

**ФИЗИОЛОГИЯ ВЫСШЕЙ НЕРВНОЙ
(ПСИХИЧЕСКОЙ) ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ЧЕЛОВЕКА**

УДК 612.833

**КИНЕМАТИКА ПОДЪЕМА НА СТУПЕНЬКУ У ДЕТЕЙ
И ПОДРОСТКОВ С РАННИМ ДЕТСКИМ АУТИЗМОМ**

© 2015 г. Н. Л. Маляр, Е. В. Максимова¹, В. Л. Талис²

Московский физико-технический институт (государственный университет)

¹*ГБОУ Школа № 1206 (отделение № 11 “Наш дом”)*

²*Институт проблем передачи информации им. А.А. Харкевича РАН*

e-mail: malyar@phystech.edu; veraltalis@gmail.com; elena@maximova.org

Поступила в редакцию 12.08.2015 г.

Принята в печать 26.10.2015 г.

Анализировали кинематику подъема на ступеньку и спуска с нее, а также подготовку к этому движению у детей и подростков с диагнозом ранний детский аутизм (РДА) в сравнении со здоровыми детьми и подростками соответствующего возраста. В исследовании участвовали 8 здоровых и 6 больных подростков, а также 7 здоровых и 6 больных детей. Результаты выявили, что при подготовке к подъему на ступеньку больные обеих возрастных групп имели значительно большие колебания скорости тазобедренного сустава, чем их здоровые ровесники. При подготовке к спуску такие колебания скорости были характерны только для больных подростков, но не для больных детей, у которых такие колебания скорости при подготовке к движению наблюдались даже реже, чем у здоровых ровесников. Анализ кинематики самого движения показал, что при подъеме на ступеньку больные обеих групп имели существенно меньшее отведение тазобедренного сустава, чем здоровые, а при спуске – разгибание голеностопного сустава у больных подростков было значительно меньше, чем у их здоровых ровесников. Предполагается, что возрастные особенности кинематики движений при подъеме и спуске со ступеньки больных РДА свидетельствуют об ухудшенной координации больных подростков по сравнению как со здоровыми подростками, так и с больными детьми.

Ключевые слова: подъем/спуск со ступеньки, ходьба, ранний детский аутизм, кинематика движения, дети, подростки.

**Kinematics of Stair Ascent in Children and Adolescents
with Autism Spectrum Disorder**

N. L. Malyar, E. V. Maximova¹, V. L. Talis²

Moscow Institute of Physics and Technology

¹*GBOU School № 1206 (department № 11, “Our home”),*

²*Institute for Information Transmission Problems (Kharkevich Institute)*

e-mail: malyar@phystech.edu; veraltalis@gmail.com; elena@maximova.org

We analyzed kinematics of stair ascent and descent in autistic children and adolescents in comparison with age-matched healthy children and adolescents. Eight healthy adolescents, 6 autistic adolescents, 7 healthy children and 6 autistic children participated in the study. We found that autistic subjects of both groups showed significantly more fluctuations of hip joint angular velocity than age-matched control subjects while preparing for stair ascent. During preparation for stair descent these velocity fluctuations appeared mainly in autistic adolescents, moreover, autistic children exhibited less velocity fluctuations than children in control group while preparing for stair descent. The kinematics of the movement itself demonstrated significantly less hip abduction in both autistic children and adolescents than in age-matched controls during stair ascent, and less ankle joint plantar extension in autistic adolescents than in healthy adolescents during stair descent. We suppose that age-related changes in kinematics of leg motion during stair ascent and descent in autistic patients indicate aggravated motor coordination in autistic adolescents as compared with both healthy adolescents and autistic children.

Keywords: stair ascent/descent, gait, autism, movement kinematics.

DOI: 10.7868/S0044467716010111



ВВЕДЕНИЕ

Ранний детский аутизм (РДА) — это нарушение развития, в первую очередь характеризующееся недостаточным социальным взаимодействием ребенка с окружающим миром, общим дефицитом коммуникации (вербального и невербального общения), ограниченными интересами, повторяющимися, однообразными действиями [APA, 2013, Лушеккина, Стрелец, 2014]. В целом, если психологические особенности детей с РДА широко изучаются [Baron-Cohen, 2009], то нарушения двигательного и позного контроля у детей этой группы исследуются мало. На сегодняшний день гипотонию, иногда дистонию [Molloy et al., 2003], дипраксию и атаксию [Downey, Rapport, 2012], ухудшение двигательного обучения и приобретения двигательных навыков, ухудшение способности имитировать движения другого [Larson, Mostofsky, 2008], нарушение ходьбы и поддержания вертикальной стойки [Kohen-Raz et al., 1992], планирования движений [Schmitz et al., 2003] принято считать наиболее часто встречающимися двигательными расстройствами при РДА.

Исследования вертикальной стойки больных с РДА показали ее ухудшение в условиях усложненного стояния: у детей с РДА стойка становилась менее устойчивой, чем у их здоровых ровесников при стоянии с закрытыми глазами, на неустойчивой поверхности или на одной ноге, что выражалось в увеличении площади колебаний общего центра тяжести тела [Minshew et al., 2004].

Исследования локомоции больных с РДА показали изменение регулярных, ритмичных и автоматических паттернов, что проявлялось в виде большего разнообразия колебательных движений, чем у здоровых [Vernazza-Martin et al., 2005]. С другой стороны, собственно выполнение локомоторного акта не было нарушено. В частности, не наблюдалось существенных отклонений от нормы основных параметров ходьбы больных детей (длительность шага, относительное время фазы опоры и переноса стопы, средняя скорость, частота шага). Однако усложнение локомоции (целевая ходьба) выявило существенные различия между детьми с РДА и здоровыми ровесниками: большинство больных детей в эксперименте Vernazza-Martin с коллегами не справились с заданием, в котором требовалось идти по коридору к цели в виде игрушечного домика. Авторы полагают, что у детей с

аутизмом затруднены определение цели двигательной задачи и выбор соответствующей траектории.

