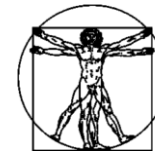


DOI: 10.15593/RZhBiomech/2017.3.04
УДК 612.829.34



**Российский
Журнал
Биомеханики**
www.biomech.ru

МЕТОДИКА КОЛИЧЕСТВЕННОЙ ОЦЕНКИ СТЕПЕНИ ПРОИЗВОЛЬНОСТИ ДВИЖЕНИЙ РУКИ

Ю.Г. Бурыкин¹, М.Я. Брагинский², В.И. Корчин³, С.А. Третьяков⁴

¹ Лаборатория биокibernетики и биофизики сложных систем Сургутского государственного университета, Россия, 628400, Сургут, проспект Ленина, 1, e-mail: yriig@yandex.ru

² Кафедра автоматизации и компьютерных систем Сургутского государственного университета, Россия, 628400, Сургут, проспект Ленина, 1, e-mail: mick17@mail.ru

³ Кафедра нормальной и патологической физиологии Ханты-Мансийской государственной медицинской академии, Россия, 628011, Ханты-Мансийск, ул. Мира, 40, e-mail: vikhmgmi@mail.ru

⁴ Кафедра эксплуатации технологических и транспортных машин филиала Тюменского индустриального университета в г. Сургуте, Россия, 628404, Сургут, ул. Энтузиастов, 38, e-mail: tretta@rambler.ru

Аннотация. В статье представлен метод количественной оценки степени произвольности движений руки человека. Привычные для человека действия, выполняемые произвольно, содержат непроизвольную компоненту. Даже простые действия, например движение пальцем руки, невозможно выполнить, полностью контролируя такие параметры движения, как амплитуда или частота колебаний. При многократном повторении эксперимента двигательный паттерн всегда будет разным. Это так называемый эффект повторения без повторения, описанный Н.А. Бернштейном. Однако наблюдение этого эффекта не дает главных ответов на вопросы: что является причиной в каждом конкретном случае этой вариативности и как количественно оценить долю произвольной и непроизвольной компоненты при выполнении движений? Человеческое самосознание, ошибочно принимающее мысль за причину поступка, как указывал И.М. Сеченов, иллюзорно: первоначальная причина всякого поступка лежит всегда во внешнем чувственном возбуждении, потому что без него никакая мысль невозможна. Зачастую неосознаваемые человеком сенсорные стимулы могут оказывать влияние на его поведение. Это имеет большое значение в ситуациях, связанных с проблемой выбора в политической, социально-бытовой сфере. Активно развивающаяся нейроэкономика является прикладным направлением, в основе которого лежат результаты нейробиологических исследований, полученных с использованием современных методов. Для количественной оценки степени произвольности движений нами предложен метод, заключающийся в статистическом сравнении всех возможных пар получаемых выборок и подсчете числа совпадений, т.е. отсутствия статистически значимых различий при сравнении данной пары выборок – k . Полученные результаты свидетельствуют о вариативности выходных показателей двигательных функций в зависимости от степени и вида (модальности) афферентных влияний. Наибольшее число пар совпадений выборок наблюдается при произвольном управлении движением – 11,6 % от общего их количества, а наименьшее – в состоянии покоя – 3,2 %, при изменении афферентации в условиях статической нагрузки – 7,1 %.

© Бурыкин Ю.Г., Брагинский М.Я., Корчин В.И., Третьяков С.А., 2017

Бурыкин Юрий Геннадьевич, к.б.н., ведущий научный сотрудник лаборатории биокibernетики и биофизики сложных систем, Сургут

Брагинский Михаил Яковлевич, к.т.н., доцент кафедры автоматизации и компьютерных систем, Сургут

Корчин Владимир Иванович, д.м.н., заведующий кафедрой нормальной и патологической физиологии, профессор, Ханты-Мансийск

Третьяков Сергей Анатольевич, к.ф.-м.н., доцент кафедры эксплуатации технологических и транспортных машин, Сургут

Ключевые слова: нейроэкономика, проприорецепторы, произвольность, непроизвольность, регуляция движений, координация, детерминизм, хаос.

