

## БИОМЕХАНИКА ПОДДЕРЖАНИЯ ВЕРТИКАЛЬНОЙ ПОЗЫ (ОБЗОР МОДЕЛЕЙ ПОДДЕРЖАНИЯ РАВНОВЕСИЯ)

*К.Е. Рябина, А.П. Исаяев*

*Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск*

Цель – рассмотреть в научной литературе модели поддержания равновесия. Выявлены особенности изучения сагиттальной и фронтальной устойчивости на практике. Поддержание равновесия изучалось на компьютерном комплексе для диагностики нарушений постуральной и опорно-двигательной системы «МБН – Стабило», включающем в себя специализированный стабилومتر, предназначенный для регистрации проекции центра давления тела на плоскость платформы и его девиации во времени и в системе координат с учётом положения стоп обследуемого относительно абсолютноного положения. Зарегистрированы изменения вертикальной позы возможно при помощи системы высокоскоростной видеосъемки серии Ultra Motion Pro. К первым полученным результатам относятся цифровые значения перемещения активных точек, изменение углов тазобедренного и голеностопного суставов. Полученные данные свидетельствуют о том, что поддержание равновесия в сагиттальной плоскости занимает больше усилий, чем во фронтальной.

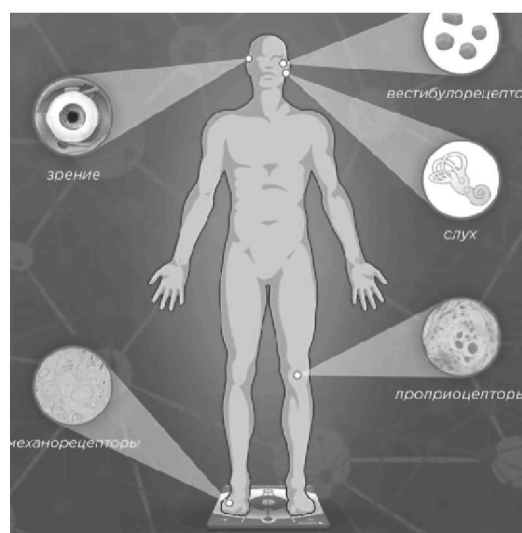
Дальнейшим этапом в проведении исследования является получение новых данных по вопросу вертикальной устойчивости тела, сопоставление данных стабилотрии с временными и линейными характеристиками Ultra Motion, необходимыми для разработки биомеханической методики контроля.

*Ключевые слова:* модель поддержания равновесия, мышечная система, стабилотметрия, высокоскоростная камера.

Изучение регуляции позы представляет собой важную и актуальную научную задачу. Одновременно с этим изучение регуляции позы характеризуется сложным техническим и физиологическим процессом исследования. Поддержание вертикальной позы носит непрерывный динамический характер постоянного взаимоперемещения звеньев тела и перемещения общего центра давления. Это сопровождается изменением уровня тонической активности постуральных мышц [1]. В регуляции принимают участие разные уровни центральной нервной системы, использующие информацию от вестибулярных, мышечных, суставных и зрительных рецепторов (рис. 1). Отсюда следует, что изменение состояния некоторых органов и систем найдут отражение в изменении характеристик процесса поддержания вертикальной позы. Исследование позы не ограничивается изучением поддержания тела в вертикальном положении. Оно также включает в себя изучение поддержания равновесия при внешних возмущениях (например, сохранение устойчивости в условиях падения) [2].

В данной работе рассмотрим вертикальную позу, которая характеризуется сложно-

стью решения задач, так как содержит в своем понимании многозвенность и многоуровневость систем: высокое расположение центра давления над опорой, малой площади опорного круга, необходимости сохранения равновесия тела при действии внутренних (организменных) и внешних возмущений [3].



**Рис. 1. Использование информации для поддержания равновесия**

## Краткие сообщения

Поддержание позы связано с наличием определенной системы отсчета, которая используется для оценки взаимоположения звеньев тела и поддержания его ориентации относительно экстраперсонального пространства [1]. Механизмы поддержания вертикальной позы занимают промежуточное место между двигательными локомоциями (ходьба, бег) и произвольными движениями (например, тактика броска мяча в баскетболе в конкретной ситуации), и знание принципов вертикальной позы можно рассматривать в качестве предпосылок изучения закономерностей формирования двигательных навыков, структуры произвольных движений и принципов управления ими [4].

