

Романенко В.А., Зыкова Э.Ю., Кузьомко Л.М.

Донецкий Национальный университет  
Чернігівський державний педагогічний університет імені Т.Шевченка

## ПСИХОФИЗИОЛОГИЧЕСКИЕ МЕХАНИЗМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОИЗВОЛЬНЫМИ ДВИЖЕНИЯМИ

**Аннотация.** В статье, на базе обобщения и критического анализа литературных данных, излагаются современные концепции управления произвольными движениями человека.

**Ключевые слова:** произвольные движения, психофизиологические механизмы управления.

**Анотація.** Романенко В.О., Зыкова Э.Ю., Кузьомко Л.М. **Психофізіологічні механізми управління довільними рухами.** У статті, на базі узагальнення і критичного аналізу літературних даних, висловлюються сучасні концепції управління довільними рухами людини.

**Ключові слова:** довільні рухи, психофізіологічні механізми управління.

**Annotation.** Romanenko V.A., Zikova E.Y. Kuzjomko L.M. **Psychophysiological mechanisms of management arbitrary motions.** In the article, on the base of generalization and critical analysis of literary data, modern conceptions of management arbitrary motions of man are expounded.

**Key words:** arbitrary motions, psychophysiological mechanisms of management.

**Постановка проблемы.** Управление произвольными движениями включает процесс переработки проприорецептивной и экстерорецептивной афферентной импульсации и формирование на этой основе двигательной программы. На каждом из уровней реализации этой программы имеется своя "ведущая афферентация" и собственный тип регулируемых движений [3].

**Анализ последних исследований** показывает, что знание механизмов управления на каждом из уровней способствует более быстрому формированию навыков в процессе спортивной подготовки [3, 4, 5].

### Результаты исследований и их обсуждение

В связи с этим, цель исследований заключалась в обобщении и критическом анализе литературных источников по декларируемой проблеме.

Одним из основных механизмов познания окружающей среды для человека являются движения. Их регуляция осуществляется на двух уровнях – центральном и спинальном. На спинальном уровне протекают лишь простейшие координации и рефлексы (например, реципрокное торможение мышц – антагонистов, сухожильные рефлексы и т.п.). Управление движениями на центральном уровне считают "произвольным". В соответствии с концепцией Н.А. Бернштейна координация движений различной сложности представлена четырьмя уровнями [2].

Уровень А – уровень палеокинетических регуляций или руброспинальный уровень. Этот уровень достаточно древний и управляет мышцами туловища и шеи. Обеспечивает тонус всей мускулатуры, а также плавные и длительные движения. Координирует возбудимость спинальных структур, обеспечивает реципрокную иннервацию мышц-антагонистов. Действия уровня полностью произвольны.

Уровень В – таламо-паллидарный или уровень синергии. Движения этого уровня отличаются обширностью вовлекаемых в синергию мышц. Как правило, движения стереотипны и повторяются с определенной периодичностью. Ведущей афферентацией на этом уровне является проприорецепция скоростей и положений тела в пространстве. Со стороны экстерорецепторов это дифференцировка прикосновения, укола, трения, а также болевая и температурная чувствительность. В интегральном виде этот уровень обеспечивает восприятие собственного тела.

Уровень С – пирамидно-стриарный, или уровень пространственного поля. Его ведущая афферентация – восприятие окружающего пространства. Это поле обширно, гомогенно (однородно) и главное – несмещаемо. Пространство уровня С заполнено объектами с их формой, размерами и массой.

Уровень D – уровень предметных действий и смысловых цепей. Это теменно-премоторный уровень.

Важнейшими свойствами многоуровневой системы управления является не столько иерархия, сколько разделение функций этих уровней. Такое разделение обусловлено как анатомически (системы состоят из эволюционно различных структур мозга), так и функционально – в связи с большим количеством звеньев опорно-двигательного аппарата. В зависимости от двигательной задачи и условий ее реализации, уровни подразделяют на ведущий и несколько фоновых. Например, при формировании двигательного навыка (обучении) доминирует уровень D, при его реализации – нижележащие уровни.