ВВЕДЕНИЕ

Согласно представлениям И.М. Сеченова, первоначальная причина всякого поступка лежит всегда во внешнем чувственном возбуждении, потому что без него никакая мысль невозможна [18]. Таким образом, И.М. Сеченов указывает на иллюзорность человеческого самосознания, ошибочно принимающего мысль за причину поступка. Предпосылки для возникновения такой иллюзии заложены в природе обработки информации человеком. Как пишет И.М. Сеченов, в случае же, если внешнее влияние, т.е. чувственное возбуждение, остается, как это чрезвычайно часто бывает, незамеченным, то, конечно, мысль принимается даже за первоначальную причину поступка [18].

Впервые различия информационных и энергетических взаимодействий с точки зрения психофизиологии были рассмотрены А.Н. Леонтьевым (1965) и не потеряли своей актуальности в настоящее время. Информационное и энергетическое взаимодействия организма со средой, аналогом которых являются чувствительность и раздражимость, отличаются друг от друга по степени использования энергии воздействующего стимула в процессах жизнедеятельности организма [12]. За нижнюю границу информационного взаимодействия принимается пороговая чувствительность биологических систем к внешним стимулам, эквивалентным плотности потока мощностью 10^{-12} Вт/м² [17].

Неосознаваемые человеком сенсорные стимулы, например, по причине отсутствия внимания к ним, или слабые неосознаваемые раздражители могут, тем не менее, оказывать влияние на его поведение. Это имеет большое значение в ситуациях, связанных с проблемой выбора в политической, социально-бытовой сфере (кандидатов на различные выборные должности, предпочтение определенных товаров и услуг, выбор спутника жизни для создания супружеской пары и т.д.). Развитие такой науки, как нейроэкономика, основано на результатах нейробиологических исследований [7, 13, 14]. Целенаправленное влияние внешних зрительных и акустических стимулов на сенсорные системы человека имеет прикладное значение в спорте [15]. В последнее время также появились работы, посвященные нейроэстетике в спорте [21, 22].

Американский нейробиолог Бенжамин Либет (*Benjamin Libet*) и его сотрудники в 1983 г. провели исследования волевых актов человека, заключающихся в произвольном движении правой рукой или пальцем внутри заданных трехсекундных интервалов времени, регистрируя при этом электроэнцефалограмму. Было установлено, что волевой акт всегда предшествовал моторной реакции (в среднем на 200 мс) и что дежурный потенциал предшествовал волевому решению в отрезке от 350 до 550 мс. Ни в одном случае дежурный потенциал не совпадал по времени с волевым решением и не следовал за ним [25–27]. Далее Герхард Рот приводит свои рассуждения: «Чувство, что я делаю то, что хочу или хотел, очевидно, необходимо в связи с управлением определенными действиями, а именно как маркер, но не как причина этих действий» [27].

Дальнейшие исследования, выполненные группой Джона-Дилана Хайнеса (*John-Dylan Haynes*), были во многом близки к экспериментам Бенджамина Либета, и они также показали, что момент, когда по активности в некоторых структурах мозга уже можно было предсказать, какая из двух кнопок будет нажата, отстоял от момента принятия решения на 7 секунд! Сделав поправку на инерционность метода функционального магниторезонансного имиджинга (ФМРИ), позволяющего

регистрировать во всем объеме мозга небольшие локальные реакции кровотока на нейрональную активность, исследователи отнесли время появления предвестников будущего решения еще дальше – за 10 секунд до момента, когда испытуемым казалось, что они принимают это решение [28].

Системный подход не исключает взаимного влияния биологических объектов друг на друга (в том числе на систему принятия решений), а также влияния среды (световые, акустические, тактильные воздействия) на двигательные функции. Биологические организмы по своей сути являются открытыми неравновесными термодинамическими системами. Важным для системного анализа следствием открытости этих систем является очевидность всеобщей взаимосвязи и взаимозависимости в природе. Открытые системы обмениваются с окружающей средой веществом, энергией и информацией. Связи системы со средой имеют направленный характер: влияние среды на систему осуществляется через входы системы, а влияние системы на среду – через ее выходы [19].