Известно, что Н.А. Бернштейн различал следующие уровни построения движений: уровень А, на котором регулируется противодействие гравитации, контролируются поза и общая устойчивость тела; уровень В, на котором формируются ритмические паттерны двигательных автоматизмов; уровень С, контролирующий движение к цели [Бернштейн, 1947]. С этой точки зрения, у больных с РДА проявляются изменения, относящиеся к уровню С [Максимова, 2012], на котором особенно важен контроль движения на основе сенсорной обратной связи и наличия так называемого “внутреннего представления о себе и об окружающем пространстве” [Гурфинкель, Левик, 1995]. В пользу этого говорят, например, данные о неполноценном формировании у больных с РДА упреждающих команд при выполнении бимануальной разгрузки [Schmitz et al., 2003], когда испытуемый снимает одной рукой груз с другой руки. Действительно, если у здорового человека при разгрузке одной руки другой разгружаемая рука не сгибается из-за активности сгибателя предплечья вследствие упреждающего торможения в этой мышце, то отсутствие упреждающего торможения у детей с РДА, поднимает вопрос о сохранности у них внутреннего представления об окружающей среде и схеме собственного тела. Если же внутреннее представление у здорового человека корректируется в зависимости от поступающей сенсорной информации с целью сформировать адекватный двигательный ответ [Гурфинкель, Левик, 1991; Гурфинкель, Левик, 1995], то у больных с РДА нарушение сенсомоторной интеграции будет приводить к тому, что с возрастом будет наблюдаться не улучшение, а ухудшение управления движениями. Исходя из гипотезы о недостаточном развитии внутреннего представления у детей с РДА [Haswell et al., 2009], можно предполагать, что ухудшение движения у детей с РДА должно проявляться наиболее заметно при выполнении более сложных задач, требующих активного взаимодействия с окружающим миром. В настоящей работе мы выбрали задачу подъема на ступеньку и спуска с нее, как пример целенаправленного движения, которое, являясь обычным движением в повседневной жизни, тем не менее, является более сложной биомеханической задачей,

чем обыкновенная ходьба по ровной поверхности. При выполнении этого движения требуется постоянно корректировать активность мышц нижних конечностей в соответствии с размером ступеньки, типом поверхности и т.д. После постановки одной ноги на ступеньку вес тела удерживается на этой ноге до того момента, пока вторая нога не коснется той же поверхности [Heller et al., 2001; Protoparadaki et al., 2007]. Предполагалось, что анализ данной двигательной задачи выявит, особенности сенсорной дезинтеграции у больных с РДА по показателям как временной, так и пространственной организации движения. Сравнение кинематики данного движения между детьми и подростками с РДА и их здоровыми сверстниками поможет выявить, какие структуры мозга связаны с формированием внутреннего представления об окружающем мире. Обнаружение связей такого рода является одним из методов описания как механизма возникновения аутизма [Penh, 2006], так и развития координации движения у здорового человека [Гурфинкель, Левик, 1991].

МЕТОДИКА

Испытуемые

В связи с тем, что на сегодняшний день показаны значительные различия двигательной координации и позной устойчивости у больных с РДА в зависимости от возраста (см., например, работу [Graham et al., 2014]), как больные, так и здоровые испытуемые были разделены на две возрастные группы: детей и подростков. Обследовано 8 здоровых (11.0 ± 0.9 лет) и 6 больных подростков (12 ± 1.0 лет), проходивших занятия в ГБОУ Школа № 1206 (отделение № 11 “Наш дом”), а также 7 здоровых (один из которых участвовал в экспериментах дважды, в возрасте 6 и 6.5 лет) и 6 больных детей (двое из которых участвовали в экспериментах с перерывом в полгода и год). Поскольку обследования детей, участвовавших повторно, рассматривались как два разных опыта, средний возраст здоровых детей составил 7.0 ± 0.9 лет, средний возраст больных детей — 6.8 ± 1.0 лет. Данные о больных детях и подростках приведены в табл. 1. Все здоровые испытуемые и родители больных были информированы о процедуре исследований и дали согласие на участие в экспериментах.

Анализ кинематики движений

Регистрацию движений осуществляли с помощью комплекса “Видеоанализ-Биософт”, на основе двух синхронизированных видеокамер для регистрации с частотой 90 Гц положения светоотражающих маркеров (сферической формы, диаметром 25 мм), подсвечиваемых инфракрасными источниками излучения. Регистрировали положение пяти маркеров на правой стороне туловища:

- 1) на пятом плюснефаланговом суставе,
- 2) на наружной лодыжке,
- 3) в точке, посередине между латеральным эпикондилитом и латеральной головкой малоберцовой кости,
- 4) на большом вертеле бедренной кости,
- 5) на акромионе.

Непосредственно перед началом, и во время движения подъема на ступеньку и спуска с нее регистрировали положение маркеров в трехмерном пространстве, а затем вычислялись изменения углов в сагиттальной плоскости голеностопного, коленного и тазобедренного сустава, также их скорость, и ускорение. Кроме того, для тазобедренного сустава вычислялось изменение его угла во фронтальной плоскости.

Процедура

Испытуемые стояли у ступеньки высотой 10 см, шириной — 40 см и длиной 38 см и, по команде экспериментатора, выполняли подъем правой ногой на ступеньку. При обследовании больных перед ними на расстоянии 2 м находилась мама или экспериментатор. В некоторых пробах за спиной больного также стоял методист и дополнительно побуждал его к движению. Таким образом, необходимо отметить, что движение больного отличалось от движения здорового тем, что оно было частью движения к цели (маме). Поставив правую ногу на ступеньку, испытуемый затем ставил на ступеньку левую ногу, после чего движение подъема на ступеньку считалось законченным (см. ниже — момент времени T4). Затем испытуемый сходил со ступеньки также с правой ноги. Перед регистрацией экспериментатор показывал движение, после чего испытуемый тренировался, выполняя его 1–2 раза. Возникавшие у больных случаи переступания через ступеньку или ее обход (2% всех проб), а также движения, начинавшиеся с левой ноги, не рассматривались (23%). По-

Таблица 1. Характеристика обследованных с диагнозом РДА**Table 1.** Characteristics of subjects with ASD

| Испытуемый | Возраст, лет, пол | Первые симптомы, год/мес. | Уровень развития, лет | Уровень вербального общения | Уровень социального взаимодействия | Чтение, письмо |
|------------|-------------------|---------------------------|-----------------------|--|---|-------------------------|
| Г | 5, м | С рождения | 2–3 | На 2–2.5 года, короткие неразвернутые фразы, эхолалии, нет диалога | Самодостаточен, обращается к взрослым по надобности, детей избегает | Нет |
| Б | 7, м | Раньше 2-х лет | 3 | Эхолическая речь без согласных | Контакт с некоторыми взрослыми | Нет |
| Д | 6, м | 2/2 | 4 | Низкая | Контакт со взрослыми, активные игры с детьми | Читает, пишет письма |
| | 7, м | | | | | |
| Ж | 8, м | 2/6 | 3 | Ребенок 9–10 мес. | Редкие контакты со взрослыми | Нет |
| Л | 8, м | 1/6 | 2 | Короткие фразы | Затруднено (без обратной связи) | Нет |
| М | 7, м | 1/6 | 4 | Низкая | Контакт только со взрослыми | Читает |
| | 7.5 м | | | | | |
| М | 14, м | 3 | 10 | Норма | Плохо слушает, стереотипная речь | Читает, пишет |
| П | 12, ж | С рождения | 4 | Короткие фразы | На уровне 4-х-летнего | Нет |
| С | 11, м | 2/6 | 3 | Заученные фразы | Желание общаться с девочками | Читает по слогам |
| Ф | 12, м | 2/6 | 8 | Низкая | С большой задержкой | Читает, пишет |
| Ш | 13, м | Около 3 лет | 7 | Бедная, эхолическая речь | Желание общаться | Начинает читать, писать |

