

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА КИНЕМАТИКИ ДВИЖЕНИЙ У ПАЦИЕНТОВ НЕЙРОХИРУРГИЧЕСКОГО ПРОФИЛЯ С ФУНКЦИОНАЛЬНЫМИ НАРУШЕНИЯМИ ОПОРНО-ДВИГАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

DOI: 10.17691/stm2019.11.3.11

УДК 612.766:796.012

Поступила 28.09.2018 г.

© **А.В. Царёва**, ассистент кафедры информационно-измерительных систем и технологий¹;
Ф.М. Соколова, к.пед.н., доцент, профессор кафедры физической реабилитации²;
П.Г. Королёв, к.т.н., доцент, зам. зав. кафедрой информационно-измерительных систем и технологий по научной работе¹;
Н.Е. Иванова, д.м.н., профессор, главный научный сотрудник, зав. научным отделом³;
В.В. Алексеев, д.т.н., профессор, зав. кафедрой информационно-измерительных систем и технологий¹

¹Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, 5, С.-Петербург, 197376;

²Национальный государственный университет физической культуры, спорта и здоровья им. П.Ф. Лесгафта, ул. Декабристов, 35, С.-Петербург, 190121;

³Российский научно-исследовательский нейрохирургический институт им. профессора А.Л. Поленова — филиал Национального медицинского исследовательского центра им. В.А. Алмазова, ул. Маяковского, 12, С.-Петербург, 191014

Цель исследования — оценить эффективность системы, предназначенной для определения результативности реабилитационных мероприятий у пациентов нейрохирургического профиля с функциональными нарушениями опорно-двигательного аппарата.

Материалы и методы. В 2017–2018 гг. проведен ряд исследований на базе Российского научно-исследовательского нейрохирургического института им. профессора А.Л. Поленова с участием 35 пациентов в возрасте от 30 до 70 лет с различными патологиями ЦНС и опорно-двигательного аппарата (паралеплегия, гемипарез, тетрапарез) и 15 здоровых добровольцев в возрасте от 20 до 45 лет.

Измерения проводили до начала реабилитации (2–3-й дни после операции) и на 3–4-й реабилитационные дни (5–6-й дни после операции) с помощью разработанной системы мониторинга кинематики движений, построенной на тринадцатиразрядном аналого-цифровом преобразователе с максимальной частотой дискретизации 46 кГц и погрешностью 0,1%. Система имеет два микромеханических датчика, каждый из которых содержит трехосевой акселерометр с диапазоном измерений 6 г. Датчики, соединенные с помощью кабеля с аналого-цифровым преобразователем, закрепляются на обуви — внешней стороне каждого каблука.

Данные, полученные с помощью измерительной системы, обрабатывали программой для ЭВМ («Программа идентификации фаз шага»).

Результаты. Идентифицированы фазы шага, рассчитаны длительности фаз, дана оценка математического ожидания и определено среднеквадратическое отклонение длительностей фаз. Приведены кинематические портреты пациентов.

По полученным кинематическим портретам сделаны выводы о положительной или отрицательной динамике реабилитации после применения комплекса упражнений.

Установлено, что длительности фаз для здорового человека находятся в пределах 20 мс, при этом прослеживается равномерное распределение разбросов среднеквадратического отклонения относительно фаз шага. Показаны отклонения длительностей и разброса фаз пациентов относительно здорового человека.

Заключение. Предлагаемая система мониторинга позволяет контролировать процесс исправления кинематики движений в ходе реабилитации пациента и дает количественную оценку результативности проводимого лечения.

Ключевые слова: кинематика ходьбы; мониторинг кинематики движений; алгоритмы обработки перемещений; пространственно-временные характеристики.

Как цитировать: Tsareva A.V., Sokolova F.M., Korolev P.G., Ivanova N.E., Alekseev V.V. Assessment of the effectiveness of the system for monitoring movement kinematics in patients of neurosurgical profile with functional disorders of the locomotor apparatus. *Sovremennye tehnologii v medicine* 2019; 11(3): 81–88, <https://doi.org/10.17691/stm2019.11.3.11>

Для контактов: Царёва Анна Вячеславовна, e-mail: saanyuta@yandex.ru

Assessment of the Effectiveness of the System for Monitoring Movement Kinematics in Patients of Neurosurgical Profile with Functional Disorders of the Locomotor Apparatus

