

## БИОМЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ХОДЬБЫ У ДЕТЕЙ С ВРОЖДЕННЫМИ РАССТРОЙСТВАМИ ЛОКОМОЦИЙ

Показано, что основными отличиями динамического стереотипа ходьбы по ровной поверхности у детей, больных ДЦП, являются задержка перемещения ОЦТ вперед (оно происходит во вторую половину шага) и дезорганизация движений нижних конечностей (особенно колена) в вертикальной плоскости. Изменение структуры движения плечевого пояса и верхних конечностей можно рассматривать как компенсаторные – вертикальные перемещения плеча подстраиваются под движения ОЦТ, оставаясь в противофазе к последним. Происходит рассогласование движений локтя и запястья. Выявленные биомеханические особенности ходьбы у детей, страдающих ДЦП, могут послужить основой для разработки программ реабилитации.

**Ключевые слова:** ходьба; локомоции; нарушения движений; биомеханика.

Детский церебральный паралич (ДЦП) занимает в настоящее время одно из ведущих мест в структуре детской инвалидности. В России насчитывается более 70 тысяч детей в возрасте до 14 лет, больных детским церебральным параличом, и с каждым годом это количество увеличивается. Методы двигательной реабилитации таких детей должны основываться на биомеханических и физиологических закономерностях. Это обуславливает актуальность исследования кинематических характеристик локомоций у детей, страдающих ДЦП. В обширной литературе, посвященной ДЦП, работы по изучению структуры локомоции долгое время занимали весьма скромное место. В основном это были электромиографические исследования деятельности мышц при ходьбе до и после различных оперативных вмешательств [1, 2]. Лишь в последние десятилетия появился ряд фундаментальных исследований, но и они направлены в основном на биомеханическое обоснование хирургической коррекции позы и ходьбы больных ДЦП [3].

Для детей, страдающих ДЦП, характерны спазм мышц конечностей, нарушение двигательной и чувствительной функций, появление контрактур (обычно сгибательно-приводящего типа) и др. Отмечаются также повышение сухожильных рефлексов, появление патологических рефлексов, повышение мышечного тонуса (гипертонус отдельных мышц), понижение мышечной силы и работоспособности, нарушение координации движений, акта стояния и ходьбы, наличие непроизвольных движений, синкинезий и т.п. [4].

Биомеханические нарушения локомоций связаны с гипертонусом мышц, нарушениями координации движений, контрактурами в суставах нижних конечностей и др. У больных изменена биомеханическая структура ходьбы – генез этих нарушений связан с поражением ЦНС [5].

Анализ кинематики, опорных реакций и работы мышц различных частей тела убедительно показывает, что в течение цикла ходьбы происходит закономерная смена биомеханических событий. Ходьба здоровых людей, несмотря на ряд индивидуальных особенностей, имеет типичную и устойчивую биомеханическую и иннервационную структуру, т.е. определенную пространственно-временную характеристику движений и работы мышц [Там же].

При ходьбе человек последовательно опирается то на одну, то на другую ногу. Эта нога называется опорной. Контралатеральная нога в этот момент вы-

носится вперед (переносная нога). Период переноса ноги называется «фаза переноса». Полный цикл ходьбы – период двойного шага – складывается для каждой ноги из фазы опоры и фазы переноса конечности. В опорный период активное мышечное усилие конечностей создаёт динамические толчки, сообщающие центру тяжести тела ускорение, необходимое для поступательного движения. При ходьбе в среднем темпе фаза опоры длится примерно 60% от цикла двойного шага, фаза переноса – около 40%. В циклической последовательности ходьбы выделяют моменты, когда с опорой соприкасаются только одна нога («одноопорный период») и обе ноги, когда вынесенная вперед конечность уже коснулась опоры, а расположенная впереди ещё не оторвалась («двуопорная фаза»). С увеличением темпа ходьбы «двуопорные периоды» укорачиваются и совсем исчезают при переходе в бег. Таким образом, по кинематическим параметрам ходьба от бега отличается наличием двуопорной фазы [6, 7].