добные ошибки встречались и у здоровых (в 15% проб зарегистрировано ошибочное начало движения с левой ноги, в 1% – перешагивание), но в целом, все здоровые справились с заданием. Из 18 больных детей и 11 больных подростков требуемое движение выполнили 8 и 6 человек, соответственно, то есть только для 48% больных задание оказалось посильным. Некоторые больные не могли выполнить подъем и спуск с правой ноги, потому что были левшами, а у других это движение не получалось ни с правой, ни с левой ноги. Часть зарегистрированных проб также не была проанализирована из-за невозможности их обработки (долгое перекрытие и исчезновение маркеров и т.п.) или некорректного выполнения движения больными испытуемыми (бег вместо ходьбы, спотыкание и т.п.), процент таких проб составил около 1% в среднем

для всех групп испытуемых. В ходе эксперимента записывали по 3–4 пробы подъема и спуска. Длительность пробы у здоровых в среднем составляла 10 с, у больных – от 10 до 20 с, перерыв между пробами составлял 10–20 с. Таким образом, с учетом времени на освоение движения вся экспериментальная сессия имела продолжительность для больного около 10 мин, а для здорового – 5 мин. Признаков утомления не наблюдалось.

Анализ данных

Анализировали следующие суставные углы с помощью программного обеспечения комплекса “Видеоанализ-Биософт”:

– угол в тазобедренном суставе в плоскости его сгибания/разгибания, который рассчитывается на основании положения плече-

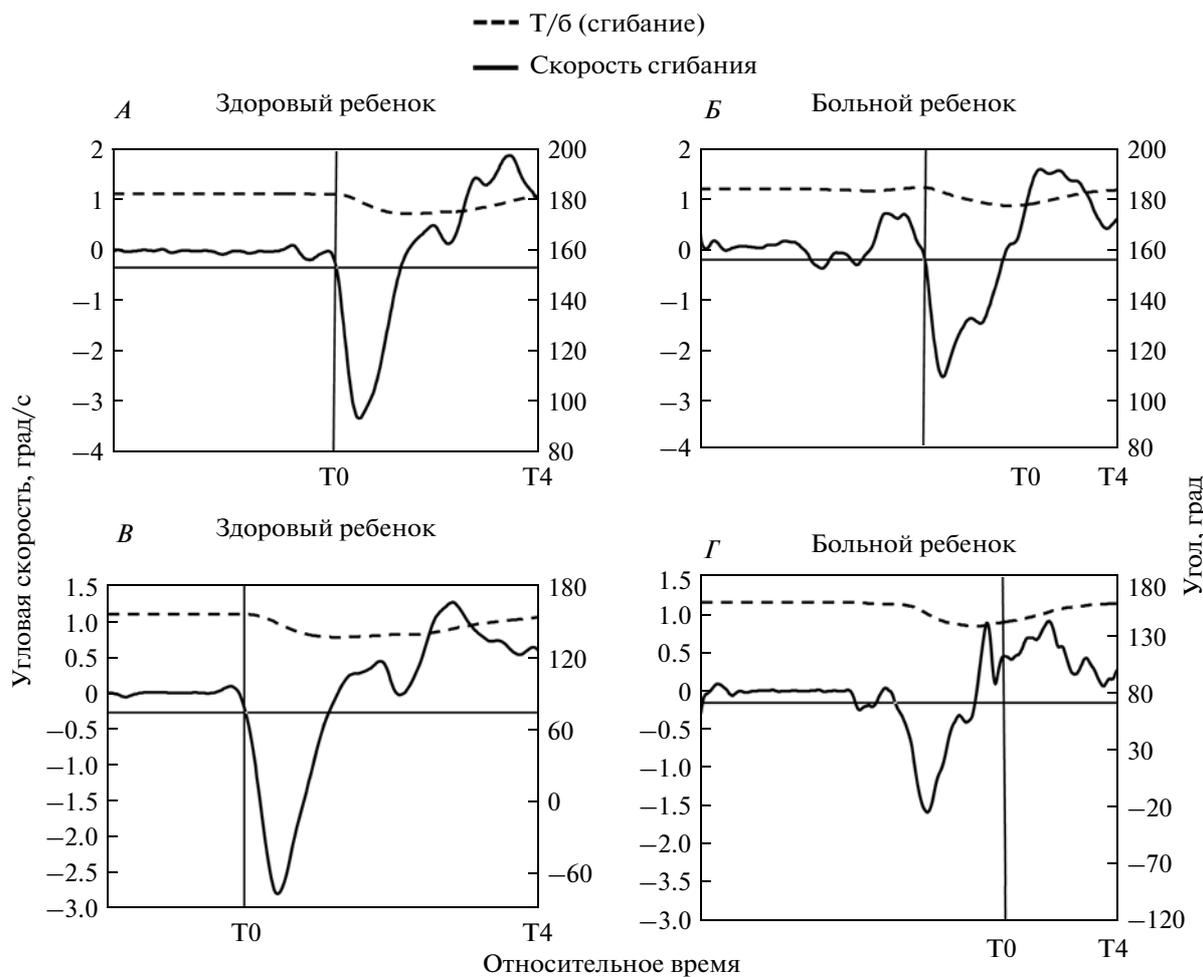


Рис. 1. Подготовка к подъему на ступеньку. Preparing for stair ascent. Индивидуальные данные скорости и угла сгибания тазобедренного сустава при подъеме на ступеньку здорового (А), больного (Б) ребенка, здорового (В) и больного (Г) подростка. Тонкой горизонтальной линией на рисунке обозначен пороговый уровень нарастания скорости до 10% от его абсолютного максимума. Т0 – относительное (нормированное ко всему времени движения) время начала, а Т4 – конца подъема.

Fig. 1. Individual data presented the velocity and angle of hip joint flexion in healthy child (А), autistic child (Б), healthy adolescent (С) and autistic adolescent (D). Thin horizontal line marks the rise of velocity of hip joint flexion up to 10% of its absolute maximum. Т0 is the relative moment of swing start, normalized to the entire movement time, Т4 is the moment of stance end.

вого, тазобедренного и коленного суставов и отсчитывается от вертикали с вентральной поверхности тела;

– угол в тазобедренном суставе в плоскости его отведения/приведения (образуется плечевым, тазобедренным и коленным суставами, отсчитывается от вертикали с латеральной стороны тела);

– угол в коленном суставе (образуется тазобедренным, коленным и голеностопным суставами, отсчитывается с дорзальной стороны тела);

– угол в голеностопном суставе (образуется коленным, голеностопным и плюснефаланговым суставом пятого пальца стопы, отсчитывается с вентральной стороны тела).