Изучая поддержание равновесия тела в вертикальной позе на стабилметрической платформе, данные регистрируются в двух плоскостях: фронтальной (влево – вправо) и сагиттальной (вперед – назад). Устойчивость тела в этих направлениях зависит от состояния нервно-мышечного аппарата мышц, которые активны в этих направлениях, а также сенсорной, зрительной, проприорецептивных систем [2]. Многие авторы [5–7] считают, что управление вертикальной позой наиболее сложное в сагиттальной плоскости, так как имеет наибольшую амплитуду колебаний центра давления.

В сагиттальной плоскости описывают несколько моделей поддержания равновесия тела, но в большинстве работ описание заканчивается моделированием тела в виде однозвенного перевернутого маятника (рис. 2, 3). Такая модель крайне неустойчива [8]. Устойчивость в вертикали достигается за счет работы мышц, возвращающих его в состояние равновесия. Данная модель берется для описания позных колебаний. При минимальных колебаниях считается, что человек использует «голеностопную» стратегию за счет изменения угла в голеностопном суставе, а при больших и частных колебаниях – «тазобедренную», в которой устойчивость достигается за счет тазобедренных суставов. В норме у здоровых людей «голеностопная» стратегия.

Привлекательность модели перевернутого маятника состоит в возможности непосредственного измерения контролируемой переменной (угла в голеностопном суставе, который связан с положением центра тяжести) и

«управляющей» переменной (момента сил в голеностопном суставе, который однозначно связан с положением центра давлений).

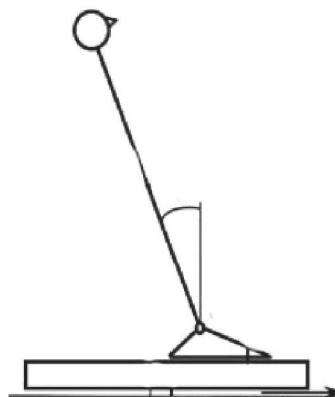


Рис. 2. Биомеханическая модель однозвенного перевернутого маятника

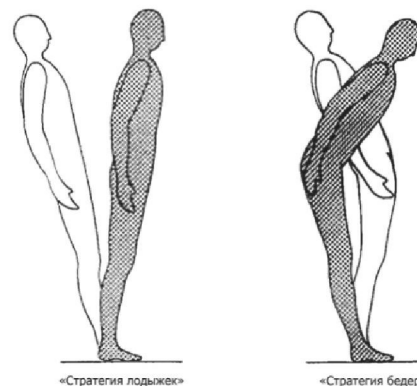


Рис. 3. Вариации модели перевернутого маятника

Узость модели перевернутого маятника поставила исследователей перед необходимостью использовать более сложную модель, учитывающую подвижность в трех суставах: голеностопном, коленном и тазобедренном (рис. 4) [6].

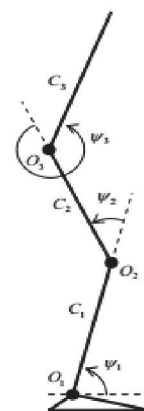


Рис. 4. Трехзвенная система описания тела человека при стоянии

Отмечено, что в трехзвенных моделях нервно-мышечные усилия заменяют моментами силы, действующими на суставы. В описании поддержания равновесия данной модели стоит учесть жесткость мышц, антропометрические особенности строения скелетно-мышечного аппарата, так как в нижних конечностях человека имеется значительное число двусуставных мышц, принимающих активное участие в решении различных двигательных задач [5].

С использованием дополнительного оборудования (высокоскоростной камеры с возможностью съемки до 1200 кадров/с) имеется возможность описывать и изучать однозвенную и трехзвенную модель поддержания вертикальной позы, сравнивать полученные данные в двух позах, сопоставлять их с данными стабилметрической платформы, выясняя механизмы поддержания равновесия.

Тело человека во фронтальной плоскости имеет более сложную структуру, чем в сагиттальной [2, 3, 8]. С точки зрения биомеханики в сагиттальной плоскости вертикальная поза представляет собой разомкнутую кинематическую цепь, а во фронтальной плоскости – комбинацию разомкнутой (верхняя часть тела) и замкнутой (нижняя часть тела) цепей.