Для реализации движения должна быть сформирована двигательная программа. Эта программа представляет собой набор базовых двигательных команд и готовых коррекционных подпрограмм. Подпрограммы обеспечивают реализацию движений с учетом текущей афферентной импульсации и информации от других частей ЦНС. Побуждение к движению связано с активностью корково-подкорковых мотивационных зон. Замысел движения формируется в ассоциативных зонах коры. Формирование программы движения идет с участием базальных ганглиев и мозжечка, которые через ядра таламуса действуют на двигательную кору. Последняя, в совокупности с нижележащими стволовыми и спинальными двигательными центрами отвечает за реализацию программы [1].

Предположительно, двигательная память содержит обобщенные классы двигательных программ. Из их числа для достижения цели выбирается оптимальная. В зависимости от ситуации программа изменяется, так как однотипные движения могут выполняться с различной скоростью и амплитудой. Одна и та же программа может быть реализована различным набором мышц. Так, почерк человека сохраняет свои особенности при письме правой и левой рукой. Такой перенос навыка связан с тем, что планирование движений и их исполнение регулируется различными уровнями управления.

Двигательная программа может быть реализована различными способами. В простейшем случае ЦНС посылает к мышцам заранее сформированную последовательность команд без их коррекции в процессе реализации. Это разомкнутая система управления, по которой реализуются быстрые "ударные" и "метательные" движения. Замкнутая система управления по отклонению предполагает внесение коррекций в движение на основе сигналов обратной афферентации и сравнение их с целью. Эта система управления также не лишена недостатков. Коррекция движений по сигналам обратной связи запаздывает в связи с временем проведения сигналов в ЦНС и временем развития усилий в нервно-мышечном аппарате. Поэтому во многих случаях организм реагирует не на отклонения от плана движения, а на само внешнее возмущение, причем, еще до того, как оно успело вызвать отклонение. Это управление по возмущению. Примером такого управления является механизм антиципации. Антиципация выражается в упреждающей позной активности нервно-мышечного аппарата и реализуется автоматически с очень короткими центральными задержками. Антиципация способствует уменьшению времени проведения нервного импульса, повышает экономичность и эффективность движений. По существу это механизм преднастройки организма к предстоящей деятельности [6].

Взаимодействие организма со средой строится на основе модели внешнего мира и модели собственного тела. Наличие в центральной нервной системе модели собственного тела подтверждается фантомом ампутированной конечности. Человек без руки субъективно ощущает ее присутствие. Следовательно, элементы внутренней модели или "схемы тела" относятся к врожденным. Предположительно "схема тела" включает в себя описание туловища и конечностей, последовательность и длину звеньев, число степеней свободы и объем движений в этих звеньях, топографию мышц и основных рецепторных полей. Без такой "внутренней модели" невозможно распознавание сигналов от различных участков тела и, естественно, формирование моторных программ. Между восприятием собственного тела и окружающего пространства существует тесная связь, обусловленная, предположительно, общим нейрофизиологическим механизмом. При поражении определенных структур ЦНС одновременно нарушается восприятие и пространства, и собственного тела [6, 7].

Подавляющая часть позных реакций и движений пространственно ориентированны, т.е. направлены на достижение определенной точки в пространстве. В зависимости от того, выполняется движение относительно собственного тела или относительно окружающего пространства, изменяется активность нейронов различных областей мозга. Так, корковые командные нейроны движений руки разряжаются перед началом движения и специфически связаны с разными классами и фазами движения. Эти нейроны обладают потенциально широким рецептивным полем, которое изменяется в ходе обучения. Например, при формировании навыка командные нейроны специфичны в отношении определенной реакции, а не сигнала, который вызывает эту реакцию. Перемещение руки человека в горизонтальной плоскости показало, что кодирование движения осуществляется в координатах внешнего пространства, а не углов сгибания плеча и предплечья. Следовательно,

управление рукой базируется на элементах константного экрана, т.е. на схеме пространства вокруг объекта [6, 7].

