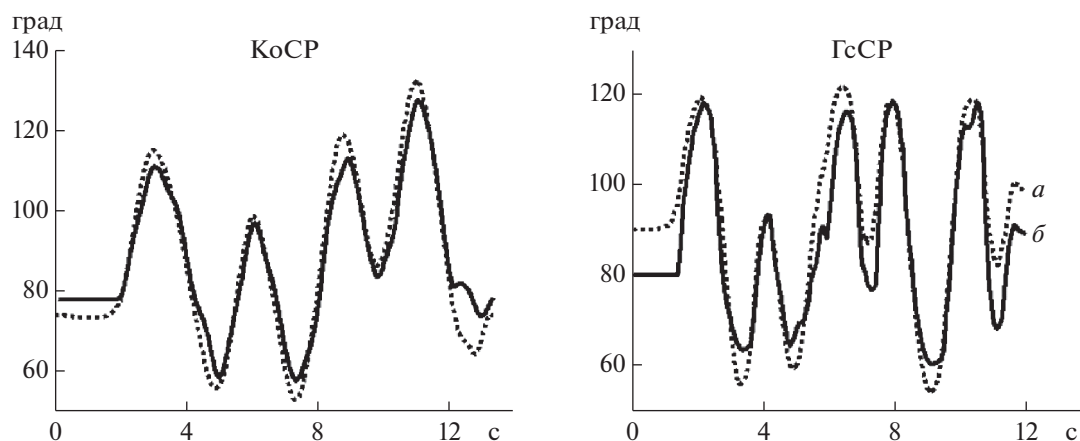


Рис. 2. Примеры записей суставных углов при копировании с закрытыми глазами тестовых сгибательно-разгибательных движений в коленном (КоСР) и голеностопном (ГсСР) суставах у здоровых испытуемых. *а* — тестирующие пассивные, *б* — копирующие активные движения.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Показатели точности копирования у здоровых испытуемых. Копирование всех тест-движений как с открытыми, так и с закрытыми глазами здоровые испытуемые выполнили без качественных ошибок. То есть, копирующие активные и копируемые пассивные движения не отличались по своей суставной локализации, направлению и числу. При этом повторяющиеся пассивные и активные движения зрительно воспринимались как одновременные. В качестве примера на рис. 2 показаны временные зависимости суставных углов при копировании с закрытыми глазами сгибаний-разгибаний в коленном и голеностопном суставах.

Проведенные по каждому тесту сравнения значений количественных показателей точности копирования (*Камп*, *Кфор*, *Кнлат*, *Кцлат*) движений правой и левой ног не выявили между ними значимых различий как в тестах с открытыми, так и с закрытыми глазами. На этом основании результаты тестирования движений по обеим ногам среди здоровых испытуемых были объединены в одну группу.

Для оценки фактора возраста на результаты тестирования было проведено сравнение точности копирования у здоровых испытуемых от 25 до 45 ($n = 14$) и от 46 до 79 лет ($n = 16$). Достоверных различий между этими подгруппами не было установлено ни по одному из 4-х количественных показателей.

Количественные показатели точности копирования движений голени и стопы под зрительным контролем и без него, зарегистрированные в группе здоровых испытуемых, представлены в виде распределений на рис. 3. Медианные значения количественных показателей указаны в табл. 2.

Сравнение количественных показателей точности копирования с открытыми и закрытыми глазами движений стопы не выявило между ними достоверных различий. Копирование движений голени с закрытыми глазами по показателям *Кфор* и *Кнлат* было достоверно точнее, чем с открытыми.

Вместе с тем, во всех тестах воспроизведение формы движений у здоровых испытуемых отличалось высокой точностью. Отклонения от единицы *Кфор* были очень малы. Как показано на графиках рис. 3, при копировании с закрытыми глазами 90% значений *1-Кфор* в тестах КоСР не превышали 0.052, а в тестах ГсСР — 0.072. Медианные значения *1-Кфор* в тестах КоСР, проведенных под зрительным контролем и без него, составляли 0.026 и 0.020, в тестах ГсСР — соответственно 0.035 и 0.036.

Зарегистрировано существенное различие латентностей воспроизведения начального в серии и последующих циклических движений (рис. 3). Так, в 90% тестов КоСР и ГсСР, выполненных с закрытыми глазами, значения *Кнлат* не превосходили соответственно 410 и 526 мс, а *Кцлат* — 72.5 и 70 мс. Эти различия отражены и в медианных значениях *Кнлат* и *Кцлат* для обоих тестов, проведенных с открытыми и закрытыми глазами (табл. 2). Следует отметить, что в некоторых тестированиях копирование повторяющихся циклических движений выполнялось с нулевым значением *Кцлат*, а иногда копирующие активные движения опережали тестирующие пассивные на 10–40 мс.