До сих пор идут споры о том, какая стратегия используется, и как осуществляется процесс поддержания вертикальной позы во фронтальной плоскости, возможно ли применение таких же принципов регуляции вертикальной позы, как и в сагиттальной плоскости. На данный момент известно, что с увеличением опорного контура и расстояния между стопами стабильность тела во фронтальной плоскости увеличивается [2–4]. Одновременно с увеличением данных характеристик повышается требования к системе управления вертикальной позы во фронтальной плоскости.

Существует несколько типов определения поддержания вертикального равновесия во фронтальной плоскости (рис. 5).

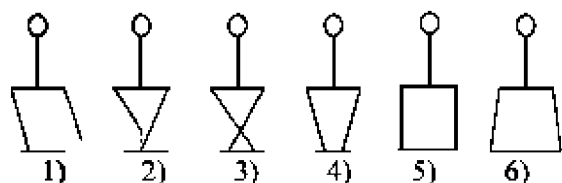


Рис. 5. Конфигурация опорного контура во фронтальной устойчивости

Изучается устойчивость шести поз:

- 1) стояние на одной ноге;
- 2) поза Ромберга;
- 3) поза ноги «накрест», расстояние между стопами 10 см;
- 4) нормальное стояние, расстояние между стопами 10 см;
- 5) поза «ноги на ширине плеч», расстояние между стопами 20 см;
- 6) ноги широко расставлены, расстояние между стопами 40 см.

В сенсibilизированной позе Ромберга рассматривается два варианта стояния: а) правая нога впереди и б) левая нога впереди [2].

Одна из проблем проведения данного изучения позы – это желательность прикрепления поверхностных электродов для регистрации электромиограммы мышц, активность которых интересна и актуальна при поддержании равновесия во фронтальной плоскости [1].

Поддержание вертикальной позы человеком может быть зарегистрировано с помощью специальных биомедицинских электронных систем. Одним из наиболее широко используемых методов является стабилография – исследование баланса вертикальной стойки и ряда переходных процессов посредством регистрации положения, отклонений и других характеристик проекции общего центра массы тела на плоскость опоры. Это метод исследования функции равновесия, проприоцепции, зрительного анализатора, вестибулярного аппарата и других функций организма, прямо или косвенно связанных с поддержанием равновесия [7].

Также регистрировать изменения вертикальной позы возможно при помощи системы высокоскоростной видеосъемки серии Ultra Motion Pro. Технология биомеханической видеосъемки и математического моделирования двигательной активности человека позволяет с высокой точностью определять движения звеньев тела в данный момент.

В совокупности метод стабилметрии и высокоскоростная видеосъемка дают точный и наглядный результат в стратегии поддержания равновесия в сагиттальной плоскости.

В качестве первого шага экспериментального изучения механизмов управления мышечной активностью, направленной на поддержание вертикальной позы в сагиттальной плоскости у спортсменов было проведено исследование, входными параметрами которого

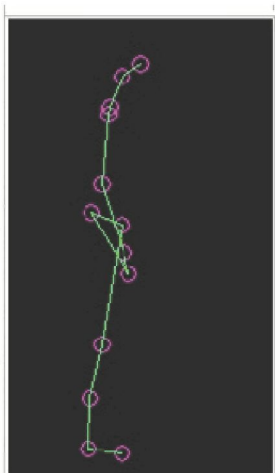


Рис. 6. Положение светоотражающих датчиков на теле спортсмена

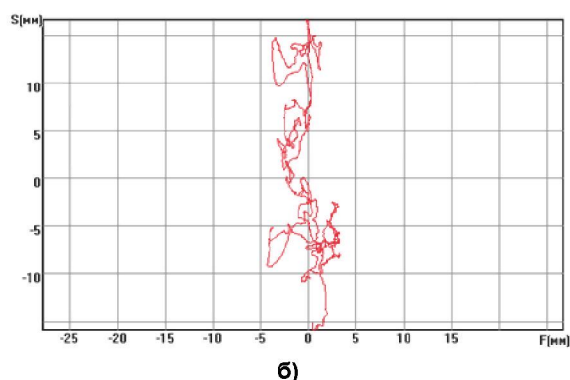
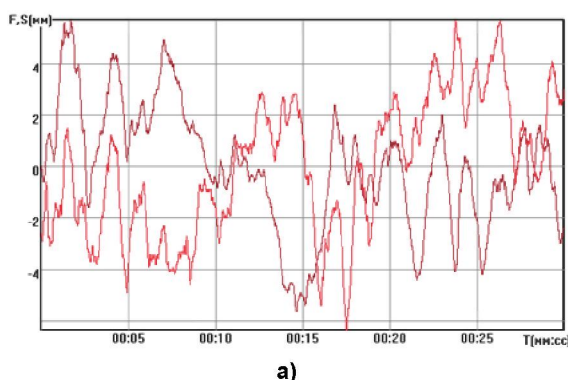