Дальнейшую обработку экспериментальных данных выполняли с помощью программы Matlab (Mathworks, Natick, Massachusetts, USA), разбивая движение подъема на 5 фаз (рис. 3):

Три фазы переноса правой ноги на ступеньку:

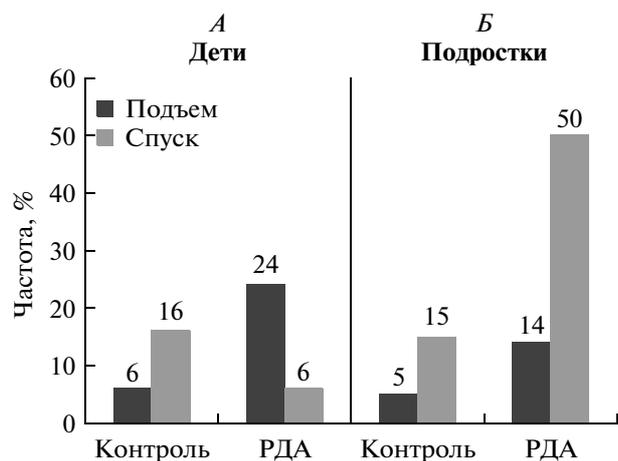


Рис. 2. Колебания скорости при подготовке к подъему и спуску со ступеньки. The velocity fluctuations during preparation for stair ascent and descent. По оси ординат – частота встречаемости дополнительных колебаний скорости сгибания тазобедренного сустава перед началом движения (см. Результаты исследований).

Fig. 2. The ordinate shows the incidence of additive fluctuations of hip joint flexion velocity during preparation for the movement (see Results).

1. начало переноса, момент времени T_0 (когда скорость сгибания тазобедренного сустава по модулю становилась больше 10% от ее максимального значения);

2. момент максимального сгибания коленного сустава, T_1 ;

3. момент максимального сгибания тазобедренного сустава, T_2 .

И две фазы опоры правой ногой на ступеньку:

1. начало опоры, время T_3 (максимальное разгибание коленного сустава при смене опорной ноги);

2. конец опоры на правую ногу, T_4 (определялся визуально, как момент времени постановки левой ноги на опору).

Спуск со ступеньки рассматривался отдельно, и анализировался аналогично подъему.

Для анализа брали значение суставных углов в каждой из выделенных фаз подъема и спуска.

Статистический анализ

Для выявления значимости изменений анализируемых параметров использовали статистические программы ANOVA. Для определения статистической достоверности при сравнении параметров движения применяли парный t-тест Стьюдента, так как распределение анализируемых данных было близко к нормальному.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Подготовка к движению подъема и спуска

На рис.1 показан угол в тазобедренном суставе в сагитальной плоскости и скорость его изменения до и во время *подъема* на ступеньку здорового (А), больного (Б) ребенка, здорового (В) и больного (Г) подростка. Видно, что движение здоровых в обеих группах начиналось, как правило, с быстрого преодоления 10% порогового значения скорости (тонкая горизонтальная линия на рис. 1), а у больных начало движения предварялось существенными колебаниями скорости. Был проведен анализ частоты встречаемости проб, когда скорость сгибания тазобедренного сустава преодолевала 10% порог более, чем 2 раза. Результаты этого анализа представлены на рис. 2. Видно, что при подготовке к *подъему* больные дети в 24% случаев имели значительные колебания скорости. Среди здоровых детей такое явление имело место только у одного испытуемого, и только в двух из шести его экспериментальных записей. Таким образом, из 32 проб, записанных у здоровых детей, лишь в двух наблюдались колебания скорости до подъема на ступеньку, т.е. в 6% всех проб (рис. 2, А). В отличие от больных детей, у больных подростков колебания скорости были лишь в 14%, а у здоровых подростков – в 5% проб (рис. 2, Б).

При подготовке к *спуску* частота возникновения дополнительных пиков на кривой скорости у больных детей уменьшилась по сравнению с подъемом от 24% до 6%, а у здоровых детей увеличилась от 6% до 16%. В результате, в отличие от подъема, у больных детей дополнительный пик скорости наблюдался даже реже, чем у здоровых детей (рис. 2, А). У подростков при подготовке к спуску дополнительные пики скорости возникали чаще, чем при подготовке к подъему: в 50% случаев у больных, в 15% – у здоровых подростков (рис. 2, Б).

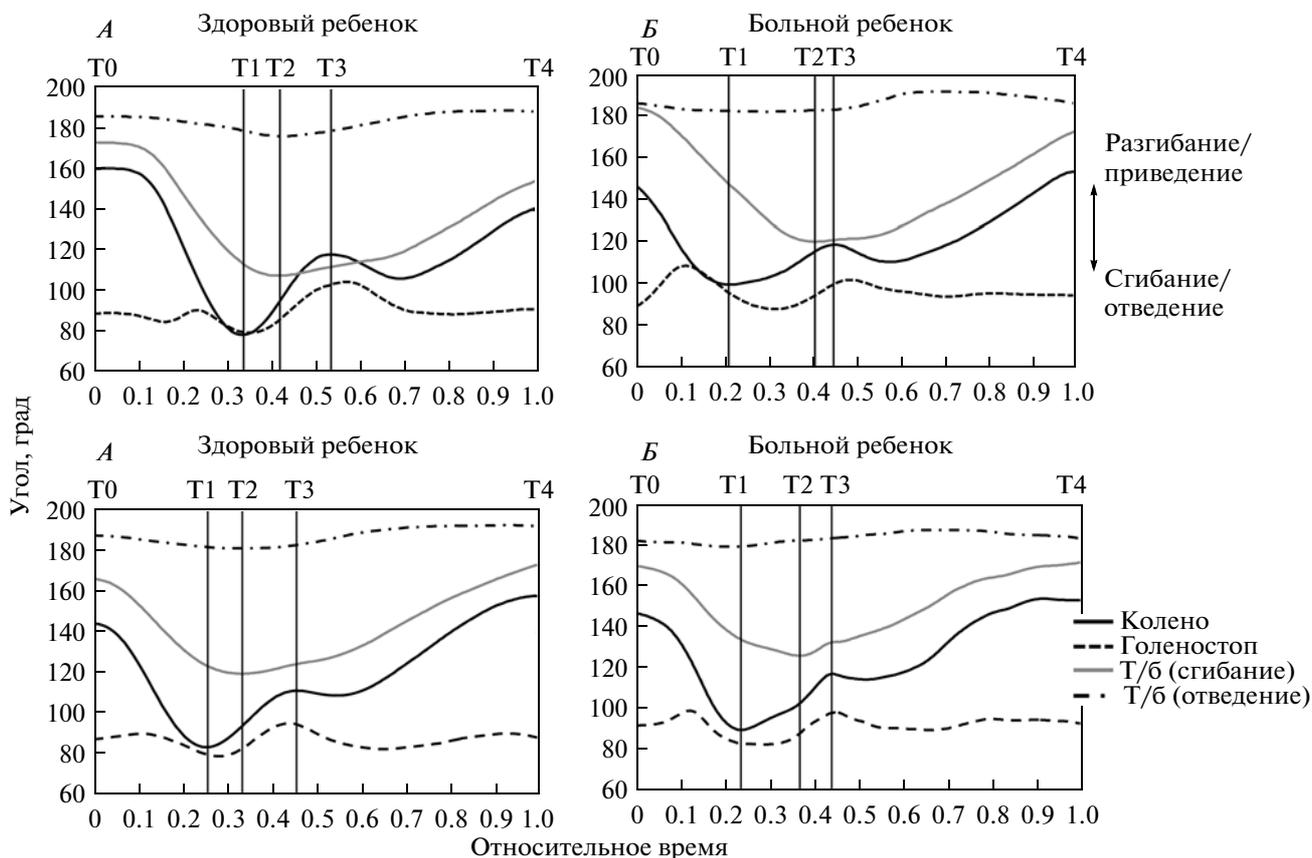


Рис. 3. Подъем на ступеньку. Stair ascent. Индивидуальные данные межсуставных углов при подъеме на ступеньку здорового ребенка (А), больного ребенка (Б), здорового подростка (В) и больного подростка (Д). Вертикальные линии на рисунке Т0 и Т4 — начало и окончание движения, Т1, Т2, Т3 — начало соответствующих фаз движения подъема (см. Методика). Время нормировано ко всему времени движения, как и на рис. 1.