У больных с ДЦП выявлены нарушения биомеханической структуры ходьбы и особенно бега, где имеет место спазм мускулатуры и падения больного. По данным электромиографического исследования мышц нижних конечностей, активность мышц у больных с ДЦП значительно превышает активность мышц у здоровых людей. В большей степени повышение тонуса мышц наблюдается у больных с ДЦП в игровых видах спорта (футбол, баскетбол, ручной мяч и др.), в легкой атлетике (бег, прыжки и др.) и – в меньшей степени – в плавании [8].

При исследовании кинематики ходьбы выявлены существенные нарушения, и в основном во временных показателях (сокращение периода переноса, увеличение фазы опоры на носок и уменьшение фаз опоры на всю стопу), редукция угловых перемещений, скоростей и ускорений, уменьшение, а иногда и стертость максимумов на динамограммах. Особенности ходьбы является также наличие постоянного начального угла в суставах (из-за гипертонуса мышц, контрактур), выраженные колебания туловища относительно разных плоскостей. У больных с ДЦП нарушены позы стояния, это связано с изменением общего центра тяжести (ОЦТ). В связи с изменением проекции ОЦТ нагрузка на каждую ногу при удобной стойке несимметрична. Неустойчивость походки связана с выходом ОЦТ за пределы границ нормы [9].

Цель исследования – изучить особенности биомеханических характеристик ходьбы у детей с врожденными нарушениями локомоций на примере ДЦП.

Было обследовано 20 детей (12 мальчиков и 8 девочек) в возрасте от 8 до 12 лет, страдающих ДЦП, форма спастическая диплегия, проходящих лечение и адаптацию в ОГКУ «Реабилитационный Центр для детей и подростков с ограниченными возможностями» (ЗАО г. Северск). Контрольную группу составили 10 детей (6 мальчиков и 4 девочки) того же возраста.

Для анализа ориентации звеньев тела, их местоположения в пространстве и отношения к опоре использовался метод отслеживания движения (Motion Tracking). Пространственные перемещения звеньев тела регистрировались с помощью видеокамеры Vision Research Phantom Mire eX2. Съемка велась со скоростью 100 кадров в секунду. Полученные данные были обработаны и проанализированы в программе StarTraceTracker 1.1 VideoMotion®. Учитывались следующие кинематические показатели, отражающие двигательную патологию испытуемых при выполнении ходьбы: значения углов в суставах нижних и верхних конечностей, скорости перемещения звеньев тела.

Многопараметрический анализ ходьбы позволяет разделить локомоторный цикл на шесть биомеханических фаз, разграниченных экстремальными значениями динамических параметров. Отметим наиболее существенные различия каждой фазы локомоторного цикла.

При исследовании изменения значения угла коленного сустава при ходьбе по горизонтальной поверхности достоверных различий в течение цикла выявлено не было. На рис. 1 представлено изменение величины угла в тазобедренном суставе при ходьбе по горизонтальной поверхности. Из полученных результатов видно, что величины углов у детей с ДЦП имели более высокие значения, чем в группе здоровых, и одно экстремальное значение в четвертой фазе локомоторного цикла, равное  $216,45^\circ$ . Таким образом, при ходьбе по горизонтальной поверхности движение в тазобедренном суставе у здоровых детей имело более плавный характер, чем у детей с ДЦП.