A.V. Tsareva, Tutor, Department of Information Measuring Systems and Technologies¹;
F.M. Sokolova, PhD, Associate Professor, Professor, Department of Physical Rehabilitation²;
P.G. Korolev, PhD, Associate Professor, Deputy Chief on Scientific Work of the Department of Information Measuring Systems and Technologies¹;
N.E. Ivanova, MD, DSc, Professor, Chief Researcher, Head of the Scientific Department³;
V.V. Alekseev, DSc, Professor, Head of the Department of Information Measuring Systems and Technologies¹

¹Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI", 5 Professora Popova St., Saint Petersburg, 197376, Russia;

²Lesgaft National State University of Physical Education, Sport and Health, 35 Dekabristov St., Saint Petersburg, 190121, Russia;

³Polenov Neurosurgical Institute — a Branch of the Almazov National Medical Research Centre, 12 Mayakovskogo St., Saint Petersburg, 191014, Russia

The aim of the study was to assess the system designed for determining the efficiency of rehabilitation measures in patients of neurosurgical profile with functional disorders of the locomotor apparatus.

Materials and Methods. In 2017–2018, a series of investigations were carried out at the Polenov Neurosurgical Institute involving 35 patients aged 30–70 years with various pathologies of CNS and locomotor system (paraplegia, hemiparesis, tetraparesis) and 15 healthy volunteers aged 20–45 years.

Measurements were performed before rehabilitation (days 2–3 after the operation) and on rehabilitation days 3–4 (days 5–6 after the operation) using the developed system of movement kinematics monitoring built on 13 bit analog-to-digital converter with 46 kHz maximal sampling rate and 0.1% error. The system has two micromechanical sensors each containing three-axis accelerometer with a 6 g measurement range. The sensors connected to the analog-to-digital converter by a cable are fixed to the footwear on the external side of each heel.

The data obtained with this measuring system were processed using the "Program for identifying step phases".

Results. Phases of the step have been identified, phase duration calculated, mathematical expectation and root-mean-square deviation of phase durations assessed. Kinematic profiles of the patients have been presented.

Conclusions to positive or negative dynamics of rehabilitation after the application of exercise complexes have been drawn based on the kinematic profiles obtained.

Phase durations for healthy individuals have been established to be within 20 ms and a uniform distribution of root-mean-square deviation dispersions relative to the step phases has been traced. Deviations of patients' phase durations and dispersions relative to healthy persons have been shown.

Conclusion. The proposed monitoring system provides the control of the process of movement kinematics correction in the course of patient rehabilitation and gives a quantitative assessment of the conducted treatment efficacy.

Key words: kinematics of walking; monitoring of movement kinematics; algorithm of movement processing; spatio-temporal characteristics.

Введение

Ходьба — требующее аэробного обеспечения сложнокоординационное циклическое двигательное действие. В процессе ходьбы участвуют все отделы и сегменты опорно-двигательного аппарата и системы, обеспечивающие их рациональное функционирование, в первую очередь нервная, сердечно-сосудистая и дыхательная [1]. Согласованная деятельность этих систем способствует слаженной работе конечностей, удержанию динамического равновесия при передвижении, а также быстрой реакции организма на изменение окружающей обстановки (качество поверхности, освещенности, наличия предметов в пространстве и т.д.).

При нарушении функции даже одной из систем требуется создание оптимальных условий для восстановления техники ходьбы с применением индивидуальных подходов.

Пациенты нейрохирургического профиля являются наиболее сложным контингентом вследствие ряда патофизиологических и клинических особенностей.

Нозологическая классификация выделяет травматические повреждения ЦНС, опухоли, сосудистые заболевания нервной системы, заболевания и повреждения периферических нервных стволов и позвоночника [2]. Патологические процессы, вызванные ими в ЦНС, затрагивают очаговый, органический и системный уровни организма. Клиническая картина очаговой

симптоматики выражена моторным, сенсорным дефицитом, нарушением высших корковых функций; общемозговая симптоматика связана с изменением внутричерепного давления и смещением краниоспинальных структур. Нарушение системообразующей и регуляторной функций ЦНС обусловлено поражением системного уровня, затрагивающим такие жизненно важные процессы, как дыхание, кровообращение, а также иммунный ответ.

