

МЕТОДЫ КОМПЬЮТЕРНОЙ СТАБИЛОГРАФИИ В ИССЛЕДОВАНИИ АВТОМАТИЗМОВ УПРАВЛЕНИЯ ПОЗНОЙ СТАТИКОЙ

Е.Н. Винарская¹, В.Н. Суслов², Г.И. Фирсов²

¹Московский городской педагогический университет.

²Институт машиноведения им. А.А.Благонравова РАН, г. Москва, Россия

Рассматриваются методы исследования позных автоматизмов, составляющих бессознательный фон произвольных и осознанных кортикальных программ двигательного поведения человека. Показана эффективность применения компьютерной стабиллографии для исследования зон устойчивости вертикальной позы человека.

Все функциональные подсистемы биологических организмов (сердечно-сосудистая, дыхательная, сенсорно-моторные и пр.), тем более высших животных и человека, имеют иерархическое строение. Так же иерархически организован и аппарат управления ими. В зависимости от мотивов, целей и условий выполнения деятельности управление этими функциональными подсистемами осуществляется или по древним в филоонтогенетическом плане энергетически “дешевым” автоматизмам или по более или менее энергетически емким и приспособительно изменчивым программам.

Сказанное относится и к управлению статикой позы. Поддержание вертикальной позы в поле земного тяготения является одной из древнейших способностей организмов, а потому ее управление имеет отношение к таким уровням нервной системы как спинной мозг, ствол мозга и подкорковые узлы. Позные автоматизмы этих нервных образований составляют бессознательный фон произвольных и осознанных кортикальных программ двигательного поведения человека.

Позные автоматизмы имеют большое значение, в частности, в спортивных движениях; использование их делает спортивные движения энергетически экономными, особенно выразительными и грациозными. Поэтому в методическом отношении очень важны объективные критерии владения спортсменом автоматизмами позной статики. Для разработки таких критериев можно воспользоваться методикой компьютерной стабиллографии.

Как известно, в этой методике колебания центра тяжести тела записываются с помощью стабиллографа, представляющего собой опирающуюся на упругие элементы жесткую платформу, на которой стоит испытуемый. Деформации упругих элементов под влиянием давления воспри-

нимаются преобразователями, обычно тензорезистивного типа. Преобразователи, определенным образом включенные в измерительную электрическую схему, фиксируют перераспределение усилий в опорах вследствие перемещений центра тяжести в плоскости платформы. Сигналы с измерительной электрической схемы подаются на персональную ЭВМ с помощью специально разработанной системы сбора и обработки стабиллографической информации.

Фактически с помощью стабиллографа измеряются динамические равнодействующие опорные реакции, а не координаты проекции общего центра тяжести тела. Впервые к данному выводу путем рассмотрения детальной схематизации процесса стабиллографии пришел Е.В.Гурфинкель [1]. Однако, учитывая качественно одинаковый характер изменения координат равнодействующих опорных реакций и координат проекции общего центра тяжести тела, сохраняем терминологию работы [2], в которой подробно рассмотрена конструкция и методика стабиллографии.

Основной формой исследования позной статики в норме и патологии является пассивный эксперимент. В наших экспериментах испытуемый находился в основной стойке на платформе стабиллографа. Ему предлагалось выполнить 2 функциональные пробы, длительность каждой пробы 3 минуты.

Содержание функциональных проб:

- 1) вытянуть руки вперед;
- 2) стоять в сенсibilизированной позе Ромберга.

Поскольку стабиллограмму можно рассматривать как двумерный временной процесс, то было целесообразно использовать математический аппарат анализа временных последовательностей, позволяющий оценить природу, характер, уровень и частотный состав колебаний проек-

ций центра тяжести тела во взаимно перпендикулярных плоскостях – сагиттальной (вперед–назад) и фронтальной (вправо–влево) [3].

В спортивной биомеханике принято различать 3 зоны устойчивости:

- 1) зону восстановления положения тела;
- 2) зону сохранения положения тела;
- 3) зону оптимальной устойчивости тела [4].