На осознанном уровне выполняется лишь небольшая часть пространственно ориентированных движений. Предположительно внутренняя модель тела "работает" на подсознательном уровне. Примером таких подсознательных движений могут служить шейные и вестибулярные "позные" автоматизмы. У животных они участвуют в поддержании нормального положения тела и сохранении равновесия. У человека, в отличие от животных, "позные" автоматизмы в значительной степени зависят от взаимного расположения головы, туловища и конечностей. Определенное расположение частей тела детерминирует определенную систему отсчета: 1) от собственного тела; 2) внешнего пространства; 3) движущегося в этом пространстве объекта. Переход от одной (например, эгоцентрической) к другой (экзоцентрической) системе координат ведет к изменению интерпретации сенсорных сигналов и модификации соответствующих двигательных реакций. Выбор системы отсчета во многом определяется априорными сведениями об объектах внешнего мира, с которыми человек взаимодействует. Учитывается их отдаленность, несмещаемость, жесткость и скорость передвижения [6, 7].

Управление движениями на уровне спинного мозга идет посредством мотонейронов. Мотонейрон (двигательный нейрон) – это крупная нервная клетка в передних рогах спинного мозга. Различают два типа мотонейронов:  $\alpha$  – и  $\gamma$ -мотонейроны. Альфа-мотонейроны иннервируют скелетную мускулатуру и обеспечивают мышечные сокращения. Гамма-мотонейроны иннервируют рецепторы растяжения. Совместная работа этих двух типов мотонейронов обеспечивает моторную координацию и необходимый мышечный тонус. Возможность градации мышечного сокращения основана на том, что мышца как функциональное целое состоит из двигательных единиц (ДЕ). ДЕ – это мотонейрон и иннервируемые им мышечные волокна. Двигательные единицы могут возбуждаться независимо друг от друга. Рекрутирование (вовлечение) разного количества ДЕ является одним из основных механизмов градации мышечного сокращения. Сила сокращения мышцы прямо пропорциональна частоте импульсации. Для мотонейрона частота импульсации – основной механизм управления мышечной частью ДЕ [7]. Активность мотонейрона осуществляется ритмически. В расслабленной мышце активность ДЕ не обнаруживается. При ритмической импульсации ДЕ с частотой 8-12 имп/с возникает слабое напряжение мышцы. При увеличении частоты импульсации увеличивается, до определенного уровня, сила сокращения мышцы. Чаще всего такая зависимость наблюдается в диапазоне от 0 до 50% максимальной силы. Это диапазон обычных, повседневных мышечных напряжений. Изменение частоты импульсации в этом диапазоне силы является одним из механизмов долговременной адаптации мышечной системы к повседневным нагрузкам. В спорте эти нагрузки значительно больше, и поэтому диапазон, в котором проявляется зависимость "частота импульсации – сила сокращения мышцы", значительно шире [7].

При быстрых и мощных движениях рекрутируемые ДЕ обычно выдают импульсацию "дуплетами", т.е. двумя импульсами с короткими интервалами. Такая активация ДЕ приводит к быстрому и эффективному развитию напряжения в мышце. При рефлекторном раздражении одни мотонейроны дают "тоническую" реакцию – длительный разряд умеренной частоты, другие – "фазическую" – относительно высокочастотный залп. Разряд умеренной частоты предназначен для подключения "медленных" (оксидативных) мышечных волокон, обеспечивающих медленные движения и позные реакции. Высокочастотный залп импульсов обеспечивает рекрутирование "быстрых", креатининфосфатных мышечных единиц, связанных с реализацией быстрых и мощных движений. Связь свойств мышечных волокон с порогами мотонейронов автоматически обеспечивает их рациональный выбор при решении той или иной двигательной задачи [7].