Анализ полученных значений количественных показателей точности копирования с закрытыми глазами у здоровых испытуемых выявил, что в 60% тестов КоСР и 72% тестов ГсСР значения всех 4-х показателей лежали в пределах принятых

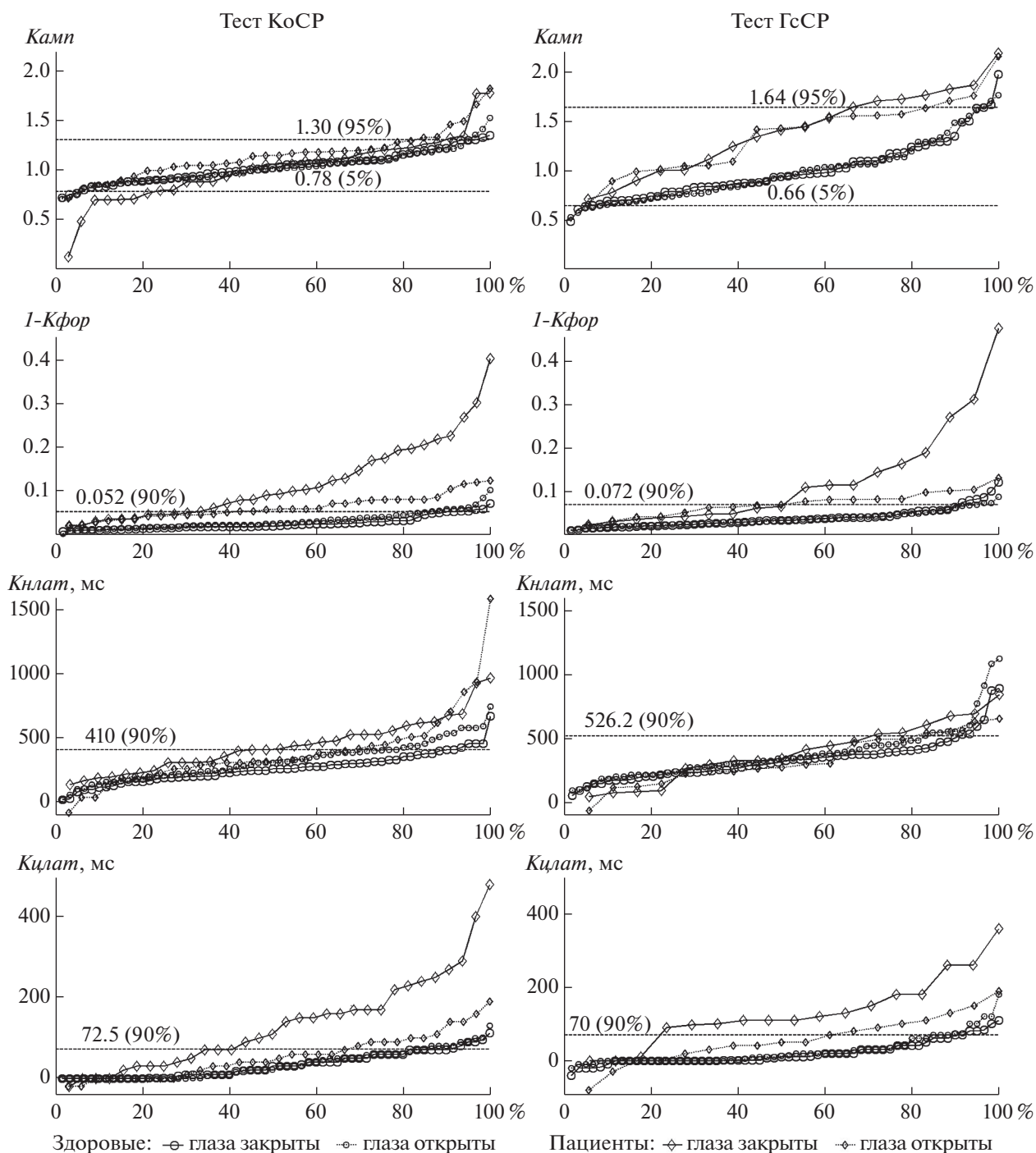


Рис. 3. Распределения значений количественных показателей точности копирования с закрытыми (ГЗ) и открытыми (ГО) глазами тест-движений в коленном (КоСР) и голеностопном (ГсСР) суставах у здоровых испытуемых и пациентов с гемипарезом. Горизонтальные пунктирные линии — нормативные границы значений количественных показателей с указанными значениями соответствующих перцентилей.