У пациентов нейрохирургического профиля в патофизиологический процесс вовлекается сразу несколько сенсорных систем (анализаторов), что приводит к искажению восприятия объективной реальности, изменениям со стороны эмоциональной и волевой сферы, различным вариантам нарушения речи. В задачи специалиста по реабилитации таких пациентов в первую очередь входят коррекция психоэмоциональных нарушений и преодоление нейросенсорного дефицита, обеспечение адекватной регуляции жизненно важных функций (восстановление физиологического паттерна дыхания, кровообращения).

Показателем эффективности физической реабилитации является степень возвращения пациента к привычному образу жизни, к социальной и бытовой независимости, профессиональной деятельности. Соответственно, значимым критерием качества реабилитационных мероприятий считают восстановление техники ходьбы.

Следует обратить внимание на тот факт, что скорость передвижения без учета других особенностей техники ходьбы не является информативным показателем. Один пациент может перемещаться в пространстве сравнительно быстро и без использования дополнительных средств, имея закрепленный патологический стереотип ходьбы, второй — будет идти значительно медленнее, однако без нарушений осанки, с равномерной нагрузкой на опорно-двигательный аппарат, что не повлечет за собой возникновения вторичных отклонений в состоянии здоровья (артрита, дегенеративно-дистрофических заболеваний позвоночника и др.).

Существующие в практике и рекомендованные к применению методики, направленные на оценку степени восстановления навыка ходьбы, такие как шкала Тинетти, шкала НИИ неврологии РАМН, классификационная шкала передвижений и другие, не могут считаться достаточными, поскольку опираются исключительно на метод визуальной оценки, отражают преимущественно степень независимости пациента от посторонней помощи, что является только косвенным признаком качества восстановления двигательного действия, и не затрагивают информативных пространственно-временных характеристик техники (темп, ритм, скорость и др.).

При реабилитации пациентов применяют специальные комплексы упражнений, однако отработанные методики занятий не всегда дают ожидаемый результат в короткие сроки (в среднем пациент находится в

больнице в течение 10 дней). В связи с этим необходим мониторинг кинематики движений по мере применения комплексов упражнений, а также контроль за состоянием пациента вне лечебного учреждения для продолжения результативной реабилитации. Нередко в домашних условиях человек перестает заниматься или начинает неправильно выполнять комплекс упражнений, рекомендованных после перенесенной операции или травмы, что пагубно отражается на его здоровье и заново отработываемом навыке ходьбы.

Цель исследования — оценить эффективность системы, предназначенной для определения результативности реабилитационных мероприятий у пациентов нейрохирургического профиля с функциональными нарушениями опорно-двигательного аппарата.

Материалы и методы

В 2017–2018 гг. на базе Российского научно-исследовательского нейрохирургического института им. профессора А.Л. Поленова проведен ряд исследований с участием 35 пациентов в возрасте от 30 до 70 лет, у которых нарушения опорно-двигательного аппарата были связаны с повреждениями ЦНС (параплегия, гемипарез, тетрапарез). Также были проведены эксперименты в группе здоровых добровольцев (без отклонений в работе опорно-двигательного аппарата и патологий ЦНС), состоящей из 15 человек в возрасте от 20 до 45 лет.

Исследование выполнено в соответствии с Хельсинкской декларацией (2013) и одобрено Этическим комитетом Российского научно-исследовательского нейрохирургического института им. профессора А.Л. Поленова. От каждого пациента получено информированное согласие.

Измерения проводили до начала реабилитации (2–3-й дни после операции) и на 3–4-й реабилитационные дни (5–6-й дни после операции) с помощью системы (рис. 1), построенной на тринадцатиразрядном

