

М.В. Спринджук, А.А. Хроменков, В.А. Гайко
БИОМЕХАНИКА ДВИЖЕНИЯ И НАРУШЕНИЯ ХОДЬБЫ

ОИПИ АН Беларуси, г.Минск

Авторы рассматривают ключевые вопросы проблемы нарушений ходьбы. Приводятся исторические сведения, определения основных терминов тематики, обсуждаются цели её изучения, показания для исследования походки человека, классификации причин и видов нарушений походки и методов диагностики этой патологии. Описываются также наиболее характерные виды походки и общие подходы к лечению нарушений локомоции.

Ключевые слова: нарушение ходьбы, биомеханика, неврология, нейрохирургия

M.V. Sprindzuk, A.A. Chromenkov, V.A. Gaiko

MOVEMENT BIOMECHANICS AND GAIT DISTURBANCES

Authors discuss the key questions regarding the topic of gait disorders. Major definitions, historical facts, indications for the gait investigation, classification of etiology, gait types and methods for the diagnosis are reported. Common gait patterns and general approaches to the treatment of locomotion disturbances are described as well.

Key words: gait disorders, biomechanics, neurology, neurosurgery

Определения термина «ходьба»

Традиционное определение:

«Повторяющаяся последовательность движений конечностей для безопасного продвижения тела вперед при минимуме потери энергии».

Новое определение термина:

«Повторяющаяся последовательность движений конечностей для безопасного продвижения тела вперед при минимуме потери энергии, требующая для правильного выполнения наличие адекватно функционирующей нейромышечной системы и более высокие когнитивные нейральные (нейронные) функции» [1].

Определение термина «анализ походки, ходьбы»:

«Объективное измерение локомоции человека».

Основные цели анализа походки человека:

- 1) понимание сложных паттернов ходьбы человека;
- 2) дифференциальная диагностика динамических и статических контрактур;
- 3) различение между первичными заболеваниями и механизмами адаптации к болезни;
- 4) анализ аномальных паттернов нейромышечного возбуждения;
- 5) объективное сравнение до- и послеоперационных паттернов ходьбы;
- 6) сравнение использования различных протезов и другой ортопедической техники [1].

Цикл ходьбы человека состоит из двух фаз: позиционной (stance phase, 60%) и колебания, качания (swing phase, 40%). Каждая из них разделяется на стадии-подфазы (см. рис. 1).

Основные показания для исследования походки человека:

- 1) двусторонние параличи и менее часто односторонние;

- 2) для планирования будущего лечения, например, физиотерапии или применения ботулотоксина;

- 3) определение хирургических показаний и выбора типа операции;

- 4) при применении и выборе протезов;

- 5) для оценки послеоперационного статуса больного;

- 6) для оценки исходов заболеваний и результатов их лечения [1].

1. Исторические сведения

Вопросы биомеханики движений живых организмов, в том числе человека, интересовали ученых с древнейших времен [2]. Леонардо Да Винчи (1452-1519) и Борелли были одними из первых исследователей этой темы (см. Рис. 2, 3).

Не обладая никаким оборудованием для регистрации и анализа движений, они рассматривали функцию тела как систему рычагов, на которые действуют мышцы. Эти идеи были развиты и дополнены в научных работах братьев Weber, Marey, Muybridge, Fischer и Braune. Последние исследовали центр тяжести у трупов и у солдат немецкой армии с целью разработать рациональный подход к нагрузке амуницией в вооруженных силах Германии. Их деятельность по локомоции стала в последующем классической и наиболее широко цитируется в научной литературе.

В России Бернштейн, опираясь на опыт Fischer и Braune, применил их концепции к более широкому кругу объектов: ими были дети и старики. В 1932 году он опубликовал по этой теме свою книгу философского содержания. Одной из основных идей его подхода к анализу нарушений походки было признание малозначимости медио-латеральных линий (векторов) движения, которым Fischer и Braune придавали ведущее значение [2].

Alexander [3] предложил различать 3 вида биомеханических моделей: концептуальную, физическую и математическую. Характерный пример концептуальной биомехани-

ческой модели это модель сравнения человеческой походки с вращением куриного яйца на плоскости (Margarita, 1976). В процессе вращения яйца, центр тяжести яйца поднимается или опускается, таким образом, его потенциал гравитационной энергии соответственно увеличивается и уменьшается. Каждый раз, когда его гравитационная энергия падает, его кинетическая энергия повышается (она нарастает), и наоборот. Таким образом, энергия находится в состоянии обменного превращения между гравитационной и кинетической её формами. Аналогичные процессы характерны для походки человека. Margarita не написал ни одного уравнения для этой модели, тем не менее, его идеи улучшили понимание биомеханики движения человека.