нормативных границ. Выход за эти границы значения какого-либо одного показателя был обнаружен соответственно в 20 и 28%, любых двух показателей — в 2 и 8% тестов. Ни в одном из тестов

за нормативные границы не выходили значения трех и более показателей.

Исходя из полученных данных, за условный критерий нормы (УКН) степени сохранности ПЧ

Таблица 2. Медианные значения количественных показателей точности копирования тест-движений в коленном (КоСР) и голеностопном (ГсСР) суставах с открытыми (ГО) и закрытыми (ГЗ) глазами у здоровых испытуемых и пациентов

Испытуемые	Тесты		Камп	1-Кфор	Кнлат	Кцлат
Здоровые	КоСР	ГО ($n = 60$)	1.01	0.026	310	26
		ГЗ ($n = 60$)	1.03	0.020	260	30
	ГсСР	ГО ($n = 60$)	0.95	0.035	350 ($n = 59$)	14
		ГЗ ($n = 60$)	0.95	0.036	330	10
Пациенты	КоСР	ГО ($n = 33$)	1.14	0.058	330	50
		ГЗ ($n = 33$)	1.05	0.094	420 ($n = 31$)	125
	ГсСР	ГО ($n = 18$)	1.45	0.075	290	50
		ГЗ ($n = 18$)	1.44	0.090	385	110 ($n = 17$)

Примечание: КоСР — сгибание-разгибание в коленном суставе, ГсСР — сгибание-разгибание в голеностопном суставе; Камп — коэффициент амплитуды, Кфор — коэффициент формы, Кнлат — латентность начала копирования, Кцлат — средняя латентность повторных циклических копирующих движений.

для тестов КоСР и ГсСР было принято выполнение копирования без ошибок качественного характера и выходом за пределы нормативных границ значений не более чем двух из четырех количественных показателей.

Показатели точности копирования у пациентов. Копирование под зрительным контролем во всех тестах КоСР и в 39 из 40 тестов ГсСР пациенты выполнили без качественных ошибок. Один пациент допустил грубые искажения при копировании движения в голеностопном суставе, и в дальнейшем тест ГсСР с закрытыми глазами у него не проводили. Качественно правильное копирование движений паретичной ноги с открытыми глазами в 79 из 80 тестов показало, что в 98.8% случаев пациенты понимали двигательную задачу теста и были способны выполнить ее условно-здоровой ногой.

В отсутствие зрительного контроля копирования движений в группе пациентов ухудшалось. У многих из них были выявлены качественные ошибки воспроизведения. Степень нарушения копирования была разной. При наиболее грубых нарушениях активные движения отсутствовали или выполнялись без всякой связи с пассивными (рис. 4 — П40). При этом пациенты сообщали о том, что, либо вообще не чувствуют тестовых движений, либо чувствуют, что с исследуемым сегментом ноги что-то происходит, но не понимают, что именно. Часто ошибки копирования проявлялись в неправильной передаче направления и числа пассивных движений (рис. 4 — П38 и П35). В таких случаях пациенты сообщали, что они неуверенно чувствуют тест-движения. Качественные ошибки копирования в тестах КоСР были обнаружены у 17.5% ($n = 7$), в тестах ГсСР — у 54% ($n = 21$) пациентов.

Таким образом, в отсутствие зрительного контроля качественно правильные копирования дви-

жений голени смогли выполнить 82.5% ($n = 33$), стопы — 46% ($n = 18$) пациентов. Проведенная у этих пациентов количественная оценка точности копирования с открытыми и закрытыми глазами показала, что под зрительным контролем движения голени были воспроизведены достоверно, точнее по форме (1-Кфор) и с меньшими задержками (Кцлат) (рис. 3, табл. 2).

Сравнение количественных показателей схожести активных и пассивных движений у указанных пациентов и здоровых испытуемых выявило, что в обоих тестах, проведенных как с открытыми, так и закрытыми глазами, пациенты копируют тест-движения менее точно, чем здоровые испытуемые. Так, у пациентов установлены достоверно более высокие значения для Камп и 1-Кфор в обоих тестах с открытыми глазами, для 1-Кфор, Кцлат и Кнлат в тесте КоСР и Камп, 1-Кфор и Кцлат в тесте ГсСР при копировании с закрытыми глазами.

Как видно на графиках рис. 3, в группе пациентов доля полученных значений количественных показателей, выходящих за пределы нормативных границ, в тестах КоСР и ГсСР составила соответственно: для Камп — 33 и 39%, Кфор — 70 и 50%, Кнлат — 52 и 33%, Кцлат — 59 и 82%.

Сравнение степени сохранности проприоцептивного восприятия движений голени и стопы у пациентов. Из 39 пациентов, прошедших оба теста, только у 31% ($n = 12$) точность копирования с закрытыми глазами движений в коленном и голеностопном суставах соответствовала УКН.