Управление мышцей осуществляет группа мотонейронов, так называемый пул (объединение). Основная функция мотонейронного пула (МП) заключается в дозировании силы сокращения именно мышцы, а не отдельного мышечного волокна. Это дозирование идет двумя путями: 1) через частоту разрядов мотонейронов; 2) количество активных мотонейронов данного пула.

Вторая функция МП – "выбор" активируемых мотонейронов в каждой конкретной ситуации. Необходимость этой функции связана с тем, что ДЕ могут отличаться друг от друга не только по скорости и силе сокращения, но и по месту прикрепления мышечных волокон к кости. Топография мышечных волокон изменяет механический эффект. В суставах со многими степенями свободы разные части одной мышцы обуславливают различные направления движения. При строго стабильной позе и стабильной двигательной задаче способ работы мотонейронов приближается к диффузному распределению возбуждения в мотонейронном пуле. В другом случае, при сокращении мышцы в условиях смены позы или двигательной задачи, мотонейроны в пределах одного пула ведут себя независимо и используют собственные синаптические входы. Такой способ работы мотонейронов обеспечивает "тонкие", высококоординированные движения за счет подключения к их

реализации отдельных двигательных единиц. С точки зрения управления (контроля) важной является связь морфологически детерминированных порогов нейронов с функциональной дифференциацией ДЕ. В частности, низкопороговые мотонейроны иннервируют в основном маленькие тонические ДЕ, а высокопороговые – большие фазические. Это позволяет мотонейронному пулу производить их рациональный выбор в соответствии с двигательной задачей. Вместе с тем, стабильность морфологически детерминированных порогов мотонейронов с функциональной дифференциацией ДЕ ограничивает разнообразие двигательных возможностей и ведет в ряде случаев к невыгодному их использованию. Низкопороговые тонические единицы "принуждены" участвовать во всех формах двигательной активности, в том числе и фазической, а высокопороговые используются крайне редко, как правило, при реализации скоростно-силовых упражнений.

Управление активированными мотонейронами в стандартных условиях совершается в основном путем диффузного воздействия на них, причем с использованием принципа порогов. В выборе же активируемых мотонейронов для каждой позы и двигательной задачи немаловажную роль играет механизм избирательного воздействия. В сложных двигательных актах реализуются обе возможности, что позволяет организовать эффективное управление движениями по динамическим и пространственно-временным характеристикам.

### **Выводы**

Управление и контроль за реализацией движений является достаточно сложным процессом. Этот процесс включает обработку информации, получаемой через прямые и обратные связи между префронтальной и моторной корой, таламусом, мозжечком, базальными ганглиями, а также стволом мозга и спинным мозгом. Важная роль принадлежит проприорецептивной и экстерорецептивной афферентации. Двигательная система организована по иерархическому принципу с постепенным увеличением сложности сенсомоторной интеграции. На каждом из ее уровней имеется своя "ведущая афферентация" и собственный тип регулируемых движений.

**Перспективы дальнейших исследований** связаны с необходимостью изучения механизмов рекрутирования двигательных мышечных единиц в зависимости от соматотипа и этнической принадлежности человека.

### **Литература**

1. Батуев А.С. Высшая нервная деятельность. – М.: Высшая школа, 1991. – 256 с.
2. Берштейн Н.А. О построении движений. – М.: Медгиз, 1947. – 148 с.
3. Данилова Н.Н. Психофизиология. – М.: Аспект Пресс, 2001. – 373 с.
4. Психофизиология / Под ред. Ю.И.Александрова. – СПб.: Питер, 2003. – 496 с.
5. Физиология мышечной деятельности / Под ред. Коца. – М.: ФиС, 1982.

*Надійшла до редакції 27.03.2007 р.*