Fig. 3. Individual data presented inter-joint angles during stair ascent in healthy child (А), autistic child (Б), healthy adolescent (В) and autistic adolescent (Д). Т0, Т4 vertical lines correspond to the beginning and the end of stair ascent, Т1, Т2, Т3 mark the beginnings of corresponding stair ascent phases (see Methods). Time is normalized to the entire movement time like at fig. 1.

Время движения подъема и спуска

В среднем время *подъема* больных детей составляло 1.36 ± 0.5 с, а здоровых — 1.38 ± 0.80 с. Несмотря на то, что между четырьмя группами испытуемых значимых различий во времени подъема обнаружено не было, у подростков в обеих группах прослеживалась склонность к более медленному подъему на ступеньку, чем у детей (в среднем 1.97 ± 0.66 с — у больных подростков, 1.51 ± 0.74 с — у здоровых). Больные подростки подъем на ступеньку выполняли медленнее всех.

В среднем время *спуска* больных подростков составляло 1.51 ± 0.25 с и было достоверно больше времени спуска здоровых подростков (1.21 ± 0.11 с; $p < 0.05$). Время спуска боль-

ных детей составило 1.15 ± 0.31 с, а здоровых детей — 1.12 ± 0.48 с. Видно, что спуск со ступеньки происходил быстрее, чем подъем во всех группах испытуемых, однако достоверны эти различия были только в группе здоровых подростков ($p < 0.01$).

Кинематика движения при подъеме и спуске со ступеньки

На рис. 3 представлены индивидуальные данные суставных углов при *подъеме на ступеньку* здорового (А), больного (Б) ребенка и здорового (В), больного (Д) подростка. Видно, что в интервале от Т0 до Т3 больной ребенок, по сравнению со здоровым, меньше отводит тазобедренный сустав и меньше сгиба-

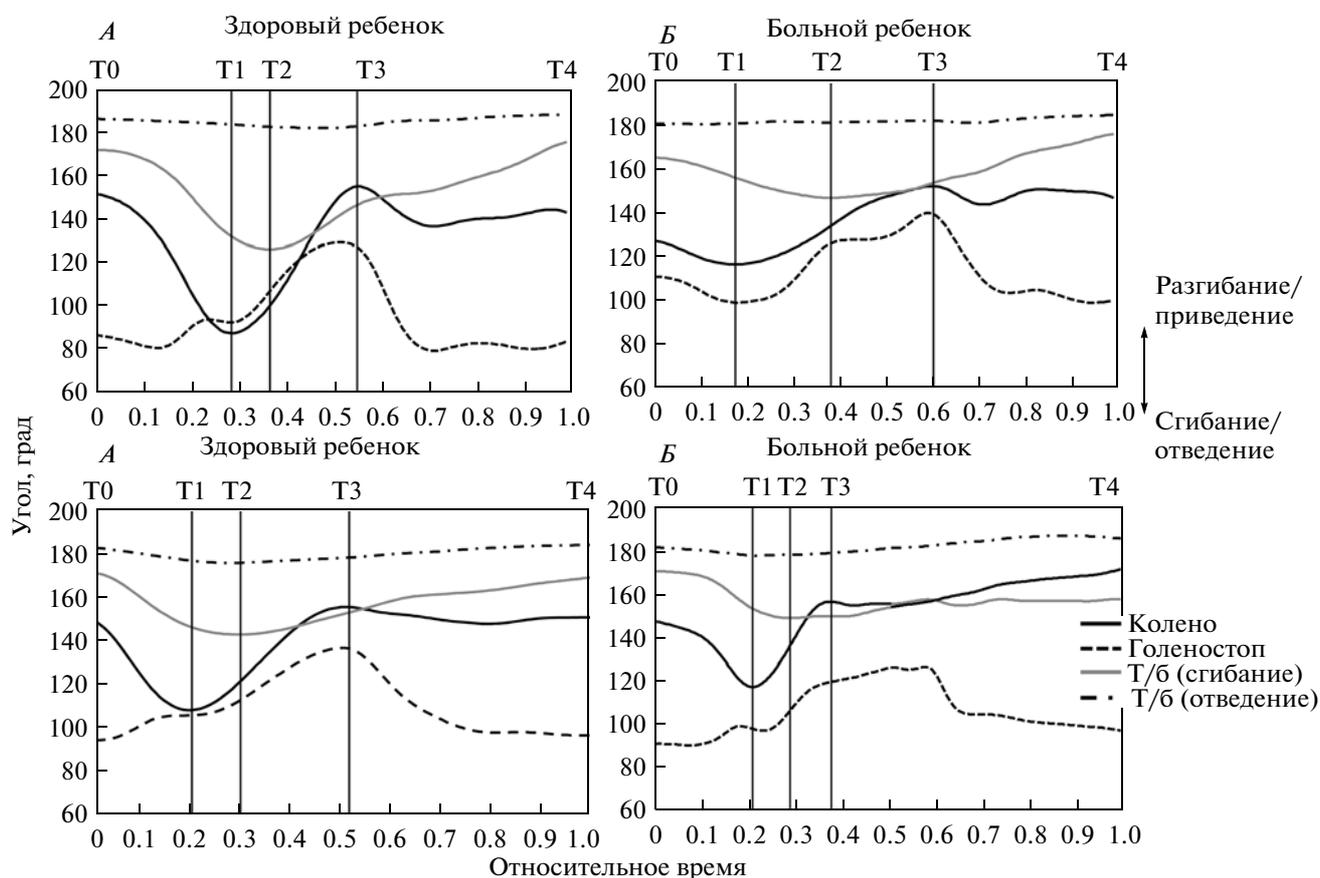


Рис. 4. Спуск со ступеньки. Stair descent. Индивидуальные данные межсуставных углов при спуске со ступеньки здорового ребенка (А), больного ребенка (Б), здорового подростка (В), больного подростка (Г). Обозначения, как на рис. 3.

Fig. 4. Individual data presented inter-joint angles during stair descent in healthy child (А), autistic child (Б), healthy adolescent (С) and autistic adolescent (Д). Designations are similar to those at fig. 2.