Физические биомеханические модели обладают следующими свойствами:

- 1) они могут показать действие спроектированного механизма;
- 2) иногда такие модели используются, когда наблюдения невозможно выполнить на реальных животных или растениях;
- 3) физические модели могут применяться для проверки результатов математического моделирования.

Часто физические биомеханические модели применяются в гидродинамике и исследовании эластичности материалов.

Наибольшей по составу группой среди биомеханических моделей являются **математические**, которые принято классифицировать на:

- 1) простые;
- 2) так называемые «более реалистичные»;
- 3) оптимизационные модели, в том числе инвертированной (обратной) оптимизации [3].

2. Причины нарушения походки

Неврологические (центральные):

- инсульт;
- паркинсонизм;
- деменция;
- страх перед падением.

Периферическая невропатия:

- сахарный диабет;
- хронический алкоголизм;
- дефицит витамина B12.

Заболевания уха и глаза:

- presbyopia;
- катаракты;
- головокружения;
- болезнь Меньера;
- синдром множественного сенсорного дефицита.

Неизвестной этиологии:



Рис. 1.

- идиопатическое нарушение походки.

Сердечно-сосудистые болезни:

- атеросклеротическая болезнь второй стадии и выше;
- перемежающаяся хромота;
- ортостатическая гипотензия;
- вертебро-базиллярная недостаточность;
- венозные;
- хронические отеки нижних конечностей.

Заболевания опорно-двигательного аппарата:

- дегенеративные болезни суставов;
- ревматический артрит;
- подагра;
- спондилез шейных позвонков;
- врожденные или приобретенные деформации;
- остеопороз;
- болезнь Педжета.

Патология мышц и заболевания щитовидной железы:

- неподвижность, иммобилизация;
- полимиалгии.

Психические болезни:

- шизофрения;
- истерия.

Очаги неврологической патологии, при которых наблюдаются нарушения походки и осанки, классифицируются следующим образом.

Супратенториальные:

- заболевания белого вещества мозга (старческое поражение белого вещества головного мозга, лейкоэнцефлопатии);

- острые заболевания сосудов (таламическая астазия, поражение капсулы и базальных ганглиев);

- нормотензивная гидроцефалия;

- двусторонние субдуральные гематомы.

Инфратенториальные очаги поражения:

- мосто (пonto)-энцефалическое нарушение походки;
- вестибулярные нарушения;
- патология мозжечка.

Миелопатии:

- спондилез шейных позвонков;
- множественный (рассеянный) склероз.

3. Ходьба

Принято различать следующие **типы походки человека**:

- 1) развивающегося организма;
- 2) нейромышечные;
- 3) сенсорные;
- 4) мозжечковые;
- 5) спастические;
- 6) наблюдаемые при поражении базальных ганглиев;