Исследования психолога К. Дункера (*K. Duncker*) о мышлении четко показали, что думающее лицо не имеет понятия о природе и основе его мыслительного процесса [8, 24]. При полученных сенсационных результатах по-прежнему нет единого подхода в их интерпретации. Одна из его гипотез состоит в том, что субъективно переживаемый волевой акт возможен только после того, как бессознательно работающие мозговые центры примут решение [27].

О том, что большая часть информации о движении (в том числе выполняемом произвольно) остается неосознанной, свидетельствуют работы Н.А. Бернштейна. Это следует из его высказывания: «Если учесть, что движения в очень многих суставах и подвижных органах совершаются совместно, в одно и то же время, а для таких целостных действий, как смотрение, ходьба и бег, метание и тому подобные, обязаны протекать совместно в виде стройных и дружных синергий, то одна из трудностей уже сразу встает перед нами во весь рост. Какое огромное распределение внимания потребовалось бы, если бы все эти элементы сложного движения должны были управляться сознательно, с обращением внимания на каждый из них!» [1]. Таким образом, процесс управления произвольными движениями происходит неосознанно.

Координация движений по Н.А. Бернштейну «...есть не что иное, как преодоление избыточных степеней свободы наших органов движения, т.е. превращение их в управляемые системы» [1]. Далее Н.А. Бернштейн дает ответ на вопрос, каким образом организм человека справляется с этой сложной задачей, описывая вклад различных органов чувств в управление движениями. При этом ведущая роль отводится проприоцептивной системе: «Каждый залп двигательных импульсов, прибывающих из мозга в мышцу, оказывается прямой причиной нового залпа импульсов, текущих уже в обратную сторону – от чувствительного аппарата в мозг. Там этот поток чувствительных сигналов преобразуется в соответствующие коррекции к движению, т.е., в свою очередь, является причиной возникновения новых двигательных импульсов, исправленных и дополненных, снова мчащихся из мозга в нужные мышцы. Перед нами, таким образом, замкнутый кольцевой процесс – то, что в нервной физиологии называется рефлекторным кольцом» [1]. Аналогичный подход, который был применен Н.А. Бернштейном для выяснения роли сенсорной коррекции в регуляции движений человека, использовался для выяснения роли перцептивного действия в формировании сенсорного образа [11]. К эффекторным компонентам перцептивных действий относятся окулоторика при рассматривании контура изображения, движения руки при тактильном изучении предмета, а также движения гортани при воспроизведении слышимых звуков [11]. Перцептивные действия

уподобляются своей внешней формой воспринимаемому объекту и сопоставляются с особенностями этого объекта [12]. При создании копии объекта возникают сигналы рассогласования, выполняющие корригирующую функцию по отношению к перцептивному образу, а следовательно, и к практическим действиям [11].

Таким образом, изменение афферентации вызывает, в свою очередь, изменение эфферентных потоков, а следовательно, и движений, в том числе выполняемых произвольно. Информация, поступающая на вход зрительного (восприятие цветов, форм, световых пульсаций) и слухового анализаторов, а также от проприорецепторов и тактильных рецепторов может влиять на состояние двигательных функций, что требует дальнейшего экспериментального изучения [5, 16, 23].

Нами была поставлена задача количественного изучения степени произвольности простых двигательных актов в сравнении с произвольными (а именно движение II пальца правой руки в эксперименте), а также количественная оценка выходных параметров произвольных движений при изменении афферентных потоков.

ОБЪЕКТ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование произвольных ритмических движений человека, выполняемых II пальцем правой руки с ограниченной амплитудой (4 мм), проводилось в сопоставлении с данными, полученными при регистрации произвольных колебательных микродвижений в состоянии покоя (удержания ферромагнитной пластины, прикрепленной ко II пальцу над датчиком), а также в сравнении с данными, полученными в условиях статической нагрузки на верхнюю конечность при регистрации произвольных микродвижений.

В качестве произвольного движения использовалось простейшее движение с одной степенью свободы – ритмическое колебание пальцем. Испытуемому давалось задание выполнять данные колебания с ограничением амплитуды до 4 мм и частотой 1 Гц. Выбор такого вида движения обусловлен выдвигаемой нами гипотезой о невозможности полного контроля параметров (частоты и амплитуды) даже простейших движений.