ет колено. Усредненные данные по всем группам испытуемых (рис. 5) показали, что амплитуда отведения тазобедренного сустава при подъеме на ступеньку у больных была значительно меньше, чем у здоровых ($p < 0.05$ и $p < 0.01$ для момента времени Т3 у детей и подростков соответственно). Временная структура шага больного ребенка при подъеме также была видоизменена: события Т1, Т2 и Т3 у здорового ребенка разнесены по времени, тогда как у больного — время максимального сгибания тазобедренного сустава (Т2) и локальный разгиб колена (Т3) практически совпадают (рис. 3, А, Б). Аналогичные различия были характерны и для здоровых и больных подростков (рис. 3, В, Г).

На рис. 4 представлены индивидуальные данные суставных углов при спуске со ступеньки здорового (А), больного (Б) ребенка и

здорового (В), больного (Г) подростка. Видно, что наиболее яркие отличия между здоровыми и больными обнаружались по значению угла в голеностопном суставе. Эти различия были статистически достоверны для группы подростков. В среднем по группе больных подростков угол в голеностопном суставе на момент времени Т3 составлял $29 \pm 5\%$ от своего значения в момент времени Т0, тогда как в среднем по группе здоровых подростков он составлял $43 \pm 5\%$ от значения в момент Т0 ($p < 0.05$). Временная структура шага у больных в обеих группах при спуске была изменена: локальный максимум разгибания колена (Т3) и момент максимального сгибания тазобедренного сустава (Т2) у здоровых (рис. 4, А, В) были менее разнесены по времени, чем у больных (рис. 4, Б, Г). Начало сгибания голеностопного сустава, вызванное

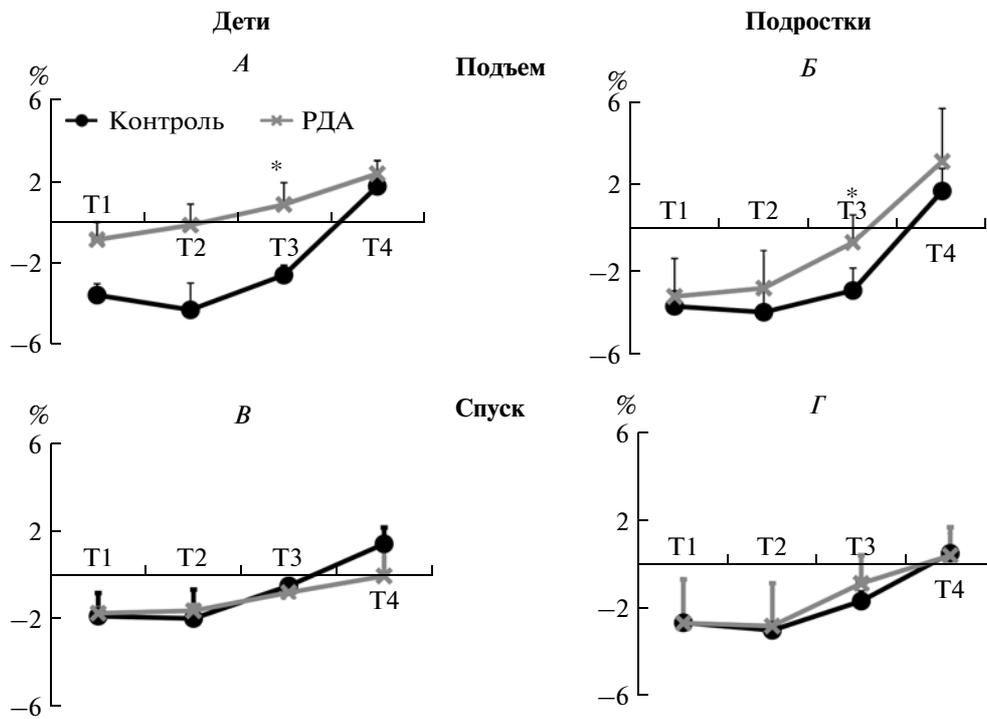


Рис. 5. Отведение тазобедренного сустава при подъеме и спуске. Hip abduction during stair ascent and descent. Усредненные по всем группам значения угла отведения тазобедренного сустава при подъеме на ступеньку детей (А) и подростков (Б), при спуске со ступеньки детей (В) и подростков (Г) в моменты времени T1, T2, T3, T4. Угол отведения тазобедренного сустава дан в процентах от его значения в T0.

Fig. 5. Mean values of hip joint abduction during stair ascent in children (A) and adolescents (B) and during stair descent in children (C) and adolescents (D) at T1, T2, T3, T4. Hip joint abduction angle is expressed in percentage of its value at T0.

касанием носка с полом, у здоровых испытуемых и у больных детей, как правило, совпало с моментом T3 (рис. 4, А, Б, В), а до этого момента голеностопный сустав разгибался параллельно с разгибанием проксимальных суставов. У больных же подростков касание носка с полом значительно задержано: после момента T3, максимального разгибания колена, разгибание голеностопного сустава продолжается, т.е. больной подросток опускал на пол разогнутую ногу с более подтянутым носком, чем испытуемые в других группах. В результате этого, сгибание голеностопного сустава после касания с полом у здоровых испытуемых происходило более медленно и плавно, чем у больных детей, и особенно, больных подростков (рис. 4, А, В по сравнению с рис. 4, Б, Г). В целом, кинематические профили суставных углов больных, как при подъеме, так и при спуске, были более вариабельны, чем у здоровых, наблю-

дались перегибы и дополнительные колебания (рис. 3, 4).

Анализ амплитуды тазобедренного сустава во фронтальной плоскости при подъеме на ступеньку (рис. 3, 4, 5) показал уменьшение амплитуды отведения тазобедренного угла при подъеме, как у детей, так и подростков с диагнозом РДА по сравнению с возрастной нормой. При спуске со ступеньки существенных различий в отведении тазобедренного сустава между группами больных и здоровых обследованных обнаружено не было.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В настоящей работе показано, что все испытуемые спускались со ступеньки быстрее, чем поднимались на нее. Эти результаты согласуются с данными, полученными для здоровых взрослых испытуемых [Protoparadaki et al., 2007]. Действительно, подъем на ступеньку является “целенаправленным движе-

нием”, состоящим, по крайней мере, из трех подзадач: подъема правой ноги на необходимую высоту, постановки ее на опору и подтягивания левой ноги на опору, когда в каждой из этих фаз существует задача поддержания динамического равновесия тела на одной ноге [Winter et al., 1998]. С этой точки зрения спуск — задача менее сложная: необходимо опустить сначала правую ногу на “известную”, большую по площади поверхность пола, а затем опустить туда же и левую ногу. Показанное в нашей работе более быстрое выполнение спуска по сравнению с подъемом во всех обследованных группах указывает на одинаковую оценку сложности этих движений независимо от возраста и заболевания.