У 69% ($n = 27$) пациентов был установлен дефицит ПЧ. Из них у 49% было обнаружено нарушение проприоцептивного восприятия движений и в коленном, и в голеностопном суставах, у 20% — только в голеностопном суставе.

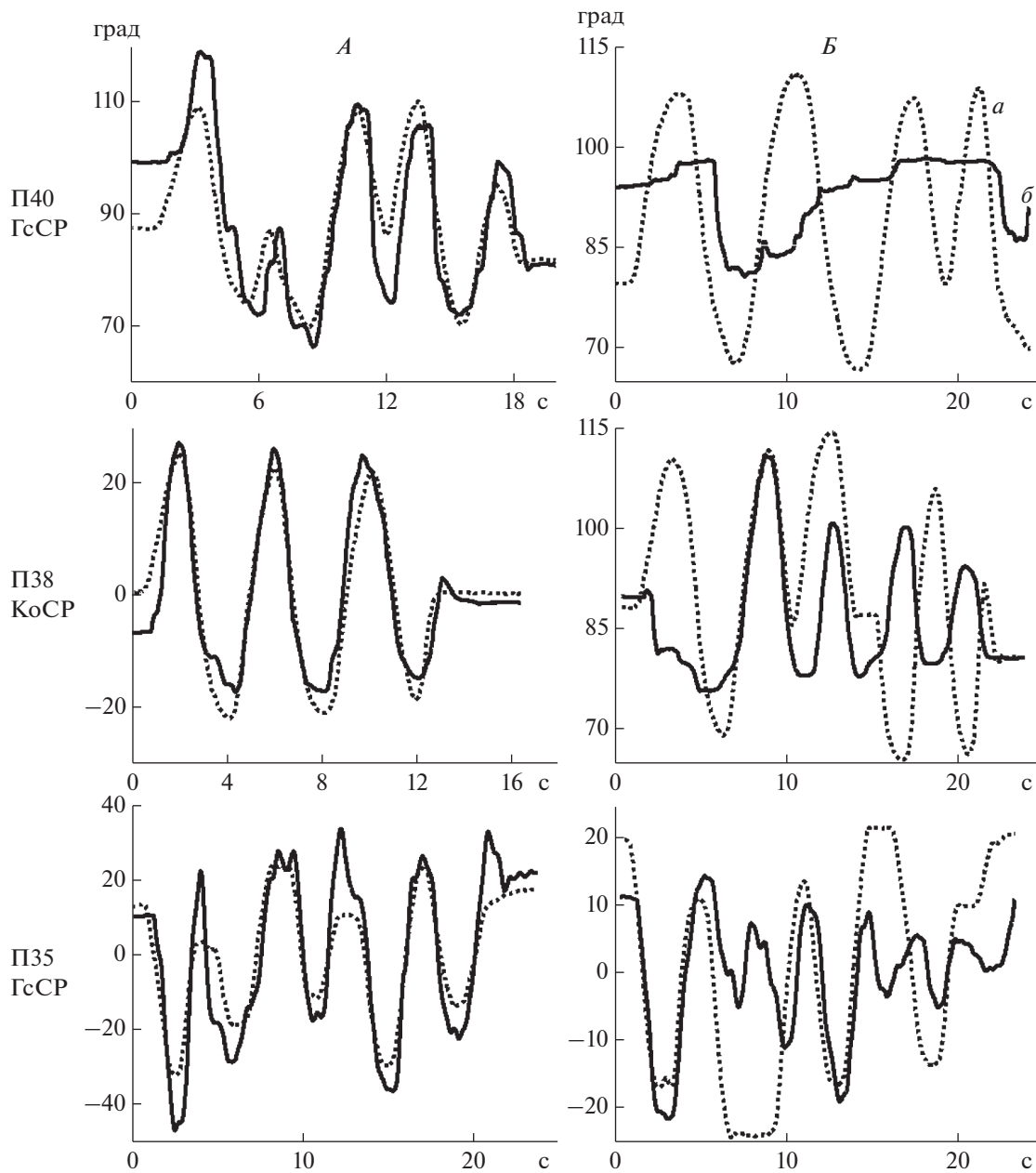


Рис. 4. Примеры записей суставных углов при копировании с открытыми (А) и закрытыми (Б) глазами тест-движений КоСР и ГсСР у пациентов с гемипарезом. Обозначения см. рис. 2.