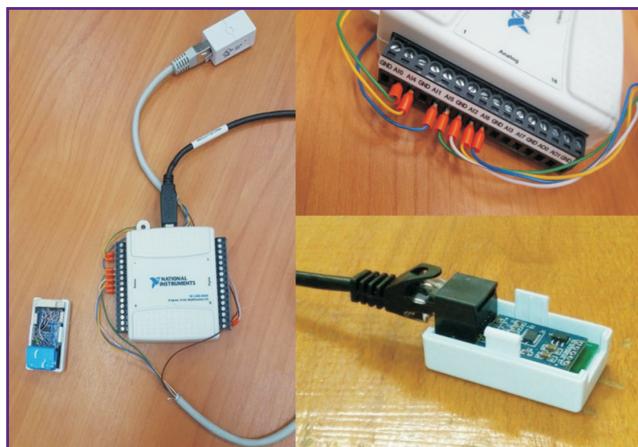


Рис. 1. Измерительная система мониторинга кинематики движений

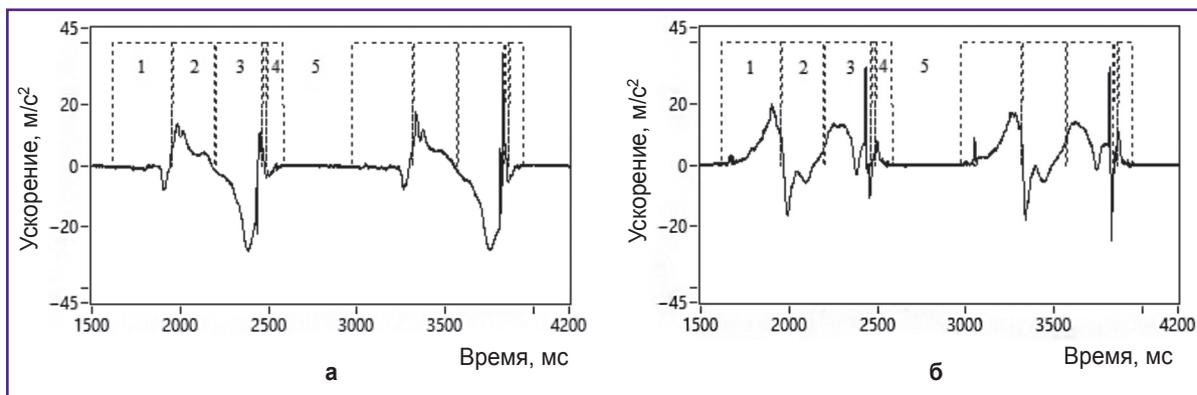


Рис. 2. Графики двойного шага у здорового человека:
 а — ускорение по оси Y датчика — горизонтально, параллельно направлению движения; б — по оси X — вертикально; сплошная линия — сигнал ускорения, пунктирные линии — границы фаз шага; 1–5 — фазы шага

аналого-цифровом преобразователе, имеющем максимальную частоту дискретизации 46 кГц и погрешность 0.1%.

Разработанная нами система включает в себя два датчика (трехосевые акселерометры с диапазоном измерений 6 g), которые обеспечивают измерения линейных перемещений в пространстве, и малогабаритный персональный компьютер. Датчики, соединенные с помощью кабеля с аналого-цифровым преобразователем, закрепляются на обуви — внешней стороне каждого каблука. Ориентации осей для датчиков, расположенных на правой и левой ноге, следующие: ось Y датчика направлена горизонтально, параллельно направлению движения (сагиттальной оси тела человека); ось X датчика направлена вертикально; ось Z — горизонтально, параллельно фронтальной оси, характеризует боковые отклонения стопы [3]. Предлагаемая схема соединений позволяет фиксировать датчики, не сковывая движений исследуемых. Данные передаются по последовательному интерфейсу непосредственно на ПК для дальнейшего анализа и обработки. ПК находится в руках у человека, проводящего эксперимент (врача-реабилитолога).

Несмотря на проводной интерфейс, система не является громоздкой из-за отсутствия внешних автономных источников питания, однако в будущем планируется перейти к беспроводной измерительной системе.

Данные, полученные с помощью измерительной системы, обрабатывали программой для ЭВМ «Программа идентификации фаз шага» [4], алгоритм действия которой разработан на основании работ [5–7].

Согласно [8], кинематический портрет человека — это система характеристик движения информативных точек на его теле, позволяющих описать состояние для различных клинических областей и наблюдать за изменением этого состояния.

Исследовав группу здоровых добровольцев, мы вы-

делили пять информативных точек (рис. 2), представляющих собой следующие фазы шага: 1 — фаза отрыва каблука; 2 — фаза переноса 1 (интервал времени от отрыва каблука до момента, когда нога находится на одной оси относительно поперечного сечения опорной ноги — задний шаг); 3 — фаза переноса 2 (интервал времени от момента, когда нога находится на одной оси относительно поперечного сечения опорной ноги до фазы постановки каблука — передний шаг); 4 — постановка ноги (каблука); 5 — фаза покоя (нога перешла в состояние опоры).