Подготовка к движению подъема и спуска у детей и подростков

Проведенный анализ угловой скорости сгибания тазобедренного сустава перед началом движения обнаружил, что из всех обследованных групп больные дети наиболее неуверенно подготавливались к *подъему* (рис. 1, 2). Однако при подготовке к *спуску* дополнительные пики на кривой скорости у больных детей наблюдались даже реже, чем у здоровых ровесников (рис. 2, А). Тот факт, что перед подъемом колебания скорости наблюдались у больных детей чаще, чем у здоровых, а при подготовке к спуску — реже, можно объяснить разным пониманием цели движения здоровыми и больными детьми. В рамках настоящей работы было невозможно оценить степень концентрации внимания больных на задании и соответствия их внутренних целей предлагаемой нами в эксперименте. Тем не менее, как указывалось в методике, здоровые дети полностью понимали и выполняли задачу, тогда как целью движения больных, скорее всего, было приближение к их родителю или методисту. Если задачу подъема они должны были решить в любом случае (как промежуточную), то спускались они значительно более разнообразно по сравнению со здоровыми детьми. В кинематике это проявлялось в выборе неоптимальных межсуставных углов (рис. 4), и, как следствие, в менее плавном опускании ноги со ступеньки, вплоть до удара ногой о твердую поверхность пола, отмечавшееся на некоторых видеозаписях.

Как и у здоровых детей, у подростков обеих групп колебания скорости, проявлялись сильнее при подготовке к спуску, чем при подготов-

ке к подъему (рис. 2). При этом у больных подростков дополнительные пики скорости перед *подъемом* и *спуском* возникали чаще, чем у здоровых подростков. Это говорит о том, что подростки с РДА, как и здоровые испытуемые вероятно, понимали экспериментальную задачу правильно, но испытывали большую неуверенность при подготовке и к подъему, и к спуску, по сравнению со здоровыми сверстниками. В целом, у больных подростков доля проб с дополнительными пиками скорости при спуске оказалась наибольшей среди всех групп испытуемых.

Известно, что мозжечок выполняет важную роль во временной и пространственной организации мышечной активности, а также в интеграции сигналов, полученных от ниже- и вышележащих отделов ЦНС, влияет на выполнение моторной программы и участвует в сравнении предполагаемых ею движений с теми, которые на данный момент выполняются [Nayate et al., 2005]. На сегодня получены убедительные свидетельства об анатомических изменениях мозжечка при РДА [Courchesne, 1997; Nayate et al., 2005] и можно полагать, что нарушение развития мозжечка у больных РДА привело к выявленным различиям между здоровыми и больными при подготовке к движению подъема и спуска в нашем исследовании.

Кинематика движения подъема и спуска у детей и подростков

Выявленное в нашем исследовании уменьшенное отведение *тазобедренного сустава* при подъеме на ступеньку (рис. 5) интересно сравнить с полученными нами ранее данными о фронтальных колебаниях при стоянии больных с сенсомоторными нарушениями [Талис и др., 2011]. Нами было обнаружено, что если колебания корпуса у больных были больше, чем у здоровых особенно в усложненных условиях (закрытые глаза и стойка на поролоне), то после коррекционного воздействия здоровые испытуемые в стойке с закрытыми глазами уменьшили колебания корпуса, а колебания корпуса больных увеличилось во фронтальном направлении. Был сделан вывод о том, что после коррекционного воздействия тонус мышц ног больных снижался, вызывая большую подвижность ног в коленях (вперед — назад), голеностопе и тазобедренном суставе, что приводило к усилению фронтальных колебаний. Таким обра-

зом, гипертонус мышц ног возможно был причиной недоотведения тазобедренного сустава при подъеме на ступеньку у больных в настоящем исследовании. Дополнительным подтверждением этому служит работа Graham с коллегами, в которой изменения тонуса дистальной мускулатуры рассматривают как одну из основных причин значительного ухудшения равновесия у детей с РДА при стоянии на одной ноге в сравнении со здоровыми [Graham et al., 2014]. Действительно, при подъеме на ступеньку необходимо поддерживать динамическое равновесие тела на одной ноге, поэтому наблюдаемое уменьшение амплитуды тазобедренного угла во фронтальной плоскости при подъеме на ступеньку в нашей работе и большая неустойчивость при стоянии на одной ноге у больных детей в работе Graham могут иметь одну и ту же природу. Недоразгибание голеностопного сустава при спуске у больных подростков в нашем исследовании также является свидетельством гипертонуса дистальных отделов нижних конечностей, прогрессирующей с возрастом. При спуске со ступеньки это привело к тому, что голеностопный сустав продолжал оставаться в положении тыльного сгибания при полном разгибании колена, в отличие от положения полной разогнутости ноги во время встречи с опорой у здоровых. Это приводило к тому, что опускание ноги на опору у больных подростков происходило более резко и заканчивалось при меньшем разгибании голеностопного сустава. Заметим, что у детей с РДА существенного уменьшения голеностопного угла при спуске обнаружено не было.

По данным Nayate и соавторов, базальные ганглии могут быть задействованы в коррекции позы во фронтальной плоскости при инициации движения и для поддержания динамического равновесия при локомоции [Nayate et al., 2005]. Можно предполагать, что нарушение тонуса дистальной мускулатуры, также как нарушение переработки сенсорной информации при РДА могут быть также связаны с повреждениями или неправильным функционированием базальных ганглиев при данном заболевании [Damasio et al., 1978].

Возрастные особенности координации движений у больных с РДА

Мы проводили сравнительный анализ кинематики движений больных и здоровых в пределах двух возрастных групп: 5–8 лет (де-

ти) и 11–14 лет (подростки). Действительно, в период ускоренного роста в подростковом возрасте (от 11 до 14 лет) наблюдаются значительные нарушения координации, связанные, в том числе, с некорректным внутренним представлением здоровых детей о собственном теле. Например, возникает несоответствие представления о длинах конечностей с реальным изменением их длины с возрастом [Penn, 2006]. Таким образом, разделение испытуемых на две возрастные подгруппы целесообразно, оно позволяет получить более объективную информацию об отличиях в кинематике движения, чем при сравнении усредненных данных по испытуемым разного возраста.

Проведенное нами исследование также выявило существенные отличия в координации движений не только между больными и здоровыми подростками, но и между больными подростками и больными детьми. Наиболее высокая среди всех групп испытуемых доля проб с дополнительными пиками скорости при спуске, сопровождающаяся недостаточным разгибанием голеностопного сустава у больных подростков, может означать наличие у подростков с диагнозом РДА устоявшейся неоптимальной стратегии выполнения спуска со ступеньки. Действительно, даже при врожденных повреждениях мозжечка, ребенок с диагнозом РДА может обучиться примитивным двигательным задачам за счет компенсаторных механизмов, сформированных в процессе развития для адаптации его двигательной системы к изменениям внешней среды. Однако стратегия выполнения движения, его временные и пространственные параметры будут отличаться от таковых у здоровых, что можно увидеть в проведенном анализе кинематики движений. Кроме того, эти особенности будут проявляться тем ярче, чем сложнее движение. Однако, если в последних экспериментах по изучению особенностей нарушения сенсорной интеграции у больных с РДА прослеживается тенденция к использованию слишком сложных, в какой-то степени экзотических двигательных задач (управление манипулятором робота, джойстиком и т.п.), требующих от испытуемого высокого уровня развития интеллекта [Mostofsky et al., 2004; Larson, Mostofsky, 2008], в нашем исследовании относительная сложность и “целенаправленность” движения подъема и спуска со ступеньки по сравнению с обычной ходьбой также позволила выявить различия координации у больных и здоровых испытуе-

мых. Будучи несложным для выполнения в лабораторном эксперименте, подъем и спуск со ступеньки не предъявляет специальных требований к выборке пациентов. Это движение – естественное и, как правило, доступно даже для больных с РДА с низким уровнем развития интеллекта. Следует, однако, отметить, что 52% от общего числа приглашенных в эксперимент больных в нашем исследовании не справились с заданием (см. Методика), а среди тех, кто справился, как указано выше, некоторые могли неверно понимать цель движения, что, возможно, повлияло на исход опыта.