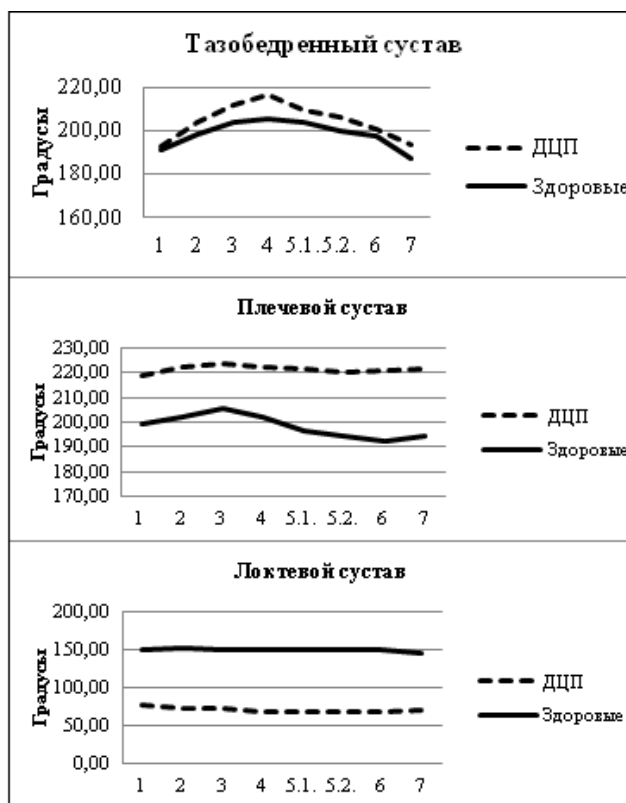


Рис. 1. Значения углов в суставах нижних и верхних конечностей при ходьбе по горизонтальной поверхности

При исследовании величины углов в суставах верхних конечностей при ходьбе было показано, что изменения величины угла в плечевом суставе в группе ДЦП были намного больше и имели более плавный характер по сравнению со значениями в группе здоровых детей. Тогда как изменения величины угла в локтевом суставе, наоборот, имели более низкие значения, чем в группе здоровых детей. Таким образом, дети с ДЦП при ходьбе выполняли плавные движения верхними конечностями, сгибая руки в плечевом и разгибая в локтевых суставах (рис. 1).

На рис. 2 представлена динамика скоростей движений суставов в горизонтальной и вертикальной плоскостях при ходьбе. Показано, что у детей, больных ДЦП, минимальное значение скорости движения голеностопного сустава, равное  $-1025,23$  мм/с, наблюдалось в третьей фазе цикла, а максимальное, равное  $517,94$  (мм/с), – в фазе 5.2. Таким образом, изменение скорости в горизонтальной плоскости у детей с ДЦП имело более выраженный характер с резким увеличением скорости в четвертой фазе, тогда как изменение скорости у здоровых детей имело более пологий характер.