Можно предположить, что первая из них – зона восстановления положения тела – психо-физиологически имеет отношение к врожденному оборонительному рефлексу, активность которого обуславливается вестибулярной стимуляцией. Как только вектор тяжести тела выходит за пределы площади опоры в силу перемещений его центра при напряжениях и движениях отдельных частей тела и тело начинает падать, возникает возбуждение вестибулярных механорецепторов и тотчас же следует восстанавливающая равновесие оборонительная реакция [5]. Ответственность за эту реакцию фазического типа несут средне-стволовые нервные структуры: вестибулярные ядра, кора червя мозжечка, его эфферентное ядро *n. fastigii*, ядро Дейтерса сетчатой формации, *tractus reticulo-spinalis*.

Выделяемая в биомеханике зона сохранения положения тела, надо полагать, управляется преимущественно ниже-стволовыми структурами мозга, расположенными в ретикулярной формации и функционально связанными с системой блуждающего нерва и корой червя мозжечка. Они тоже функционируют в составе врожденного оборонительного рефлекса, однако афферентируются уже другими видами механорецепции, скорее всего свободными окончаниями опорно-двигательного аппарата, реагирующими на изменения положения тела в поле земного тяготения, и интерорецепторами, возбуждаемыми изменениями гидростатического давления в связи с отклонениями вектора центра тяжести тела от гравитационной вертикали. Возбуждение всех этих рецепторов, ветвления которых значительно перекрывают друг друга, имеет постепенно нарастающий градуальный характер; соответственно и оборонительная реакция тоже носит градуальный тонический характер. Реактивные физико-химические параметры внутренней среды организма (проницаемость клеточных мембран, упругость белковых коллоидов тканей внутренних органов и мышц и т.п. эффекты) обеспечивают организму необходимую приспособляемость к жизнедеятельности, связанной с изменениями положения тела в поле земного тяготения. В частности тонус мышц, иннервируемых прежде всего посредством блуждающего нерва

и способствующих сохранению стабильной внутренней среды организма, растет параллельно с ростом возбуждения его ствольных управляющих структур.

Эти оборонительные гравитационные реакции усложняются на протяжении филогенеза за счет того, что возбуждение мышечно-суставных механорецепторов, сигнализирующих о величинах растяжений мышц и напряжений их по силе, начинает стимулироваться не только в связи с изменениями положения головы и тела или в связи с гидростатически обусловленными физико-химическими изменениями мышечной ткани, но и более непосредственно под влиянием отдельных статических и динамических движений в поле земного тяготения. Такая кинестетическая информация, обеспечивая более сложные формы адаптивного поведения организмов во внешней среде, требует более сложной ее переработки мозжечковой корой. При этом попрежнему в регуляции позной статики принимают участие мышечные реакции как тонического, так и фазического типов. В управлении ими ведущее положение получают эффекты верхне-стволового происхождения, субординирующие себе через *tractus rubro-reticularis* эффекты ниже-средне-стволового генеза. При этом механизм тонического повышения/понижения мышечного тонуса усложняется за счет того, что складываются реципрокные отношения между нижними и верхними ствольными нервными структурами. Соответственно этому гравитационные оборонительные рефлексы, связанные с проприоцептивной афферентацией, начинают “опираться” прежде всего на повышение мышечного тонуса в разгибательной, выпрямительной мускулатуре и реципрокно обусловленное его торможение в сгибательной. В фазических реакциях верхне-стволового уровня управления вестибулярная рецепция оказывается тоже субординированной проприоцептивной, что делает возможным реагирование на внезапные гравитационные воздействия среды еще до того, как возникнет вестибулярная сигнализация.

В целом, верхне-стволовые оборонительные, и, следовательно, эмоционально отрицательные, гравитационные реакции как тонического, так и фазического типов и составляют, по нашему мнению, психофизиологический механизм управления устойчивостью позы спортсмена в зонах сохранения положения тела (тонические реакции) и в зоне восстановления положения тела (фазические реакции).