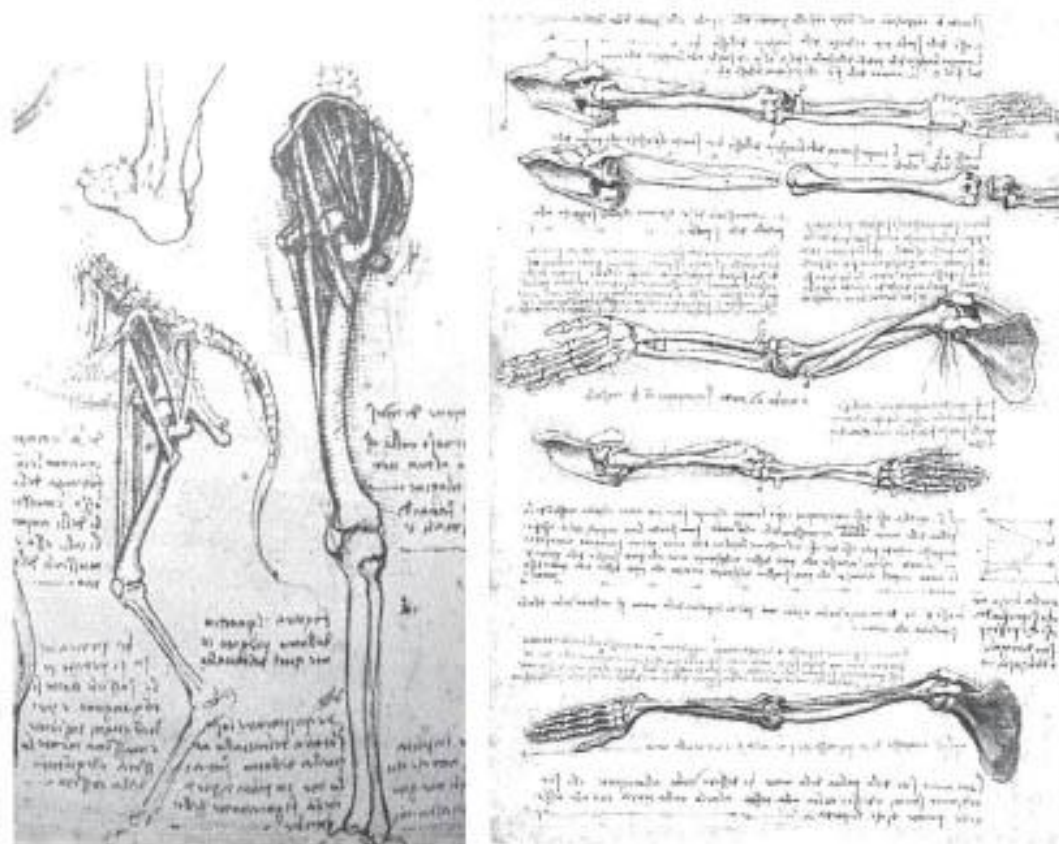


Рис. 2-3. Рисунки Л. Да Винчи, 16 в. Сравнительная анатомия конечностей и комментарии, касающиеся биомеханики движений (<http://www.artchive.com/artchive/L/leonardo/>)

- 7) церебральные;
- 8) психиатрические;
- 9) характерные для половой принадлежности человека.

Анализ ходьбы важен для диагностики заболеваний нервной системы. Нарушения равновесия при ходьбе могут маскироваться различными компенсаторными приемами больного организма. Кроме того, расстройства походки могут быть вызваны не неврологической, а иной патологией — например, поражением суставов. Ходьбу лучше всего оценивать тогда, когда пациент не знает, что за ним наблюдают, например, при вхождении больного в кабинет. Походка здорового человека быстрая, пружинистая, легкая и энергичная, а поддержание равновесия при ходьбе не требует специального внимания или усилий. Руки при ходьбе чуть согнуты в локтях (ладони обращены к бедрам) и выполняют движения в такт шагам. Дополнительные тесты это проверка следующих видов ходьбы: ходьба обычным шагом по комнате; ходьба «на пятках» и «на носках»; «танцевальная» ходьба (по линейке, пятка к носку). При выполнении этих дополнительных тестов необходимо исходить из здравого смысла и предлагать пациенту лишь те задания, которые он реально может выполнить хотя бы частично. Просим пациента быстро пройти по комнате. Обращаем внимание на следующие моменты: поза во время ходьбы; усилия, необходимые для инициации ходьбы и для остановки; длина шага; ритмичность ходьбы; наличие нормальных содружественных движений рук; произвольные движения. Оцениваем, насколько широко пациент расставляет ноги при ходьбе, отрывает ли пятки от пола, не «подолакивает» ли одну ногу. Врач просит пациента выполнить повороты во время ходьбы и обращает внимание, насколько легко ему выполнить поворот; не теряет ли при этом больной равновесие; сколько шагов надо сделать пациенту, чтобы повернуться на 360° вокруг своей оси (в норме такой поворот выполняется за 1-2 шага). Затем просим пациента пройти сначала на пятках, потом — на носках (помогаем удержать равновесие, если это необходимо). Оцениваем, отрывает ли пациент пятки/носки от пола. Особенно важна проба с ходьбой на пятках, поскольку тыльное сгибание стопы страдает при многих неврологических заболеваниях. Врач просит пациента пройти по воображаемой прямой линии, ставя «пятка-носом» так, чтобы пятка ноги, выполняющей шаг, оказывалась прямо перед пальцами стопы другой ноги (танцевальная ходьба). Танцевальная ходьба — тест, более чувствительный к нарушениям равновесия, чем проба Ромберга. Если пациент хорошо выполняет эту пробу, то другие пробы на устойчивость вертикальной позы и атаксию туловища, включая пяточно-коленную пробу, скорее всего, окажутся отрицательными.