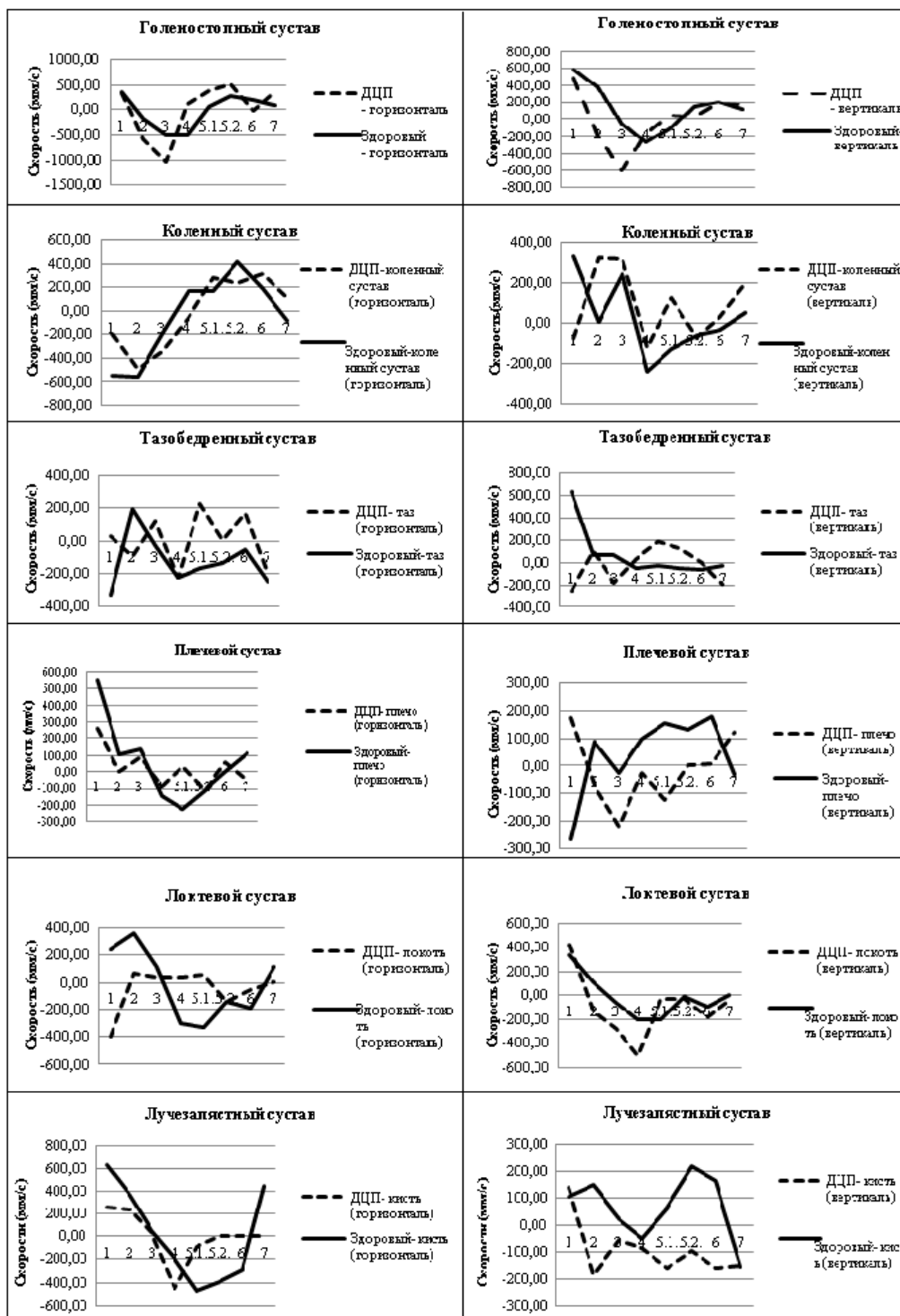


Рис. 2. Значения скоростей движения суставов нижних и верхних конечностей в горизонтальной и вертикальной плоскостях при ходьбе по горизонтальной поверхности

При изучении динамики скорости движения коленного сустава в горизонтальной плоскости в течение локомоторного цикла были получены данные, аналогичные голеностопному суставу. Однако значения скорости у детей с ДЦП в голеностопном суставе в горизонтальной плоскости были достоверно выше, чем в коленном.

Динамика скорости тазобедренного сустава в горизонтальной плоскости имела трехфазный характер, с экстремальными значениями в третьей, пятой и шестой фазах ходьбы. В группе здоровых детей скорость достигала наибольшего значения во вторую фазу. В целом скорость

тазобедренного сустава в горизонтальной плоскости у детей с ДЦП была выше, чем у здоровых. При анализе изменения скорости тазобедренного сустава в вертикальной плоскости было показано, что у детей с ДЦП она резко повышалась во второй и пятой фазах локомоторного цикла, тогда как в группе здоровых детей скорость имела максимальное значение в первой фазе – 629,50 мм/с, а затем снижалась в течение всего цикла ходьбы.

При исследовании скорости голеностопного сустава в вертикальной плоскости при ходьбе в группе детей с ДЦП было выявлено два экстремума: минимум

составил  $-600,89$  мм/с, а максимум –  $486,32$  мм/с, причем скорость в группе здоровых детей на всем протяжении цикла была достоверно выше, чем в группе детей с ДЦП. Максимальное значение скорости движения коленного сустава в вертикальной плоскости у детей с ДЦП наблюдалось в шестой фазе, тогда как в группе здоровых детей – во второй половине пятой фазы. Таким образом, у здоровых детей коленный сустав двигался вверх в первой половине шага, затем перемещался вниз. У детей, больных ДЦП, движение колена вверх происходило позже, во второй половине шага совершались колебательные движения вверх и вниз.

Движения верхних конечностей относительно всех плоскостей совершались в противофазе к движениям нижних конечностей. Кинематические кривые, описывающие движения рук, имели форму, близкую к синусоидальной (с периодом, равным циклу ходьбы). Скорость движения плечевого сустава в горизонтальной плоскости в обеих группах имела максимальное значение в первой фазе, которое затем снижалось в течение всего цикла ходьбы.