60% нарушений ПЧ в голени и стопе было выявлено на основе качественных ошибок копирования, а остальные 40% — только по количественным показателям. Установлено, что пациенты, выполнившие 40% копирований недостаточно точно с закрытыми глазами, в тестах с открытыми глазами те же движения воспроизвели в 84% случаев ($n = 16$) в соответствии с нормой (УКН), а в 16% ($n = 3$) — по всем 4 количественным показателям точнее, чем с закрытыми глазами. Эти данные указывают на то, что причиной недостаточно

точных по количественным показателям копирований являлся проприоцептивный дефицит, а не функциональные недостатки копирующей условно-здоровой ноги.

Дополнительно была проведена оценка состояния ПЧ паретичной ноги у пациентов с локализацией очага повреждения в левом (ЛП, $n = 19$) и правом (ПП, $n = 21$) полушариях. Относительное число тестов КоСР и ГсСР, в которых был установлен проприоцептивный дефицит, у ЛП-пациентов составляло 56% ($n = 23$), у ПП-пациентов —

63% ($n = 24$) (рис. 5). При этом доля более грубых нарушений ПЧ, выявленных на основе качественных ошибок копирования, у ЛП-пациентов составляла 27%, у ПП-пациентов — 45%. Однако различия по обоим показателям у ЛП- и ПП-пациентов не были статистически значимыми ($>5\%$).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Проведенное исследование показало, что здоровые испытуемые с высокой точностью и практически одновременно способны передавать восприятие пассивных движений голени и стопы одной ноги с помощью активных копирующих движений другой ноги на основе совместной зрительной и проприоцептивной или только проприоцептивной информации.

Копирование движений голени и стопы как с открытыми, так и закрытыми глазами по своей точности сопоставимо с исследованным ранее копированием односуставных движений руки [20]. Несмотря на то, что повторяющиеся пассивные тест-движения ноги варьировали по амплитуде и скорости, во всех тестах здоровые испытуемые точно воспроизводили форму движений.

Обнаружено сходство значений и временных параметров копирования движений ноги и руки. Латентности начала копирования (*Кнлат*) во много раз превышали латентности повторных циклических движений (*Килат*). Можно объяснить это тем, что начало воспроизведения первого в серии движения связано с запуском программы копирования, а последующих движений — только с ее корректировкой в ходе выполнения. Различие латентностей также может быть связано с состоянием мышц и мышечных рецепторов [1]. Первое движение в серии, в отличие от всех последующих, начинается из статического положения конечности, при котором возбудимость мышечных рецепторов ниже, а мышечные волокна более ригидны, чем в динамике.

Воспроизведение повторяющихся циклических движений в некоторых случаях без задержек, а иногда даже с небольшим опережением заставляет допустить участие в копировании механизма прогнозирования. У здоровых испытуемых такие опережения были незначительны и быстро корректировались, не влияя существенно на точность копирования.

В отличие от здоровых испытуемых в группе пациентов копирование движений ноги с открытыми и закрытыми глазами существенно отличалось. Несмотря на то, что у большинства пациентов (72%, $n = 29$) было отмечено умеренное или выраженное снижение когнитивных функций (табл. 1), они качественно правильно выполнили копирование под зрительным контролем. Это

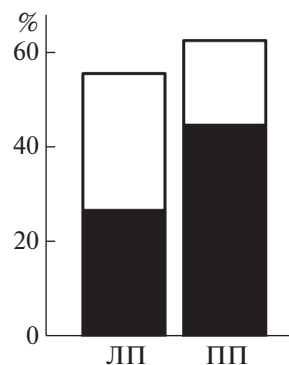


Рис. 5. Относительное число нарушений проприоцептивного восприятия движений паретичной ноги у пациентов с локализацией повреждения в левом (ЛП) и правом (ПП) полушариях. Темная закрашка — проприоцептивный дефицит, выявленный по качественным, светлая — только по количественным ошибкам копирования.

означало, что эти пациенты способны были понять и выполнить процедуру предлагаемого теста. В отсутствие зрительного контроля более половины пациентов допустили качественные ошибки копирования тест-движений. Так как в тестах с открытыми глазами эти движения были воспроизведены качественно верно, есть все основания считать, что ошибки копирования с закрытыми глазами были обусловлены нарушениями ПЧ.

Качественные ошибки копирования можно связать с грубыми нарушениями ПЧ. На основании таких ошибок были выявлены 60% установленных случаев дефицита ПЧ у пациентов. Эти ошибки можно было легко обнаружить при простом наблюдении, без использования технических средств для регистрации суставных углов. Вместе с тем, значительную часть (40%) менее выраженных нарушений ПЧ удалось установить только с помощью инструментальной количественной оценки точности копирования движений.

В целом в проведенном исследовании проприоцептивный дефицит в сегментах нижних конечностей был выявлен у 69% пациентов. Этот показатель выше, чем при тестировании ПЧ другими способами: 19% [4], 24% [5], 47% [6], что указывает на высокую выявляющую способность предложенного метода.