Фаза покоя в алгоритме отдельно не выделяется, здесь это длительность между активными фазами предыдущего и последующего переноса.

Для количественной оценки длительностей фаз шага применяли алгоритм идентификации фаз [3], а также алгоритм оценки математического ожидания и среднеквадратического отклонения (СКО) каждой фазы (при этом $n=30$ — повторение каждой фазы), которые выражены следующими формулами:

$$M[x] = \frac{\sum_n x_i}{n};$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_n (x_n - M[x])^2}{n-1}}.$$

Результаты

Обработаны данные линейных ускорений: идентифицированы фазы шага, рассчитаны длительности фаз, даны оценка математического ожидания и СКО длительностей фаз. Составлен кинематический портрет для каждого пациента.

У 28 исследуемых на 5–6-й день после операции отмечена положительная динамика. У 7 пациентов изменения были незначительными. Распределение СКО длительностей фаз шага у большинства пациентов ($n=28$) стало ближе к равномерному характеру

распределения после применения комплекса упражнений.

На рис. 3 представлены результаты первых и повторных исследований для пациента Р., которому

выполнено удаление новообразования на уровне поясничного отдела позвоночника. Диагноз после операции — «парапарез нижних конечностей с нарушением функций тазовых органов по типу задержки». При

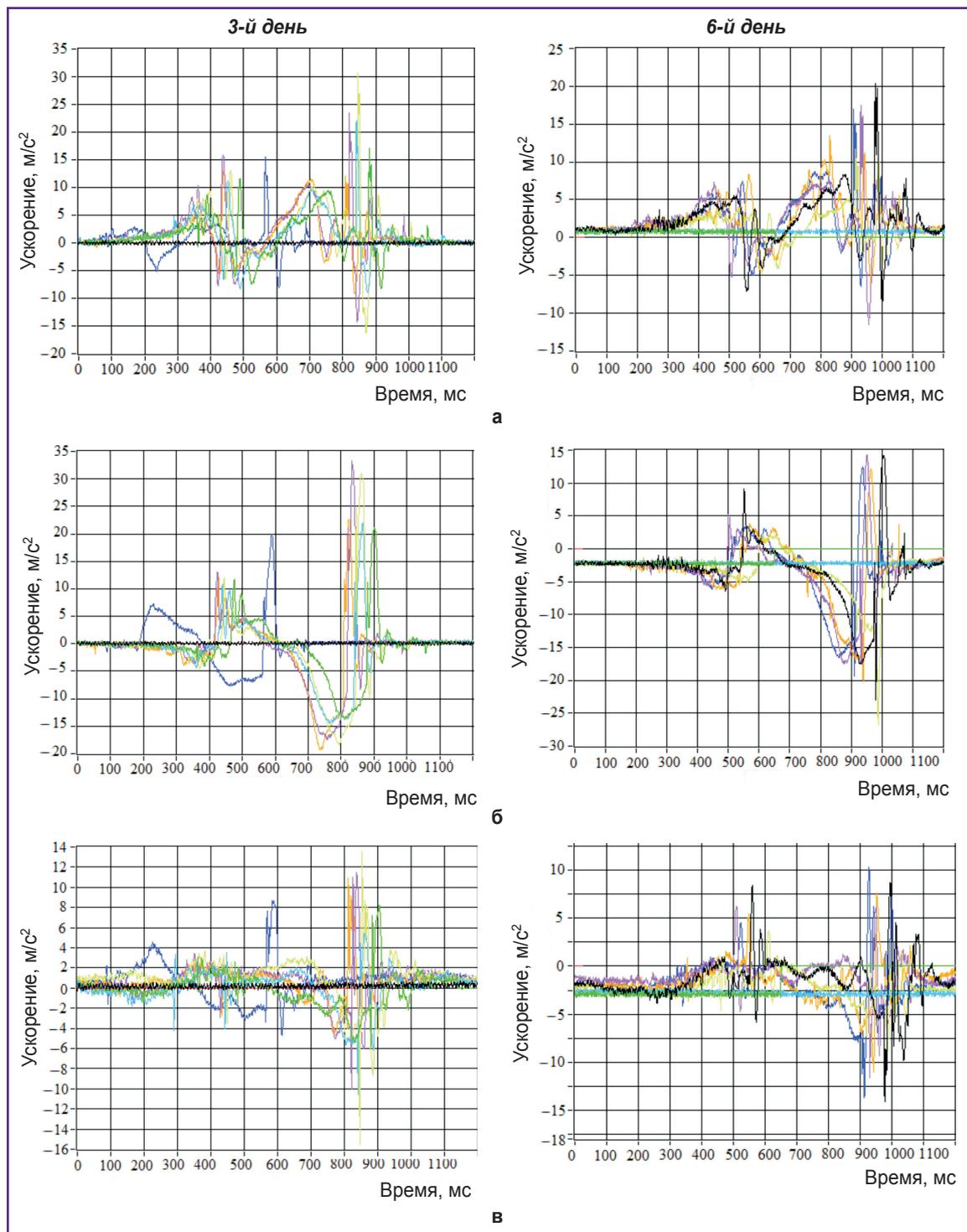


Рис. 3. Графики линейных ускорений по оси X (а), Y (б) и Z (в) для правой ноги пациента Р. на 3-й и 6-й дни после операции

Разноцветные сплошные линии — сигналы ускорений каждого шага за один проход пациента. Картины получены путем наложения сигналов ускорений шагов друг на друга