Зона оптимальной устойчивости тела управляется принципиально по-иному, вне связи с обо-

ронительными гравитационными рефлексами и тем самым не стволовыми нервными структурами мозга. Устойчивость в этой зоне обеспечивается еще более высоким и сложно организованным уровнем управления, а именно подкорковым, деятельность которого имеет по преимуществу эмоционально положительную ориентировочно-исследовательскую направленность. Если пользоваться терминологией Н.А.Бернштейна [6], то здесь речь пойдет об уровне штампов и синергий С, ведущей афферентацией которого становится, во-первых, “геометрическая проприорецепторика скоростей и положений” и, во-вторых, неградуальные виды кожной чувствительности (чувство давления, дифференцированного прикосновения или укола, вибрационное чувство и пр.). Соответствующая информация стимулируется в первую очередь наиболее сложно организованными механорецепторами, такими как тельца Гольджи и мышечные веретена. При этом умножаются предмозжечковые ядра и становится еще более значимой мозжечковая переработка кинестетической афферентации, к чему привлекается кора нового мозжечка (его полушарий); результаты этой переработки поступают в красные ядра четверохолмия через *n. dentatus* и *brachia conjunctiva* мозжечка; на двигательную периферию импульсы передаются через крупные клетки красных ядер по рубро-спинальным Монаковским путям.

Полученные стабиллограммы здоровых физически развитых испытуемых, стоящих на стабиллоплатформе в позе свободной стойки, визуально характеризуются низко- и средне амплитудными колебаниями. Колебания фронтальной стабиллограммы в ряде случаев кажутся более “гребенчатыми”, насыщенными высокочастотной “бахромой”, что можно объяснить лишь относительно большим размахом колебаний и соответственно большей дисперсией при достаточно близких спектрах, а не наличием в спектре фронтальной стабиллограммы высокочастотных составляющих со значительной амплитудой. В целом, оценить взаимосвязь тонических и фазических компонентов стабиллограммы испытуемого при стоянии его в свободной стойке не представляется возможным.

В процессе упомянутых выше функциональных проб удается заметно сместить акценты с тонического механизма в сторону фазического и наоборот и тем самым выявить их проявления в стабиллограммах. Покажем это на примере исследования испытуемого Б.

Функциональная проба с отягощением

Испытуемый стоит в вертикальной стойке с вытянутыми вперед руками, что смещает центр тяжести тела вперед. Эта поза быстро вызывает утомление, о чем сигнализирует нарастающее тоническое отклонение корпуса испытуемого кзади. Стабиллограммы несколько отличаются от стабиллограмм свободного стояния того же испытуемого наличием незначительного тренда в сагиттальной плоскости, однако, явных отличий визуальный анализ не обнаруживает. Вместе с тем анализ одномерных гистограмм и основных статистических характеристик демонстрирует, во-первых, значительный, в 2–3 раза, рост дисперсии (с 0,0066 до 0,0216), а также появление резкой асимметрии колебаний в сагиттальной плоскости. Последняя отвечает отмеченному выше тренду в первоначальный период стояния и связана, по-видимому, с адаптацией организма к стоянию со сдвинутым вперед центром тяжести. Изменение взаимного расположения частей тела при вытягивании рук вперед и соответствующий ему сдвиг центра тяжести компенсируется организмом поворотом тела вокруг оси, проходящей через голеностопный сустав, а также сгибанием в суставах корпуса. Поэтому при данной функциональной пробе на долю сгибательно-разгибательного механизма в суставах голеностопа и корпуса приходится основная часть работы по поддержанию равновесия тела.

Функциональная проба со стоянием в сенсibilизированной позе Ромберга.