Сравнение копирования движений с открытыми и закрытыми глазами показало разный вклад зрения в восприятие движений у здоровых испытуемых и пациентов с нарушением ПЧ. Так в группе здоровых точность копирования на основе проприоцепции (с закрытыми глазами) была такой же, как при дополнительном участии зрения (в тестах ГсСР) или даже точнее (в тестах КоСР). В группе пациентов, у тех из них, кто в тестах с закрытыми глазами допускал качественные ошибки

ки копирования, воспроизведение тест-движений под зрительным контролем было качественно верным. У тех, кто качественно правильно копировал движения как в тестах с открытыми, так и с закрытыми глазами, копирование под зрительным контролем по количественным показателям было более точным. Эти данные подтверждают важную компенсаторную роль зрения в восприятии движений у лиц с нарушенной проприоцепцией.

Известно [24], что при различных повреждениях головного мозга двигательные функции страдают, прежде всего, в дистальных отделах конечностей. Ранее нами было показано [25], что у постинсультных пациентов проприоцептивное восприятие движений кисти нарушается чаще и сильнее, чем плеча и предплечья. Проведенное исследование показало, что эта закономерность распространяется и на нижние конечности: нарушение ПЧ сильнее затрагивает дистальный сегмент ноги (стопу), чем более проксимальный (голень).

Согласно существующим представлениям [26–28] ведущую роль в обработке проприоцептивной информации и формировании схемы тела играют структуры правого полушария мозга. С этим связывают более частое проявление проприоцептивного дефицита у правополушарных пациентов. В нашей работе не было обнаружено достоверных отличий в состоянии ПЧ паретичной ноги у пациентов с очагами повреждения в правом и левом полушариях. Однако и у тех, и у других частота нарушений ПЧ была высока: 63 и 56%. Это указывает на необходимость тщательного тестирования ПЧ в нижних конечностях при любой локализации очага повреждения мозга.

Предложенный метод позволяет оценивать ПЧ у широкого контингента пациентов с неврологическими и ортопедическими проблемами голени и стопы. Ограничением метода является то, что он может быть использован только у пациентов с односторонним нарушением двигательных функций конечностей.

ВЫВОДЫ

1. Здоровый человек в отсутствие зрительного контроля, только на основе проприоцепции способен точно и практически одновременно передавать ощущение пассивных движений в коленном и голеностопном суставах исследуемой ноги с помощью копирующих движений другой ноги.

2. На основе анализа значений качественных и количественных показателей точности копирования с закрытыми глазами движений голени и стопы у здоровых испытуемых сформулирован условный критерий нормы (УКН), позволяющий оценивать состояние ПЧ сегментов ноги у паци-

ентов с односторонним нарушением двигательных функций.

3. Доля пациентов с выявленным проприоцептивным дефицитом в нижних конечностях превышает приведенные в литературе показатели для постинсультных пациентов, что указывает на высокую эффективность предложенного метода исследования уровня сохранности ПЧ в нижних конечностях.

4. Тестирование ПЧ методом одновременного копирования доступно для пациентов даже со снижением когнитивных функций.

5. У постинсультных пациентов нарушение ПЧ дистального сегмента паретичной ноги (стопы) происходит чаще и выражено сильнее, чем более проксимального (голени).

Этические нормы. Все исследования проведены в соответствии с принципами биомедицинской этики, сформулированными в Хельсинкской декларации 1964 г. и ее последующих обновлениях и одобрены локальным этическим комитетом Института высшей нервной деятельности и нейрофизиологии РАН и Лечебно-реабилитационного центра Минздрава России (Москва).

Информационное согласие. Каждый участник исследования представил добровольное письменное информированное согласие, подписанное им после разъяснения ему потенциальных рисков и преимуществ, а также характера предстоящего исследования.

Финансирование работы. Работа выполнена в рамках госзадания Института высшей нервной деятельности и нейрофизиологии РАН (Москва).

Благодарности. Авторы выражают благодарность нейропсихологу Лечебно-реабилитационного центра МЗ России (Москва) Т.П. Рудаковой за помощь в обследовании пациентов.