выписке отмечалось самостоятельное передвижение с минимальным использованием дополнительных технических средств; восстановление двигательного стереотипа ходьбы с адаптацией к бытовым потребностям или реализация бытовых потребностей самостоятельно (перемещение, умывание).

По кинематическим портретам пациента Р. можно сделать вывод о положительной динамике реабилитации после применения комплекса упражнений: кинематика движений при ходьбе стала четче, разброс длительностей шагов и разброс пиковых значений сократился.

Таким образом, мы видим, что по кинематическому портрету можно контролировать процесс исправления кинематики движений в ходе реабилитации и определять дальнейшее направление лечения.

На рис. 4 показаны графики разбросов длительностей фаз шага у здорового человека. СКО длительностей фаз находится в пределах 20 мс, при этом прослеживается равномерное распределение разбросов СКО относительно фаз шага (рис. 4, б).

На рис. 5 представлены средние значения и СКО фаз шага для пациента Р., кинематические портреты которого даны на рис. 3. На графиках видно, что после применения комплекса упражнений фазы переноса и отрыва каблука стали иметь более равномерный характер распределения СКО (рис. 5, а и 4, а).

На рис. 6 даны средние значения и СКО фаз шага пациента М., которому удалили новообразование на уровне грудного отдела спинного мозга. Диагноз после операции — «параллелизм, нарушение функции тазовых органов». При выписке восстановлены функции

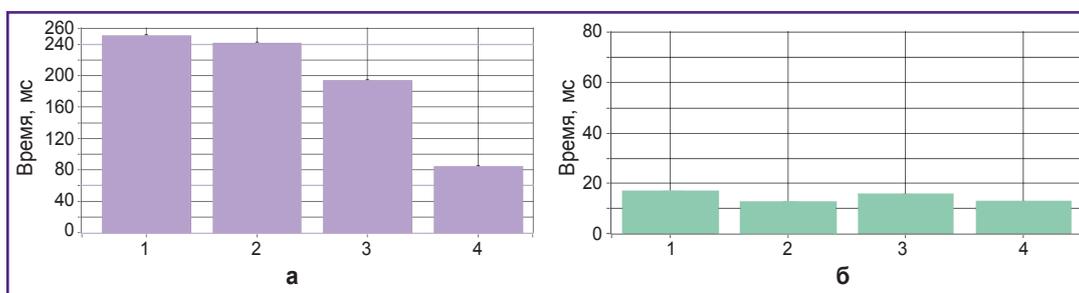


Рис. 4. Средние значения длительностей фаз шага (а) и среднеквадратическое отклонение фаз (б) здорового человека
1–4 — фазы шага