Ноги испытуемого расположены по прямой линии (правая нога впереди или левая нога впереди, т.е. с дополнительной нагрузкой балансирующего механизма во фронтальной плоскости в связи с резким сокращением ширины площади опоры. Наблюдение за испытуемым показывает, что удержание вертикальной позы в данных условиях представляет значительный труд; испытуемый находится в постоянном движении, особенно в области ног, корпуса и рук, при сильном тоническом напряжении мышц головы, плеч, груди и лица (амимия). При этом фазические балансируемые движения в области стоп (боковые и передне-задние), колен и корпуса происходят практически непрерывно, появляются взмахи рук, которые совпадают с большими отклонениями тела, выводящими центр тяжести на границу рассмотренной выше зоны восстановления равновесия. Более тонкое управление пе-

ремещениями центра тяжести в зоне сохранения равновесия производится за счет фазических балансирующих движений стоп. Эффективность управляющих движений за счет воздействий тонического типа явно возрастает с приближением места приложения мышечного усилия к плоскости опоры, поскольку даже малые угловые смещения в области стоп приводят к значительным смещениям центра тяжести тела. Вместо ожидаемого увеличения размахов колебаний и “уплощения” гистограммы во фронтальной плоскости наблюдалось “вытягивание” гистограммы. Этот более сложный эффект можно объяснить включением механизма регуляции позы фазического типа, позволяющего придавать колебаниям центра тяжести тела значительные ускорения при достаточно больших углах отклонения. При этом суммарный момент, действующий на плоскость опоры и передаваемый чувствительным элементам стабилотографа, оказывается сравнительно небольшим. Зафиксированные наблюдения за испытуемым значительные перемещения его корпуса компенсировались столь резкими ускорениями в противоположном направлении, что на стабилотограмме характер колебаний практически не изменился по сравнению с тем, что было при свободном стоянии (за исключением трендовой составляющей с практически нулевым математическим ожиданием). Подобное управление, характеризующееся резким выходом управляющего воздействия на границу области устойчивости при действии мощного возмущения, хорошо известно в технических приложениях. Характерной его особенностью в данном случае является многомерность управляемого объекта (тела человека) и распределения мест приложения управляющих воздействий (мышечных усилий).

Анализ графиков спектральных плотностей мощности рассматриваемых стабилотограмм показывает, что характер спектров как в сагиттальном (верхние кривые), так и во фронтальном (нижние кривые) направлениях достаточно однороден, спектры спадают очень резко в области самых низких частот (наличие трендов) и достаточно медленно в средне- и высокочастотной области. Наличие такого мощного фактора как резкое сокращение ширины площади опоры в позе Ромберга вызывает максимальное растормаживание степеней свободы системы. Появляются достаточно мощные низкочастотные компоненты в стабилотограммах фронтальных колебаний, что может быть связано с наличием в системе хаотических колебаний, возникающих с целью идентификации объекта управления [7].

Более детальное рассмотрение этого явления может быть проведено с привлечением аппарата анализа хаотических колебаний в динамических системах [8].

К числу растормаживаемых степеней свободы следует, повидимому, отнести и подкорковый уровень управления (уровень синергий и штампов В по Н.А.Бернштейну) с его такими совершенными афферентами, как тельца Гольджи и мышечные веретена. Используя возможности этого уровня управления статикой позы, испытуемый старается сформировать единую сложную синергию, включающую в себя и тоническое напряжение мышц-антагонистов, и фазические балансирующие движения различных областей тела, как в сагиттальной, так и во фронтальной плоскостях. Подключается и зрительная афферентация, и здесь она оказывается очень нужной для поддержания вертикальной позы.