Характер нарушений ходьбы зависит от основного заболевания. «Мозжечковая» походка характеризуется тем, что при ходьбе пациент широко расставляет ноги; неустойчива в положениях стоя и сидя; имеет разную длину шагов; отклоняется в сторону (в сторону очага при одностороннем поражении мозжечка). Мозжечковая походка часто описывается как «шаткая» или «пьяная». Вероятные причины — рассеянный склероз, опухоль мозжечка, кровоизлияние, инфаркт мозжечка, мозжечковая дегенерация. Походка при заднеканатиковой сенситивной атаксии («табетическая» походка) характеризуется выраженной неустойчивостью при стоянии и ходьбе, несмотря на хорошую силу в ногах. Движения в ногах отрывистые, резкие, при ходьбе обращает на себя внимание разная длина и высота шага. Пациент пристально смотрит на дорогу перед собой (его взгляд «прикован» к полу или к земле). Характерна утрата мышечно-суставного чувства и вибрационной чувствительности в ногах. В позе Ромберга с закрытыми глазами пациент падает. Вероятные причины — рассеянный склероз, сдавление задних канатиков спинного мозга (опухоль), спинальная сухотка, фуникулярный миелоз (дефицит витамина B2). «Гемиплегическая» походка наблюдается у пациентов со спастическим гемипарезом или гемиплегией. Пациент «тащит» выпрямленную парализованную ногу (отсутствует сгибание в тазобедренном, коленном, голеностопном суставах), ее стопа ротирована кнутри, а наружный край задевает о пол. При каждом шаге парализованная нога описывает полукруг, отставая от здоровой ноги. Рука согнута и приведена к туловищу. «Паралегическая» спастическая походка — за-

медленная, с мелкими шагами. Пальцы стоп задевают о пол, ноги при ходьбе с трудом отрываются от пола, «скрещаются» из-за повышения тонуса приводящих мышц и плохо сгибаются в коленных суставах из-за повышения тонуса мышц-разгибателей. Наблюдается при двустороннем поражении пирамидных систем (при рассеянном склерозе, боковом амиотрофическом склерозе, длительной компрессии спинного мозга и др.). «Паркинсоническая» походка — шаркающая, с мелкими шажками, пропульсиями (больной на ходу начинает двигаться все быстрее и быстрее, как бы догоняя свой центр тяжести, и не может остановиться), трудностями инициации и завершения ходьбы (трудно начать идти и трудно остановиться). Туловище при ходьбе наклонено вперед, руки согнуты в локтевых суставах и прижаты к туловищу, при ходьбе неподвижны (акхейрокинез). Если стоящего больного слегка толкнуть в грудь, он начинает двигаться назад (ретропульсия). Для того чтобы повернуться вокруг своей оси, больному требуется сделать до 20 мелких шагов. При ходьбе могут наблюдаться «застывания» в самой неудобной позе. «Петушиная» походка (степпаж, штампующая походка, «падающая стопа») наблюдается при нарушении тыльного сгибания стопы. Носок «свисающей» стопы при ходьбе нередко цепляет пол. Вследствие этого пациент при ходьбе вынужден высоко поднимать ногу и выбрасывать ее вперед, при этом он хлопает передней частью стопы о пол. Однако шаги имеют равную длину. Односторонний степпаж наблюдается при компрессии общего малоберцового нерва, двусторонний — при моторной полиневропатии, как врожденной (болезнь Шарко – Мари-Тута), так и приобретенной. «Утиная» походка характеризуется раскачиванием таза и переваливанием с ноги на ногу. Наблюдается при двусторонней слабости мышц тазового пояса, прежде всего, средней ягодичной мышцы. При слабости мышц, отводящих бедро, в фазу стояния на пораженной ноге происходит опускание таза на противоположной стороне. Слабость обеих средних ягодичных мышц приводит к двустороннему нарушению фиксации бедра опорной ноги, таз при ходьбе чрезмерно опускается и поднимается, туловище «переваливается» со стороны на сторону. Из-за слабости других проксимальных мышц ног пациенты испытывают трудности при подъеме по лестнице и при вставании со стула, при заходе в транспорт. Вставание из сидячего положения производится с помощью рук, причем больной упирается кистями в бедро или колено и только таким путем добивается выпрямления туловища. Наиболее частые причины — прогрессирующие мышечные дистрофии и другие миопатии; из не неврологических заболеваний — врожденные вывихи бедер. «Дистоническая» походка встречается у пациентов с гиперкинезами — хореей, атетозом, мышечными дистониями. В результате непроизвольных движений ноги передвигаются медленно и неуклюже, в руках и туловище наблюдаются непроизвольные движения. Такую походку называют «танцующей», «дергающейся». Анталгическая походка является реакцией на боль — пациент щадит ту ногу, которая болит, передвигая ее очень осторожно и стараясь нагружать преимущественно вторую, здоровую ногу. Истерическая походка может быть самой различной, но не имеет тех типичных признаков, которые характерны для определенных заболеваний. Пациент может вообще не отрывать ногу от пола, волоча ее, может демонстрировать отталкивание от пола (как при катании на коньках) либо может резко шататься из стороны в сторону, избегая, однако, падений и т.д. [6].