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

Вклад авторов в публикацию. О.Г. Павлова — тестирование испытуемых, обработка данных, подготовка публикации; В.Ю. Рошин — регистрация движений с помощью беспроводных инерционно-магнитометрических сенсоров, обеспечение программ регистрации и обработки данных, подготовка публикации; Е.А. Николаев — клиническое обследование пациентов; С.Е. Хатькова — организация обследования пациентов неврологических отделений Лечебно-реабилитационного центра МЗ; В.А. Селионов — регистрация движений с помощью суставных гониометров у здоровых испытуемых; И.А. Солопова — регистрация движений с помощью суставных гониометров у здоровых испытуемых; Н.В. Ичетовкина — обработка данных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Proske U., Gandevia S.C.* The kinaesthetic senses // *J. Physiol.* 2009. V. 587. Pt. 17. P. 4139.
2. *Козловская И.Б.* Афферентный контроль произвольных движений. М.: Наука, 1976. 295 с.
3. *Ostry D.J., Darainy M., Mattar A.A. et al.* Somatosensory plasticity and motor learning // *J. Neurosci.* 2010. V. 30. № 15. P. 5384.
4. *Gorst T., Rogers A., Morrison S.C. et al.* The prevalence, distribution, and functional importance of lower limb somatosensory impairments in chronic stroke survivors: a cross sectional observational // *Disabil. Rehabil.* 2019. V. 41. № 20. P. 2443.
5. *Connell L.A., Lincoln N.B., Radford K.A.* Somatosensory impairment after stroke: frequency of different deficits and their recovery // *Clin. Rehabil.* 2008. V. 22. № 8. P. 758.
6. *Tyson S., Crow J.L., Connell L. et al.* Sensory impairments of the Lower Limb after Stroke: A Pooled Analysis of Individual Patient Data // *Top Stroke Rehabil.* 2013. V. 20. № 5. P. 441.
7. *Coupar F., Pollock A., Rowe P. et al.* Predictors of upper limb recovery after stroke: a systematic review and meta-analysis // *Clin. Rehabil.* 2012. V. 26. № 4. P. 291.
8. *Meyer S., Karttunen A.H., Thijs V. et al.* How do somatosensory deficits in the arm and hand relate to upper limb impairment, activity, and participation problems after stroke? A systematic review // *Phys. Ther.* 2014. V. 94. № 9. P. 1220.
9. *Cho J.-E., Kim H.* Ankle proprioception deficit is the strongest factor predicting balance impairment in patients with chronic stroke // *Arch. Rehabil. Res. Clin. Transl.* 2021. V. 3. № 4. P. 100165.
10. *Han J., Waddington G., Adams R. et al.* Assessing proprioception: A critical review of methods // *J. Sport Health Sci.* 2016. V. 5. № 1. P. 80.
11. *Goble D.J.* Proprioceptive acuity assessment via joint position matching: from basic science to general practice // *Phys. Ther.* 2010. V. 90. № 8. P. 1176.
12. *Paillard J., Drouchon M.* Active and passive movements in the calibration of position sense / *The Neuropsychology of Spatially Oriented Behavior* // Ed. Freedman S.J. Dorsey Press, Homewood III, 1968. Chap. 3. P. 37.
13. *Refshage R.V., Chan R., Taylor J.L., McCloskey D.I.* Detection of movements imposed on human hip, knee, ankle and toe joints // *J. Physiol. (London).* 1995. V. 488. Pt. 1. P. 231.
14. *Ageberg E., Flenhagen J., Ljung J.* Test-retest reliability of knee kinesthesia in healthy adults // *BMC Musculoskelet. Disord.* 2007. V. 8. P. 57.
15. *Yasuda K., Sato Y., Iimura N., Iwata H.* Allocation of attentional resources toward a secondary cognitive task leads to compromised ankle proprioceptive performance in healthy young adults // *Rehabil. Res. Prac.* 2014. V. 2014. P. 170304.
16. *Fugl-Meyer A.R., Jaasko L., Leyman I. et al.* The post-stroke hemiplegic patient I. A method for evaluation of physical performance // *Scand. J. Rehab. Med.* 1975. V. 7. № 1. P. 13.
17. *Stolk-Hornsveld F., Crow J.L., Hendriks E.P. et al.* The Erasmus MC modifications to the (revised) Nottingham Sensory Assessment: a reliable somatosensory assessment measure for patients with intracranial disorders // *Clin. Rehabil.* 2006. V. 20. № 2. P. 160.
18. *Winward Ch.E., Halligan P.W., Wade D.T.* The Rivermead Assessment of Somatosensory Performance (RASP): standardization and reliability data // *Clin. Rehabil.* 2002. V. 16. № 5. P. 523.
19. *Lincoln N., Crow J., Jackson J. et al.* The unreliability of sensory assessments // *Clin. Rehabil.* 1991. V. 5. № 4. P. 273.
20. *Павлова О.Г., Рошин В.Ю., Сидорова М.В. и др.* Метод качественной и количественной оценки восприятия движений в отдельных суставах руки // *Физиология человека.* 2018. Т. 44. № 4. С. 84.
Pavlova O.G., Roschin V.Yu., Sidorova M.V. et al. Method for qualitative and quantitative assessment of proprioceptive perception of single-joint arm movements // *Human Physiology.* 2018. V. 44. № 4. P. 445.
21. *Gregson J.M., Leathley M.J., Moore A.P.* Reliability of measurements of muscle tone and muscle power in stroke patients // *Age Ageing.* 2000. V. 29. № 3. P. 223.
22. *Dyck P.J., Boes Ch.J., Mulder D. et al.* History of standard scoring, notation, and summation of neuromuscular signs. A current survey and recommendation // *J. Peripher. Nerv. Syst.* 2005. V. 10. № 2. P. 158.
23. *Nasreddine Z.S., Phillips N.A., Bédirian V. et al.* The Montreal Cognitive Assessment, MoCA: a brief screening tool for mild cognitive impairment // *J. Am. Ger. Soc.* 2005. V. 53. № 4. P. 695.
24. *Taylor J.* Evolution and dissolution of the nervous system. Selected writings of John Hughlings Jackson. N.Y., Basic Books Inc., 1958. V. 22. P. 45.
25. *Павлова О.Г., Рошин В.Ю., Сидорова М.В. и др.* Объективная оценка сохранности проприоцептивного восприятия односуставных движений руки у пациентов с гемипарезом центрального генеза // *Вестник восстановительной медицины.* 2020. № 5(99). С. 79.
Pavlova O.G., Roschin V.Yu., Sidorova M.V. et al. Objective evaluation of proprioceptive perception of single-joint arm movements in patients with hemiparesis of central genesis // *Bulletin of Rehabilitation Medicine.* 2020. № 5(99). P. 79.
26. *Лурия А.Р.* Высшие корковые функции человека и их нарушения при локальных повреждениях мозга. М.: Изд. Московского университета, 1962. 432 с.
27. *Naito E., Roland P.E., Grefkes Ch. et al.* Dominance of the right hemisphere and role of area 2 in human kinesthesia // *J. Neurophysiol.* 2005. V. 93. № 2. P. 1020.
28. *Naito E., Nakashima T., Kito T. et al.* Human limb-specific and non-specific brain representations during kinesthetic illusory movements of the upper and lower extremities // *Eur. J. Neurosci.* 2007. V. 25. № 11. P. 3476.