Таким образом, экспериментальные функциональные пробы с избирательной нагрузкой преимущественно тонического или преимущественно фазического автоматизмов поддержания вертикальной позы подтверждают их относительную независимость друг от друга, что кажется естественным, учитывая их различную афферентацию. Относительная природа такой независимости обнаруживается путем анализа взаимосвязи колебаний в сагиттальной и фронтальной плоскостях с помощью фазового спектра и функции когерентности. Наличие на фазовом спектре достаточно стабильной зоны в диапазоне 5 Гц при значительной величине когерентности в этом диапазоне позволяет говорить о связанности колебаний. При этом согласно гипотезе, высказанной в [8], возможен как вариант управления движением в обоих направлениях из одного центра, так и синхронизация колебаний, т.е. подчинение движения по одной координате более мощному источнику по другой координате. Экспериментально найденное подтверждение взаимосвязанности двух механизмов поддержания вертикальной позы человеком соответствует представлению об иерархии управляющей системы, автоматизмы управления на каждом из уровней которой не одни и те же, что и обнаруживается в различных экспериментальных ситуациях.

Таким образом, стабилотографическая методика, подкрепленная средствами вычислительной техники [9], еще далеко не исчерпала своих возможностей, направленных на изучение функционально-системной организации человека, причем не только двигательной. Эта методика может продвинуть наши представления о системных механизмах управления статикой позы и, в час-

тности, предложить психо-физиологические обоснования таким представлениям спортивной био-

механики как зоны различной устойчивости спортсмена.

Литература

1. Гурфинкель Е.В. Механический анализ методики стабиллографии // Бюллетень экспериментальной биологии и медицины. – 1974. – N 5. – С. 122– 124.
2. Гурфинкель В.С., Коц Я.М., Шик М.Л. Регуляция позы человека. – М: Наука, 1965. – 256с.
3. Кууз Р.А., Фирсов Г.И. Применение методов компьютерной стабиллометрии для решения задач функциональной диагностики в неврологии // Биомедицинская радиоэлектроника. – 2001. – № 5-6. – С.24-33.
4. Донской Д.Д., Зациорский В.М. Биомеханика. – М.: Физкультура и спорт, 1979. – С. 159– 160.
5. Андрианов В.В. Функциональная система, обеспечивающая оптимальное положение тела в пространстве // Нормальная физиология. Курс физиологии функциональных систем / Под ред. К.В.Судакова. – М.: Медицинское информационное агентство, 1999. – С. 470-502.
6. Бернштейн Н.А. Очерки по физиологии движений и

физиологии активности. – М.: Медицина, 1966. – 349 с.

7. Розенблюм М.Г., Фирсов Г.И. Стохастические автоколебания в системе регуляции вертикальной позы тела человека. 1. Стратегия управления позой и динамическая модель. // Биомеханика (София). – 1992. – Т. 24. – С. 34– 41. там же II. Модельный и натурный эксперимент // Биомеханика (София). – Т. 25. – 1992. – С.37-43.

8. Rosenblum M.G., Firsov G.I., Kuuz R.A., Pompe B. Human Postural Control– Force Plate Experiments and Modelling // Nonlinear Analysis of Physiological Data. / Ed. by H. Kantz, J. Kurths and G. Mayer-Kress.– Berlin:Springer, 1998. – P.283-306.

9. Винарская Е.Н., Кууз Р.А., Розенблюм М.Г., Фирсов Г.И. Компьютерная стабиллография и методы нелинейной динамики в задачах оценки функционального состояния человека-оператора в стрессовых ситуациях // Новое в экологии и безопасности жизнедеятельности: Докл. III Всерос. науч.-практич. конф.с междунар. участием. – С-П., 1998. – Т.2. – С. 348– 351.

Контактная информация:

Винарская Елена Николаевна.

Московский городской педагогический университет, Факультет специальной педагогики и специальной психологии, Россия, 129226, Москва, 2-й Сельскохозяйственный проезд, 4.

Суслов Владимир Николаевич.

Лаборатория методов исследования динамических процессов и систем Института машиноведения им.А.А.Благонравова Российской Академии наук. 101990 Москва М.Харитоньевский пер., 4.

Фирсов Георгий Игоревич.

Лаборатория методов исследования динамических процессов и систем Института машиноведения им.А.А.Благонравова Российской Академии наук. 101990 Россия, Москва Малый Харитоньевский пер. 4., Тел.: (095) 924-00-72.

E-mail: firsovgi@mtu-net.ru