При регистрации произвольных микродвижений руки в условиях статической нагрузки использовался груз из металла массой 0,3 кг, подвешиваемый на запястье правой руки обследуемого с помощью мягкого хомута. Груз вызывал напряжение мышц верхней конечности, которое было необходимо для его удержания. Это обеспечивало увеличение афферентации от проприорецепторов к управляющим структурам нервной системы человека. Вследствие этого возникало изменение эфферентных потоков нервных импульсов, направленных к мышцам руки и тела, которые удерживали верхнюю конечность с грузом в относительно фиксированном положении. При этом регистрировались колебания всей вытянутой вперед верхней конечности без учета вклада каждого биомеханического звена в отдельности (включая вклад относительно неподвижного II пальца, на котором фиксировалась пластинка).

В данной статье представлен фрагмент работы, а именно результаты исследования, выполненные с участием одного человека при регистрации кинематограмм в различных условиях. Аналогичные результаты были получены и на других участниках исследования. Перед регистрацией обследуемый принимал стандартное положение тела, характерное для всех серий экспериментов: сидя, с опорой на спинку стула, с вытянутой вперед верхней конечностью, произвольно зафиксированной испытуемым в плечевом суставе при неизменной величине угла с телом (рис. 1).



Рис. 1. Положение тела испытуемого при проведении регистрации произвольных движений верхней конечности в условиях статической нагрузки

На дистальной фаланге II пальца правой руки обследуемого закреплялась металлическая (ферромагнитная) пластинка, располагающаяся параллельно поверхности датчика на расстоянии, не превышающем диапазон измерения датчика. Закрепляемая на пальце пластинка имела размеры 28×34 мм.

Регистрация кинематограмм производилась в течение пятисекундного интервала. Унификация измерений микродвижений заключалась в предварительной установке пальца с закрепленной пластиной на высоте 4 мм от горизонтальной поверхности датчика, а также в задании испытуемому совершать движения II пальцем вниз при регистрации произвольных ритмических движений по команде «Старт». В каждой серии было выполнено по 15 регистраций кинематограмм с перерывами на отдых в 1 минуту через каждые 5 регистраций. В каждом из трех различных состояний (произвольных ритмических движений II пальцем, покоя, статической нагрузки) было выполнено 225 регистраций кинематограмм, т.е. 15 серий по 15 регистраций в каждой.

В один день с целью профилактики утомления производилась регистрация 5 серий. Таким образом, в течение трех дней выполнялась регистрация всех 15 серий. В течение последующих трех дней регистрировались следующие 15 серий в состоянии покоя. Последние 15 серий регистрировались в условиях статической нагрузки. Итого общее число регистраций составило 675.

Регистрация произвольных и произвольных движений человека производилась методом дистанционной регистрации кинематограмм с помощью измерительного комплекса [2–4], который состоял из индуктивного датчика, блока первичных преобразователей и аналогово-цифрового преобразователя, подключенного непосредственно к персональному компьютеру. Чувствительный элемент датчика

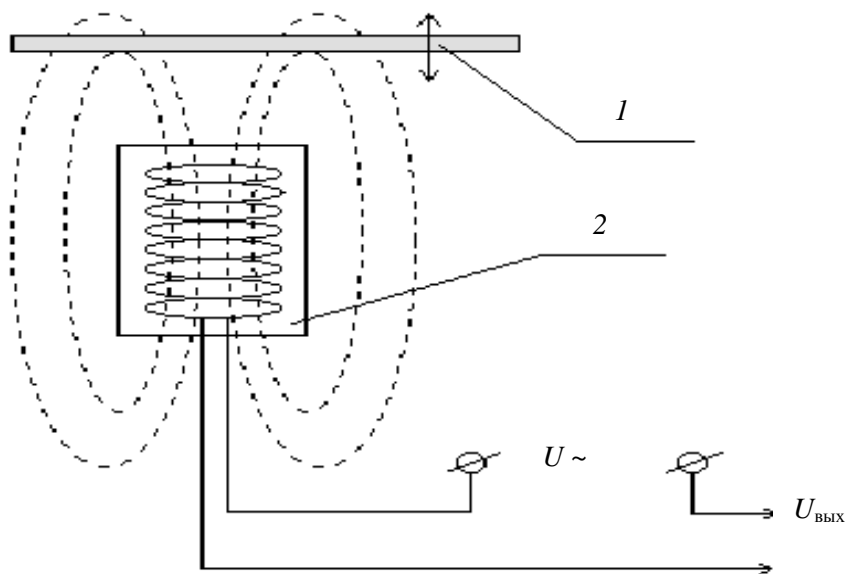


Рис. 2. Принцип работы токовихревого датчика; 1 – ферромагнитная пластина; 2 – катушка индуктивности