Method of Objective Assessment of Proprioceptive Perception of Leg and Foot Movements in Humans

O. G. Pavlova^{a, *}, V. Yu. Roschin^{a, b, c}, S. E. Khat'kova^d, E. A. Nikolaev^d, V. A. Selionov^e,
I. A. Solopova^e, N. V. Ichetovkina^f

^a*Institute of Higher Nervous Activity and Neurophysiology of the RAS, Moscow, Russia*

^b*NeuroBioLab LLC, Moscow, Russia*

^c*Institute of Biomedical Problems of the RAS, Moscow, Russia*

^d*Medical Rehabilitation Centre of Russian Ministry of Health, Moscow, Russia*

^e*Institute for Information Transmission Problems of the RAS, Moscow, Russia*

^f*Pirogov Russian National Research Medical University, Moscow, Russia*

*E-mail: pavlovao@mail.ru

Previously, we developed a method for objective assessment of the state of proprioceptive perception of movements of the upper limb. In order to test this method for assessing the proprioceptive perception of lower limb movements, we studied the accuracy of copying with open and closed eyes a series of passive single-joint movements of the tested leg directly during their execution with the help of active movements of the other leg. Flexion-extension copying in the knee and ankle joints was studied in 30 healthy subjects for both legs and in 40 patients with unilateral stroke for the paretic leg. The accuracy of copying movements was assessed by recording the angles in the tested joint and the joint of the same name of the opposite limb using qualitative and quantitative objective indicators. It was shown that healthy subjects, both under visual control and without it, copy the passive movements of the right and left legs with high accuracy and almost simultaneously. Based on the study of the values of qualitative and quantitative indicators of copying accuracy, an objective conditional criterion for the preservation of proprioceptive perception of movements in the knee and ankle joints was formulated. In contrast to healthy subjects, in the group of patients, the results of copying with open and closed eyes were significantly different. In tests with open eyes, the copying of movements was qualitatively correct, which indicates that they understood the motor task of the test and were able to perform it with a conditionally healthy leg. In the absence of visual control, most of them either made gross errors in the transmission of the direction and number of the tested movements, or reproduced movements with a significant deterioration in accuracy (increased delays, shape distortion, etc.). It was shown that the proprioceptive perception of movements in the ankle joint was disturbed more often and more strongly than movements in the knee joint. In accordance with the developed conditional criterion of the norm, in 69% of patients there was a violation of the proprioceptive perception of movements in the knee and/or ankle joints.

Keywords: proprioception, assessment method, lower limb, stroke.