Рис. 7. Данные стабилометрии: а – стабилограмма; б – статокинезиограмма

стало: изменение суставных углов, перемещение общего центра масс тела, отдельных звеньев тела и т. д. (данные фиксировались при помощи метода стабилометрии и высокоскоростной камеры).

Изучались микроколебательные движения тела во время поддержания равновесия в сагиттальной плоскости (на основе однозвенового и трехзвенового маятника) на стабилоплатформе. Использовали четыре стойки, каждая стойка – 30 с (основная стойка (ОС) – глаза открыты (ГО); ОС – глаза закрыты (ГЗ); поворот головы влево – ГЗ, поворот головы вправо – ГЗ). На тело спортсменов ( $n = 6$ ) было прикреплено 13 светоотражающих датчиков (рис. 6). Каждые 6 с данные записывались на высокоскоростную камеру. Можно утверждать, что поддержание равновесия тела сводится к тому, чтобы обеспечить удержание проекции общего центра масс на опорную поверхность в пределах определенной области опорного контура. Преобладание

поддержания равновесия в сагиттальном направлении более, чем во фронтальном (по данным стабилограмм и статокинезиограмм) (рис. 7).

Дальнейшим этапом исследования является получение новых данных по вопросу вертикальной устойчивости тела спортсменов. При обработке одного и того же временного интервала данные, полученные с высокоскоростной видеокамеры и стабилометрии, помогут выявить модель поддержания равновесия лыжника-гонщика, а также установить уровень вестибулярной устойчивости. В перспективе планируется создание математической модели колебаний тела.

### Литература

1. Солопова, И.А. Структурно-функциональные особенности системы поддержания вертикальной позы человека: дис. ... канд. биол. наук / И.А. Солопова. – М., 2002. – 116 с.
2. Денискина, Н.В. Фронтальная устойчивость вертикальной позы человека: автореф. дис. ... канд. биол. наук / Н.В. Денискина. – М., 2009. – 28 с.
3. Гурфинкель, В.С. Регуляция позы человека / В.С. Гурфинкель, Я.М. Коц, М.Л. Шик. – М.: Наука, 1965. – 256 с.
4. Липищ, М.И. Локальные и нелокальные рефлекторные механизмы регуляции вертикальной позы человека: дис. ... канд. биол. наук / М.И. Липищ. – М., 1984. – 162 с.
5. Биленко, А.Г. Биомеханика вертикальной устойчивости и оценка ее в спорте: дис. ... канд. пед. наук / А.Г. Биленко. – СПб., 2008. – 212 с.
6. Терехов, А.В. Математическое моделирование регуляции позы человека: автореф.

дис. ... физ.-мат. наук / А.В. Терехов. – М., 2007. – 24 с.

7. Трехзвенная математическая модель для задачи стабилизации вертикальной позы человека / И.В. Новожилов, А.В. Терехов, А.В. Забелин и др. // Математическое моделирование движений человека в норме и при неко-

торых видах патологии. – М.: Изд-во механико-математ. факультета МГУ, 2005. – С. 7–20.

8. Болобан, В.Н. Контроль устойчивости равновесия тела спортсмена методом стабиллографии / В.Н. Болобан. – <http://lib.sportedu.ru/Books/XXPI/2003N2/p24-33.htm> (дата обращения: 26.01.2003).

**Рябина Кристина Евгеньевна**, аспирант кафедры теории и методики физической культуры и спорта, Южно-Уральский государственный университет (г. Челябинск), ryabina.1991@mail.ru.

**Исаев Александр Петрович**, доктор биологических наук, профессор, директор Научно-исследовательского центра спортивной науки, Южно-Уральский государственный университет (г. Челябинск), tmfcs@mai.ru.

Поступила в редакцию 7 сентября 2015 г.