представлял собой катушку индуктивности (спираль Архимеда) без сердечника, помещенную в специальный металлический корпус с полым открытым цилиндром внутри, где горизонтально располагалась данная спираль. Принцип работы такого индуктивного датчика основан на изменении магнитного потока в его контуре. При введении ферромагнитной пластины, фиксируемой на конечности человека, в магнитное поле катушки изменялось значение индуктивности последней. При этом весь магнитный поток делился на части: поток, прошедший через ферромагнитную пластину и не прошедший. Чем ближе пластина подводилась к датчику, тем большее количество линий магнитной индукции замыкалось через нее, что и вызывало изменение индуктивности катушки (рис. 2).

Данная катушка индуктивности входила в параллельный LC -контур (включенный в цепь нагрузки усилителя на биполярном транзисторе) блока первичных преобразователей. На вход усилителя подавался сигнал прямоугольной формы с тактовой частотой 5 МГц. Параллельный LC -контур настраивался таким образом, что значение собственной резонансной частоты контура отличалось от значения тактовой частоты генератора. При приближении ферромагнитной пластины к чувствительному элементу изменялась его индуктивность, что приводило к увеличению амплитуды электрических колебаний в LC -контуре. Сигнал с выхода LC -контура детектировался, суммировался с добавочным напряжением, задающим значение нулевого уровня, и далее поступал на вход аналогово-цифрового преобразователя для последующего ввода в персональный компьютер и автоматизированной обработки.

Измерительный комплекс позволял надежно регистрировать механические колебания в диапазоне 0–200 Гц. Система фиксировала абсолютную величину перемещения исследуемого объекта с точностью до 0,01 мм и, следовательно, форму кинематограммы (рис. 3). Для сбора сигналов в реальном времени и аналогово-цифрового преобразования использовалась плата 12-разрядного аналогово-цифрового преобразователя производства предприятия «Руднев-Шиляев», подключаемая непосредственно к слоту расширения системной платы персонального компьютера. Время преобразования сигнала аналогово-цифрового преобразователя составляло