4. Лечение нарушений ходьбы и походки Методы диагностики нарушений ходьбы:

- 1) наблюдательный и видеоанализ;
- 2) электромиография;
- 3) кинематический анализ;
- 4) кинетический анализ [7];
- 5) статический и динамический анализ [8] (вероятно, может рассматриваться как подгруппы вышеназванного метода);
- 6) расчет энергетических расходов при ходьбе [9];
- 7) с применением инструментов статистики [10], нейронных [11] и Bayesian сетей [12];
- 8) путем изучения следов (отпечатков стоп) [13], [14];
- 9) с использованием анализа изображений [15];
- 10) комбинированные.

Для клинического анализа походки (ходьбы человека) разработаны протоколы диагностических мероприятий [16] и сложные шкалы количественной оценки [17]. Недавно в Австралии для коллаборативной консультативной работы была создана база данных GaitBase [18].

Сопутствующая патология, тяжесть основного заболевания и общий статус больного обуславливают исход лечения нарушений ходьбы [19]. Основная реальная цель лечения — увеличить скорость ходьбы, желание восстановить нормальный паттерн движения может часто считаться нереалистичной целью. Нарушения походки, ведущей причиной которых являются дефицит витаминов группы B12, фолиевой кислоты, гипо- и гиперфункцией щитовидной железы, остеоартритом коленных суставов, болезнью Паркинсона, воспалительной полинейропатией могут положительно ответить на медикаментозное лечение. Касательно физиотерапии для лечения нарушений походки, в общем, в литературе сообщаются противоречивые данные об её эффективности. Описан умеренно позитивный эффект физиотерапии для лечения остеоартрита коленного сустава. Для пациентов, которые могут независимо передвигаться, полезной в плане реабилитации движения могут оказаться тредмилловый тест и поддержка туловища [19]. Интересный подход к лечению — применение робот-ассистированных тренировок [20].

Несколько исследований показало лечебную эффективность комплексных программ физических упражнений, в том числе и аэробики, для увеличения, как скорости походки, так и длины проходимой дистанции и достижения лучших показателей психологического тестирования. Применение ортопедической обуви также ассоциируется с улучшением состояния таких пациентов. Для лечебного успеха имеет значение также психологическая помощь пациентам и комфортные условия жилища в плане возможности передвигаться с минимальным риском травматизироваться. Хирургическое лечение с определенной вероятностью может оказаться благотворным при лечении больных, страдающих стенозом позвоночного канала в шейном и поясничном отделах, компрессионной миелопатией, нормотензивной гидроцефалией. Сравнительно других заболеваний, обуславливающих нарушения ходьбы, лучших результатов можно достичь при хирургическом лечении остеоартрита коленных суставов: протезировании натуральных суставных поверхностей танковыми искусственными [19].

Программное обеспечение, разработанное для количественной оценки и анализа нарушений ходьбы человека

В настоящее время сотрудниками ОИПИ (Минск, Беларусь) разрабатывается программное обеспечение для диагностики и изучения нарушений ходьбы на основе анализа видеоданных движения человека. Исследование ведет-

ся на базе «Республиканского научно-практического центра неврологии и нейрохирургии при Министерстве здравоохранения РБ». Решение предусматривает следующие режимы работы: статический – позволяющий выделять нарушения со стороны опорно-двигательного аппарата при неподвижном положении; динамический – определяет дефект двигательной системы и его влияние на формирования на заболевания; треморография – методика качественного анализа неврологических заболеваний, сопровождающихся дрожанием. Данные режимы позволяют осуществлять как экспресс-диагностику, так и проводить комплексную динамическую оценку лечения.