Принципиальные различия были выявлены при исследовании скорости плечевого сустава в вертикальной плоскости. Так, в группе детей с ДЦП максимальное значение скорости достигалось в первой фазе, а минимальное – в фазе 5.2. Таким образом, было показано, что в группе детей с ДЦП в начальной фазе ходьбы происходило смещение плечевого сустава вверх, затем плечо смещалось вниз, а в заключительных фазах опять поднималось вверх. В группе здоровых детей, наоборот, в первой фазе ходьбы наблюдалось смещение плеча вниз, далее, в течение всего цикла, происходил подъем вверх и в заключительной фазе – опять смещение плечевого сустава вниз.

Скорость движения локтевого сустава в вертикальной плоскости в группе детей с ДЦП имела минимальные значения в четвертой фазе ходьбы, причем значения скорости в течение всего цикла ходьбы у здоровых детей были достоверно выше, чем у детей с ДЦП. Скорость в горизонтальной плоскости в группе детей с ДЦП незначительно колебалась во всех фазах цикла, при этом минимальное значение, равное  $-396,21$  мм/с, регистрировалось в первой фазе ходьбы. В группе здоровых детей скорость имела максимальное значение во второй фазе цикла, а минимальное, равное  $-331,23$  (мм/с), – в фазе 5.1. Таким образом, в процессе ходьбы в группе детей с ДЦП отмечалось увеличение скорости движения локтевого сустава в горизонтальной плоскости, по сравнению с группой здоровых детей.

Скорость движения лучезапястного сустава в горизонтальной плоскости у больных ДЦП была минимальной в четвертой фазе цикла ( $-458,32$  мм/с), а в группе здоровых детей минимальное значение, равное  $-475,57$  мм/с, достигалось в фазе 5.1. В обеих группах в первую фазу ходьбы наблюдалось резкое снижение скорости в горизонтальной плоскости с последующим ее увеличением в заключительной фазе цикла. Кроме того, в вертикальной плоскости у детей с ДЦП наблюдались колебания скорости движения запястья в течение всего цикла ходьбы, тогда как у здоровых детей в заключительной фазе цикла происходил резкий подъем запястья вверх (см. рис. 2).

Полученные результаты позволяют выделить основные отличия в построении динамического стереотипа ходьбы по горизонтальной поверхности у детей, больных ДЦП. Динамика углов в суставах нижних конечностей качественно не различалась. При этом угол сгибания в тазобедренном суставе у больных ДЦП был несколько выше.

Однако со стороны скоростей и направления перемещений частей тела наблюдались выраженные различия. ОЦТ у здорового ребенка перемещалось вперед и вверх преимущественно в первой половине шага. У больных детей движение начиналось с перемещения вниз, основное смещение вперед происходило во второй фазе шага и сопровождалось некоторым подъемом вверх.

Движения коленного и голеностопного суставов в горизонтальной плоскости осуществлялись одинаково, хотя у больных детей скорость перемещения голеностопного сустава была выше. Однако в вертикальной плоскости движение коленного сустава у больных ДЦП отличалось принципиально. У здоровых детей колено двигалось вверх в первой половине шага, затем перемещалось вниз. У детей, больных ДЦП, движение колена вверх запаздывало, во второй половине шага совершалось 2–3 колебательных движения вверх-вниз. Такой дисбаланс проявляется и в большей скорости движения вниз голеностопного сустава у больных детей.

Выраженные различия между здоровыми детьми и страдающими ДЦП обнаружены в работе верхних конечностей. Прежде всего, для больных характерны большие величины углов в плечевом суставе и меньшие – в локтевом на всем протяжении шага.

Характер движения плеча по горизонтали у здоровых и больных существенно не различался. В то же время в вертикальной плоскости движения были противоположны. У здоровых начало шага сопровождалось движением плеча вниз, затем на всем протяжении шага плечо перемещалось вверх и в заключительной фазе снова опускалось. У больных детей, напротив, плечо в начале шага перемещалось вверх, затем в течение всего шага смещалось вниз, в последней фазе вновь отмечался подъем. Интересно отметить, что как у больных, так и у здоровых детей движения ОЦТ и плечевого пояса на протяжении всего шага совершались в противофазе.