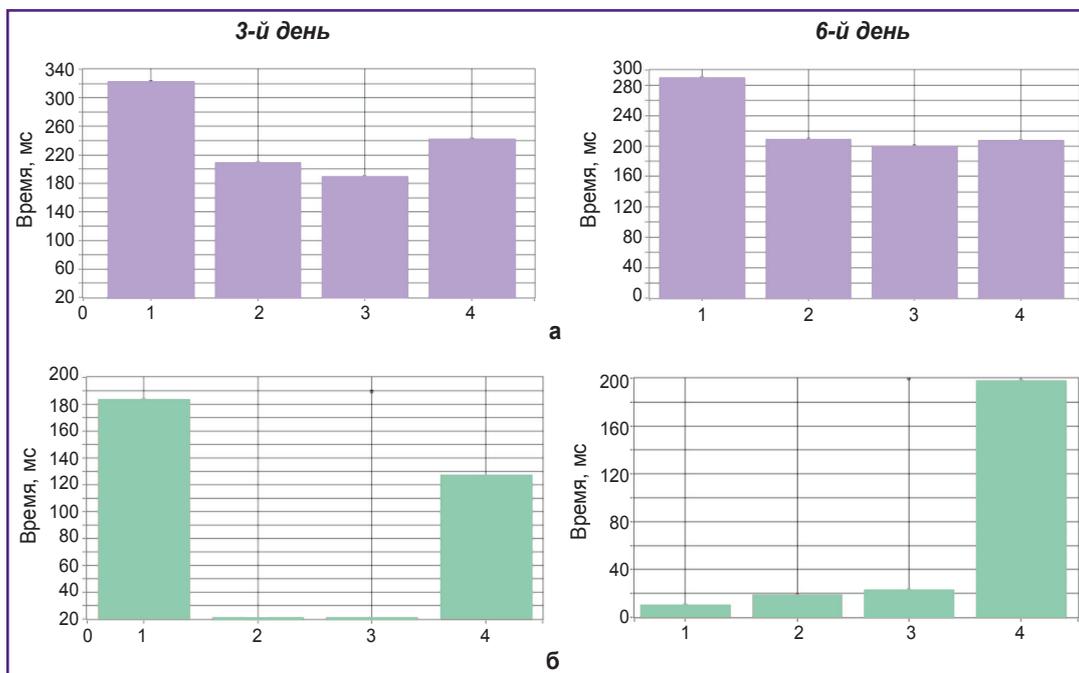


Рис. 5. Средние значения длительностей фаз шага (а) и среднеквадратическое отклонение фаз (б) пациента Р. на 3-й и 6-й дни после операции
1–4 — фазы шага

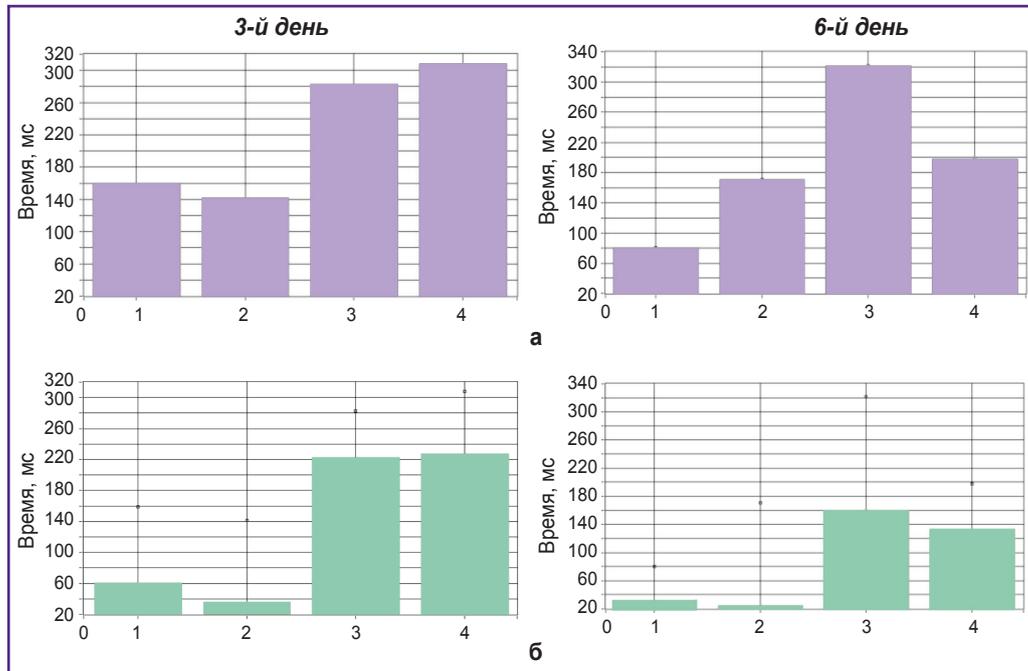


Рис. 6. Средние значения длительностей фаз шага (а) и среднеквадратическое отклонение фаз (б) пациента М. на 3-й и 6-й дни после операции 1–4 — фазы шага

тазовых органов, двигательная активность, психоэмоциональная стабилизация в сочетании с приемами самообслуживания.