Выводы

Нарушения ходьбы – распространенная в практике врача патология, которая трудно поддается лечению. Применение новых информационных технологий позволило не только изучить новые аспекты заболеваний, но и обогатило арсенал инструментов для реабилитации пациентов, что может уже в недалеком будущем положительно отразится на результатах лечения больных.

Литература

1. «Gait Analysis». *Energy*. Глава из книги Kirtley C (2006) *Clinical Gait Analysis – theory and practice*. Churchill Livingstone, Elsevier, USA.
2. Paul, J. P. History and fundamentals of gait analysis / J. P. Paul // *Health (San Francisco)*, 1998. Vol. 8. P. 123 – 135.
3. Alexander, R. M. Modelling approaches in biomechanics. *Modelling approaches in biomechanics* / R. M. Alexander [et al.], 2003. P. 1429 – 1435.
4. Tsementzis, S. A. *Differential Diagnosis in Neurology and Neurosurgery A Clinician's Pocket Guide* / S. A. Tsementzis. New York, 2000.
5. Jin, H. Quantitative analysis of ataxic gait in patients with schizophrenia: The influence of age and visual control / H. Jin [et al.] // *Journal of Neural Transmission*, 2007. Vol. 152. P. 155 – 164.
6. Скоромец, А. А. Неврологический статус и его интерпретация / А. А. Скоромец, 2009. 300 с.

7. Kane, F. W. Kinetic analysis of planned gait termination in healthy subjects and patients with balance disorders / F. W. Kane, C. A. McGibbon, D. E. Krebs // *Power*, 2003. Vol. 17. P. 170 – 179.
8. Delp, S. L. Graphics-based modeling and analysis of gait abnormalities / S. L. Delp, A. S. Arnold, S. J. Piazza // *Bio-medical Materials and Engineering*, 1998. Vol. 8. P. 227 – 240.
9. Rose, S. A. *Strategies for the Assessment of Pediatric Gait Clinical Setting the* / S. A. Rose, P. A. Deluca. Cadence, 1991.
10. Barton, G. Gait quality assessment using self-organising artificial neural networks / G. Barton [et al.] // *Gait & Posture*, 2007. Vol. 25. P. 374 – 379.
11. Duhamel, A. Statistical tools for clinical gait analysis / A. Duhamel [et al.], 2004. Vol. 20. P. 204 – 212.
12. Ting, H. A new method for determining lumbar spine motion using Bayesian belief network / H. Tingm [et al.] // *Medical, & Biological Engineering & Computing*, 2008. P. 333 – 340.
13. Riley, P. D. *Mobility and Gait Assessment Technologies* / P. O. Riley, K. W. Paylo, D. C. Kerrigan. Assessment, 1999. P. 33 – 51.
14. Titianova, E. B. Footprint analysis of gait using a pressure sensor system / E. B. Titianova, P. S. Mateev, I. M. Tarkka // *Methods*, 2004. Vol. 14. P. 275 – 281.
15. Chang, R. A Computer Assisted Image Analysis System for Diagnosing Movement Disorders / R. Chang, L. G. I, J. A. Bume. Image (Rochester, N.Y.).
16. Ferrari, A. Quantitative comparison of five current protocols in gait analysis / A. Ferrari [et al.] // *Gait & Posture*, 2008. Vol. 28. P. 207 – 216.
17. Thomas, M. Clinical gait and balance scale (GABS): Validation and utilization / M. Thomas // *Journal of Neurological Sciences*, 2004. Vol. 217. P. 89 – 99.
18. Tirosh, O. GaitaBase: Web-based repository system for gait analysis / O. Tirosh, R. Baker, J. McGinley // *Computers in Biology and Medicine*, 2010. Vol. 40. P. 201 – 207.
19. Alexander, N. B. Gait disorders: Search for multiple causes / N. B. Alexander, A. Goldberg // *Cleveland Clinic Journal of Medicine*, Vol. 72.
20. Beer, S. Robot-assisted gait training in multiple sclerosis: a pilot randomized trial / S. Beer [et al.] // *Multiple Sclerosis (Houndmills, Basingstoke, England)*, 2008. Vol. 14. P. 231 – 236.

Поступила 10.06.2010 г.