Движения локтя и запястья у здоровых детей совпадали по фазе как по горизонтали, так и по вертикали. Начало шага сопровождалось движением руки вперед и вверх, в третью – пятую фазы – назад и вниз, затем снова вверх. У детей, больных ДЦП, движения локтя и запястья по горизонтали осуществлялись в противофазе – шаг начинался с движения локтя назад, а запястья – вперед. В третью – пятую фазы направления менялись – локоть двигался вперед, а запястье назад. В вертикальной плоскости у больных детей мы наблюдали медленные движения запястья вверх-вниз.

Основными отличиями динамического стереотипа ходьбы по ровной поверхности у детей, больных ДЦП, являются задержка перемещения ОЦТ вперед (оно происходит во вторую половину шага) и дезорганизация движений нижних конечностей (особенно колена) в вертикальной плоскости. Из-

менения структуры движения плечевого пояса и верхних конечностей можно рассматривать как компенсаторные – вертикальные перемещения плеча подстраиваются под движения ОЦТ, оставаясь в противофазе к последним. Происходит рассогласо-

вание движений локтя и запястья – они так же перемещаются в противофазе.

Выявленные биомеханические особенности ходьбы у детей, страдающих ДЦП, могут послужить основой для разработки программ реабилитации.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Семенова К.А. Восстановительное лечение детей с перинатальным поражением нервной системы и детским церебральным параличом. М. : Закон и порядок, 2007. 616 с.
2. Imms C. Children with cerebral palsy participate: a review of the literature // *Disabil. Rehabil.* 2008. Vol. 11/30;30(24). P. 1867–1884.
3. Дубровский В.И., Федорова В.Н. Патологическая биомеханика // *Биомеханика* : учеб. для сред. и высш. учеб. заведений. М. : Изд-во ВЛАДОС-ПРЕСС, 2003. С. 591–628.
4. Петрушанская К.А., Витензон А.С. Исследование структуры ходьбы больных детским церебральным параличом // *Российский журнал биомеханики*. 2005. Т. 9, № 3. P. 56–69.
5. Витензон А.С. Закономерности нормальной и патологической ходьбы человека. М. : Зеркало-М, 2003. 271 с.
6. Никитин С.Н. Теория автоматического регулирования – методологическая основа процесса оптимального управления двигательными действиями // *Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта*. 2006. № 5. С. 76–83.
7. Капилевич Л.В. Физиологический контроль технической подготовленности спортсменов // *Теория и практика физической культуры*. 2010. № 11. С. 12–15.
8. Витензон А.С., Петрушанская К.А. От естественного к искусственному управлению локомоцией. М. : Научно-медицинская фирма МБН, 2003. 448 с.
9. Krivoshchekov S.G., Lushnikov O.N. Psychophysiology of sports addiction (exercises addiction) // *Fiziologija cheloveka*. 2011. № 37 (4). P. 135–140.

Статья представлена научной редакцией «Психология и педагогика» 4 сентября 2014 г.

#### BIOMECHANICAL CHARACTERISTICS OF GAIT OF CHILDREN WITH CONGENITAL LOCOMOTION DISORDERS

*Tomsk State University Journal*. No. 387 (2014), 203-207.

**Korshunov Sergey D, Davletyarova Kseniya V.** Tomsk Polytechnic University (Tomsk, Russian Federation). E-mail: sergeiffk1474@gmail.com, davletyarova@rambler.ru

**Kapilevich Leonid V.** Tomsk State University, Tomsk Polytechnic University (Tomsk, Russian Federation). E-mail: kapil@yandex.ru