DOI: 10.14529/ozfk150417

## BIOMECHANICS OF ERECT POSTURE MAINTAINING (REVIEW OF EQUILIBRIUM CONTROL MODELS)

K.E. Ryabina, ryabina.1991@mail.ru,

A.P. Isaev, tmfcs@mai.ru

South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation

Aim: to review the equilibrium control models described in the literature. To reveal the features of study of sagittal and frontal stability in practice. Equilibrium control is studied with the help of computer complex “MBN – Stabilo” designed for detection of abnormalities of postural and locomotive systems. The complex includes a specialized stabilometer developed for recording the projection of the body pressure center on the platform and its deviation over time and within the coordinate system considering the feet positioning of the examined subject relative to the absolute position. Changes of the erect posture are recorded by means of high-speed video shooting system Ultra Motion Pro. The first obtained results include the digital values of movement of the active points and changes of hip joint and ankle joint angles. The authors have also found that the equilibrium control in sagittal plain requires more efforts than in frontal one.

The next stage of the research implies that the new data will be obtained on the vertical stability of the body, and the stabilometric data will be compared with temporal and linear characteristics of Ultra Motion necessary for development of the biomechanical method of control.

*Keywords: equilibrium control model, muscular system, stabilometry, high-speed video camera.*

### References

1. Solopova I.A. *Strukturno-funktsional'nye osobennosti sistemy podderzhaniya vertikal'noy pozy cheloveka*. Kand. diss. [Structural and Functional Features of the System to Maintain Upright Posture of Man. Cand. sci. diss.]. Moscow, 2002. 116 p.
2. Deniskina N.V. *Frontal'naya ustoychivost' vertikal'noy pozy cheloveka*. Avtoref. kand. diss. [Front Sustainability Human Vertical Posture. Abstract of cand. diss.]. Moscow, 2009. 28 p.
3. Gurfinkel' V.S., Kots Ya.M., Shik M.L. *Regulyatsiya pozy cheloveka* [Regulation of Human Posture]. Moscow, Science Publ., 1965. 256 p.

4. Lipshits M.I. *Lokal'nye i nelokal'nye reflektornye mekhanizmy regulyatsii vertikal'noy pozy cheloveka. Abstract kand. diss.* [Local and Non-Local Reflex Mechanisms Regulating Human Vertical Posture. Abstract of cand. diss.]. Moscow, 1984. 162 p.
5. Bilenko A.G. *Biomekhanika vertikal'noy ustoychivosti i otsenka ee v sporte. Avtoref. kand. diss.* [Biomechanics of Vertical Stability and Measurement in Sports. Abstract of cand. diss.]. St. Petersburg, 2008. 212 p.
6. Terekhov A.V. *Matematicheskoe modelirovanie regulyatsii pozy cheloveka. Avtoref. kand. diss.* [Mathematical Modeling of the Human Posture Regulation. Abstract of cand. diss.]. Moscow, 2007. 24 p.
7. Novozhilov I.V., Terekhov A.V., Zabelin A.V., Levik Yu.S. [The Three-Tiered Mathematical Model for the Problem of Stabilizing Human Vertical Posture]. *Matematicheskoe modelirovanie dvi-zheniy cheloveka v norme i pri nekotorykh vidakh patologii* [Mathematical Modeling of Human Motion in Normal and Some Types of Disease], 2005, pp. 7–20. (in Russ.)
8. Boloban V.N. *Kontrol' ustoychivosti ravnovesiya tela sportsmena metodom stabilografii* [Stability Control Body Balance Athlete by Stabilography]. Available at: <http://lib.sportedu.ru/Books/XXPI/2003N2/p24-33.htm> (accessed 26.01.2003).

*Received 7 September 2015*

---

### ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Рябина, К.Е. Биомеханика поддержания вертикальной позы (обзор моделей поддержания равновесия) / К.Е. Рябина, А.П. Исаев // Вестник ЮУрГУ. Серия «Образование, здравоохранение, физическая культура». – 2015. – Т. 15, № 4. – С. 93–98. DOI: 10.14529/ozfk150417

### FOR CITATION

Ryabina K.E., Isaev A.P. Biomechanics of Erect Posture Maintaining (Review of Equilibrium Control Models). *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Education, Healthcare Service, Physical Education*, 2015, vol. 15, no. 4, pp. 93–98. (in Russ.) DOI: 10.14529/ozfk150417