ВЫВОДЫ

- В настоящей работе впервые была проанализирована кинематика движения подъема на ступеньку и спуска с нее у больных с РДА в сравнении со здоровыми ровесниками. Выбор данной двигательной задачи оказался оправданным: выявлены существенные отличия во временной и пространственной организации движения у больных РДА и здоровых испытуемых.

- При анализе кинематики движений учитывался возраст испытуемых. Показано прогрессирующее ухудшение координации движений у больных с РДА с возрастом, что говорит о важности ранней реабилитации при РДА.

- Возникновение дополнительных колебаний скорости сгибания тазобедренного сустава при подготовке к подъему на ступеньку и спуска с нее, а также выбор неоптимальной стратегии выполнения движения испытуемыми с РДА подтверждают гипотезу о нарушении интеграции сенсорных сигналов из внешней среды в ЦНС у больных с РДА.

- Исследование двигательного контроля при РДА задает не только дополнительное направление поиска анатомических повреждений при аутизме, но и расширяет представление о возрастных изменениях координации движения в норме. Анализ патологических изменений двигательной координации при аутизме дает нам дополнительные сведения о нейронных механизмах функционирования системы внутреннего представления у здорового человека.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант Российского фонда фундаментальных исследований № 14-04-00950).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бернштейн Н.А.* О построении движений. Медгиз, 1947. 255 с.
- Гурфинкель В.С., Левик Ю.С., Лебедев М.А.* Концепция схемы тела и моторный контроль. Схема тела в управлении позными автоматизмами Интеллектуальные процессы и их моделирование. Организация движений Ред. Чернавский А.В. М.: Наука, 1991: 24–53.
- Гурфинкель В.С., Левик Ю.С.* Система внутреннего представления и управление движениями. Вестник РАН. 1995. 65(1): 29–37.
- Луцкина Е.А., Стрелец В.Б.* Расстройства аутистического спектра. Обзор современных экспериментальных исследований. Журн. высш. нерв. деят. 2014. 64(6): 585–599.
- Максимова Е.В.* Уровни общения. Причины возникновения раннего детского аутизма и его коррекция на основе теории Н.А. Бернштейна. М.: Диалог-МИФИ, 2012. 288 с.
- Талис В.Л., Капитонов М.А., Максимова Е.В.* Мышечные пост-эффекты и поддержание равновесия у здоровых и больных с нарушениями сенсорной интеграции. Журн. высш. нерв. деят. 2011. 61(4): 413–422.
- American Psychiatric Association. (2013). Diagnostic and statistical manual for mental disorders (5th ed.). Washington, DC: American Psychiatric Association.
- Baron Cohen S.* Autism: The Empathizing–Systemizing (E–S) Theory. Ann NY Acad Sci. 2009. 1156: 68–80.
- Courchesne E.* Brainstem, cerebellar and limbic neuroanatomical abnormalities in autism. Curr. Opin. Neurobiol. 1997. 7: 269–278.
- Damasio A.R., Maurer R.G.* A neurological model for childhood autism. Arch Neurol. 1978, 35(12): 777–786.
- Downey R., Rapport M.J.* Motor activity in children with autism: a review of current literature. Pediatr. Phys. Ther. 2012. 24(1): 2–20.
- Graham S., Abbott A.E., Nair A., Lincoln A.J., Müller R.A., Goble D.J.* The influence of task difficulty and participant age on balance control in ASD. J. Autism. Dev. Disord. 2014. 45 (5): 1419–27.
- Haswell C., Izawa J., Dowell L., Mostofsky S., Shadmehr R.* Representation of internal models of action in the autistic brain. Nat Neurosci. 2009. 12: 970–972.
- Heller M., Bergmann G., Deuretzbacher G., Dürselen L., Pohl M., Claes L., Haas N.P., Duda G.N.* Musculoskeletal loading conditions at the hip during walking and stair climbing. J. Biomech. 2001. 34: 883–893.
- Kohen-Raz R., Volkmar F.R., Cohen D.J.* Postural control in children with autism. J. Autism. Dev. Disord. 1992. 22(3): 419–432.
- Larson J.C., Mostofsky S.H.* Evidence that the pattern of visuomotor sequence learning is altered in children with autism. Autism Res. 2008. 1: 341–353.

- Minshew N.J., Sung K.B., Jones B.J., Furman J.M.* Underdevelopment of the postural control system in autism. *Neurology*. 2004, 63: 2056–2061.
- Molloy C., Dietrich K., Bhattacharya A.* Postural Stability in Children with Autism Spectrum Disorder. *J. Autism Dev Disord*. 2003, 33: 643–652.
- Mostofsky S.H., Bunoski R., Morton S.M., Goldberg M.C., Bastian A.J.* Children with autism adapt normally during a catching task requiring the cerebellum. *Neurocase*. 2004. 10: 60–64.
- Nayate A., Bradshaw J.L., Rinehart N.J.* Autism and Asperger's disorder: Are they movement disorders involving the cerebellum and/or basal ganglia? *Brain Res Bull*. 2005. 67: 327–334.
- Penn H.E.* Neurobiological correlates of autism: a review of recent research. *Child Neuropsychol*. 2006. 12 (1): 57–79.
- Protopapadaki A., Drechsler W., Cramp M., Coutts F., Scott O.* Hip, knee, ankle kinematics and kinetics during stair ascent and descent in healthy young individuals. *Clin Biomech*. 2007. 22: 203–210.
- Schmitz C., Martineau J., Barthélemy C., Assaiante C.* Motor control and children with autism: deficit of anticipatory function? *Neurosci Lett*. 2003. 348: 17–20.
- Vernazza-Martin S., Martin N., Vernazza A., Lepellec-Muller A., Rufo M., Massion J., Assaiante C.* Goal directed locomotion and balance control in autistic children. *J. Autism. Dev. Disord*. 2005. 35: 91–102.
- Winter D.A., Patla A.E., Prince F., Ishac M., Gielo-Perczak K.* Stiffness control of balance in quiet standing. *J. Neurophysiol*. 1998 80(3): 1211–21.