**Keywords:** walk; locomotion; movement disorders; biomechanics.

Peculiarities of biomechanical characteristics of the gait of children with congenital locomotion disorders by example of cerebral palsy were studied. The obtained results allow identifying the main differences in the dynamic stereotype of walk on a horizontal surface for children with cerebral palsy. Dynamics of the angles in the joints of the lower limbs did not differ qualitatively. The angle of hip flexion for patients with cerebral palsy was slightly higher. However, by the speed and direction of body parts movement marked differences were observed. The common center of gravity of healthy child moved forward and upwards predominantly in the first half of the step. Sick children began to move downwards, the main move forward occurred in the second phase of the step and was accompanied by some going upwards. Marked differences between healthy children and those suffering from cerebral palsy were found in the upper limbs. First of all, children with disorders have larger values of the angles of the shoulder joint and smaller – in the elbow joint during the step. The horizontal movement of the shoulder did not differ significantly. At the same time, the vertical movements were opposite. Healthy children started the step with moving the shoulder down, then during the step the shoulder moved up, and in the final phase it lowered again. Sick children, by contrast, at the beginning of the step moved the shoulder up, then during the step moved it down, and in the final phase it went up again. Interestingly, in both groups the common center of gravity and the shoulder girdle during the step was made in the opposite phase. The main differences between the dynamic stereotype of walk on a flat surface of children with cerebral palsy is to delay moving the common center of gravity forward (it takes place during the second half of the step) and disorganization of leg movements (especially the knee) in the vertical plane. Changes in the structure of the shoulder girdle and upper limb motion can be considered as compensatory – vertical movements of the shoulder adjust to the movement of the common center of gravity remaining in the opposite phase to the latter. Errors occur in the motion of the elbow and the wrist – they move in the opposite phase. The identified biomechanical features of the gait of children suffering from cerebral palsy can serve as a basis for the development of rehabilitation programs.

#### REFERENCES

1. Semenova K.A. *Vosstanovitel'noe lechenie detey s perinatal'nym porazheniem nervnoy sistemy i detskim tserebral'nym paralichom* [Rehabilitation treatment of children with perinatal lesions of the nervous system and cerebral palsy]. Moscow: Zakon i poryadok Publ., 2007. 616 p.
2. Imms C. Children with cerebral palsy participate: a review of the literature. *Disabil. Rehabil.*, 2008, vol. 11/30;30(24), pp. 1867-1884. DOI: 10.1080/09638280701673542.
3. Dubrovskiy V.I., Fedorova V.N. *Biomekhanika* [Biomechanics]. Moscow: VLADOS-PRESS Publ., 2003, pp. 591-628.
4. Petrushanskaya K.A., Vitenzon A.S. Investigation of Gait Structure in Patients with Infantile Cerebral Palsy. *Rossiyskiy zhurnal biomekhaniki – Russian Journal of Biomechanics*, 2005, vol. 9, no. 3, pp. 56-69. (In Russian).
5. Vitenzon A.S. *Zakonomernosti normal'noy i patologicheskoy khod'by cheloveka* [Laws of normal and pathological human gait]. Moscow: Zerkalo-M Publ., 2003. 271 p.
6. Nikitin S.N. Teoriya avtomaticheskogo regulirovaniya – metodologicheskaya osnova protsesssa optimal'nogo upravleniya dvigatel'nymi deystviyami [The theory of automatic regulation – methodological basis for the process of optimal control of motor actions]. *Vestnik Baltiyskogo federal'nogo universiteta im. I. Kanta*, 2006, no. 5, pp. 76-83.
7. Kapilevich L.V. Fiziologicheskii kontrol' tekhnicheskoy podgotovlennosti sportsmenov [Physiological control of technical readiness of athletes]. *Teoriya i praktika fizicheskoy kul'tury – Theory and Practice of Physical Culture*, 2010, no. 11, pp. 12-15.
8. Vitenzon A.S., Petrushanskaya K.A. *Ot estestvennogo k iskusstvennomu upravleniyu lokomotsiy* [From natural to artificial management of locomotion]. Moscow: MBN Publ., 2003. 448 p.
9. Krivoshchekov S.G., Lushnikov O.N. Psychophysiology of sports addiction (exercises addiction). *Fiziologija cheloveka*. 2011, no. 37 (4), pp. 135-140. (In Russian).

Received: 04 September 2014