Распределение средних значений фаз шага у пациента до выполнения упражнений имеет более равномерный характер, хотя нагрузка при их выполнении была близка к максимально возможной. При этом СКО фаз шага после упражнений стало меньше, что свидетельствует об улучшении проблемы рассогласованности шагов.

В результате проведенных исследований установлено, что по длительности фаз шага, значениям максимумов в каждой фазе, а также степени нелинейности каждой фазы шага можно контролировать исправления кинематики движений в ходе реабилитации пациента.

В настоящий момент проводится работа по построению траектории движения в формате трехмерного изображения по нескольким параметрам в совокупности: по трем осям линейных ускорений и по трем осям угловых ускорений. С помощью такой визуализации можно будет отслеживать, как осуществляется перемещение той или иной конечности при эксперименте без присутствия наблюдателя.

Заключение

Подобных мобильных систем для определения эффективности реабилитации пациентов с патологиями ЦНС и нарушениями работы опорно-двигатель-

ного аппарата на сегодняшний день не существует. Предлагаемая система мониторинга дает количественную оценку результативности проводимого лечения и позволяет контролировать процесс реабилитации как во время пребывания в стационаре, так и в домашних условиях, поскольку полученные данные могут быть отправлены лечащему врачу.

Финансирование исследования. Данное исследование не финансировалось какими-либо источниками.

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие конфликтов интересов.

Литература/References

1. Румянцева Н.А. Комплексная оценка патологического паттерна ходьбы и реабилитационных программ ее восстановления у больных в остром периоде церебрального инсульта. Дис. ... канд. мед. наук. М; 2010. Rumyantseva N.A. *Kompleksnaya otsenka patologicheskogo patterna khod'by i reabilitatsionnykh programm ee vosstanovleniya u bol'nykh v ostrom periode tserebral'nogo insulta*. Dis. ... kand. med. nauk [Complex assessment of a pathological walking pattern and rehabilitation programs for its restoration in patients in acute period of cerebral palsy. PhD Dissertation]. Moscow; 2010.
2. Белова А.Н., Прокопенко А.С. Нейрореабилитация. М; 2010. Belova A.N., Prokopenko A.S. *Neyroreabilitatsiya* [Neurorehabilitation]. Moscow; 2010.
3. Царёва А.В. Алгоритмы измерительных систем для исследования фазовой структуры походки человека.

Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ» 2018; 2: 61–66. Tsareva A.V. Measurement systems algorithms for the phase structure investigation of the person gait. *Izvestiya SPbGETU "LETI"* 2018; 2: 61–66.

4. Программа идентификации фаз шага. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ 2018617996. 2018. *Programma identifikatsii faz shaga* [The computer program for identifying step phases]. Certificate of state registration of computer programs 2018617996. 2018.

5. Скворцов Д.В. Клинический анализ движений. Анализ походки. Издательство НПЦ — «Стимул»; 1996; 344 с. Skvortsov D.V. *Klinicheskiy analiz dvizheniy. Analiz pokhodki* [Clinical movement analysis. Gait analysis]. Izdatel'stvo NPTs — "Stimul"; 1996; 344 p.

6. Kim J.W., Jang H.J., Hwang D.-H., Park C. A step, stride and heading determination for the pedestrian navigation system. *Journal of Global Positioning Systems* 2004; 3(1&2): 273–279, <https://doi.org/10.5081/jgps.3.1.273>.

7. Капанджи А.И. Нижняя конечность. Функциональная анатомия. Эксмо; 2010; 352 с. Karandzhi A.I. *Nizhnyaya konechnost'. Funktsional'naya anatomiya* [The lower limb. Functional anatomy]. Eksmo; 2010; 352 p.

8. Алексеев В.В., Королев П.Г., Иванова Н.Е. Применение микромеханических датчиков для контроля параметров кинематического портрета человека. Приборы 2017; 7: 6–15. Alekseev V.V., Korolev P.G., Ivanova N.E. Application of micromechanical sensors to control the parameters of human kinematic profile. *Pribory* 2017; 7: 6–15.