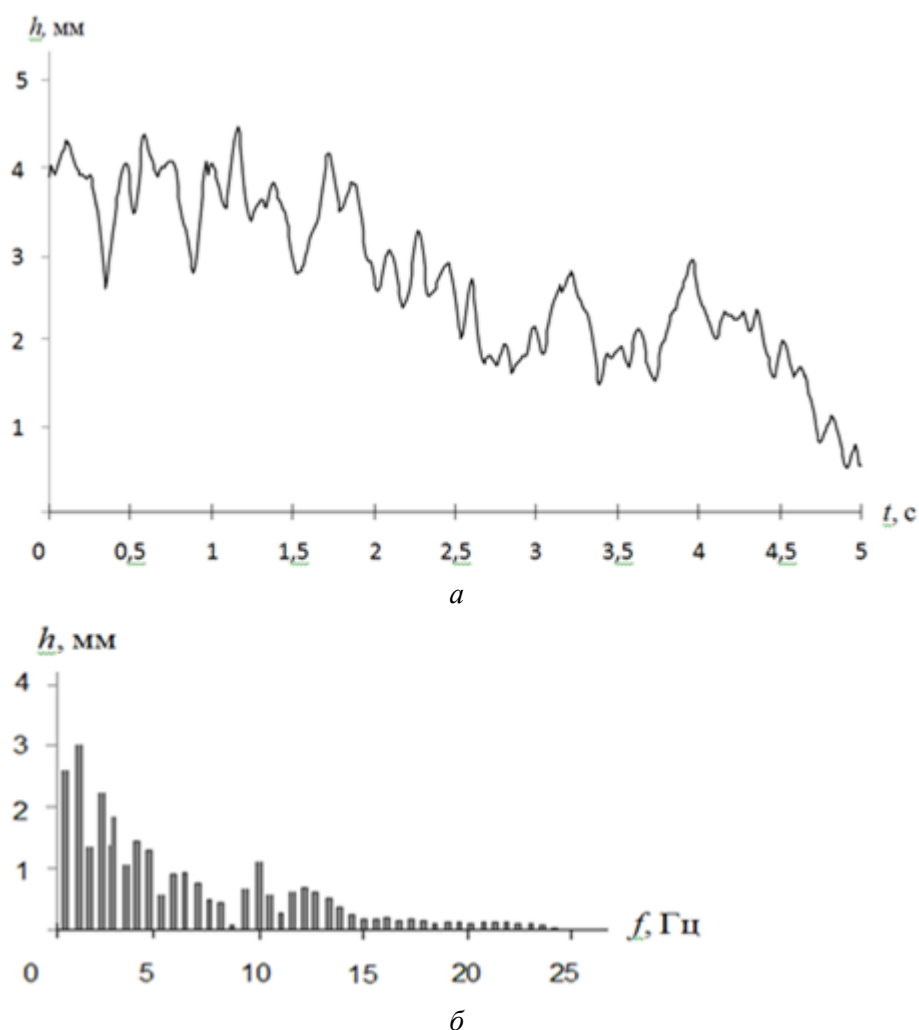


Рис. 3. Кинематограмма правой руки человека (а) и ее амплитудный спектр (б) при произвольном движении

70 мкс, входной диапазон напряжений аналогово-цифрового преобразователя позволял регистрировать сигналы в интервале 0–5 В. Плата аналогово-цифрового преобразователя работала под управлением программы *Saver2* (версия 1.0.2.0, «Руднев-Шиляев»), которая сохраняла цифровые данные в бинарный файл.

Полученные при регистрации файлы данных конвертировались с помощью программы *Converter* (версия 2.4, «Руднев-Шиляев»). В каждой выборке, полученной при регистрации, было по 500 значений (частота дискретизации сигнала – 100 Гц) изменений напряжения токовихревого датчика, отражающих форму исходного сигнала, т.е. перемещение объекта по вертикали в течение пятисекундного интервала (амплитуду механических колебаний).

Автоматизированный комплекс на базе персонального компьютера обеспечивал регистрацию и спектральный анализ кинематограмм в диапазоне частот от 0 до 50 Гц. Специализированная компьютерная программа (Кулаев С., «Анализатор сигналов 2002», версия 3.0.1.4) позволяла обрабатывать полученные от датчиков сигналы и выводить результаты в виде амплитудных значений микроперемещений исследуемого биологического объекта.

Для последующей статистической обработки данных была сформирована таблица размером 500×15 значений амплитуды сигнала (для каждой серии). Всего было

сформировано 15 таблиц для каждого из трех состояний (в сумме 45 таблиц). Обработка полученных данных производилась с использованием статистической программы *Statistica 6*. Сравнение нескольких зависимых групп (повторные измерения) для каждой серии из пятнадцати регистраций кинематограмм производилось с использованием рангового дисперсионного анализа Фридмана, после чего выполнялась процедура парного сравнения с использованием непараметрического критерия Вилкоксона [6, 20]. Процедура ранжирования значений амплитуд сигнала осуществлялась автоматически в программе *Statistica 6* [20]. Критерий Фридмана является непараметрическим аналогом дисперсионного анализа повторных измерений. Условием применимости является то, что анализируемые признаки должны быть количественными. Использование непараметрического критерия Фридмана не требует оценки параметров распределения и вообще, чтобы данные подчинялись какому-то определенному типу распределения, поэтому проверка выборки на подчинение нормальному распределению не проводилась. В случае сравнения между собой выборок в разные моменты наблюдения (в нашем случае 15 последовательных регистраций) в первую очередь с помощью аналога дисперсионного анализа повторных измерений проверялась нулевая гипотеза о равенстве всех средних. Поскольку в результате вычисления критерия Фридмана нулевая гипотеза была отвергнута, т.е. было установлено, что выборки в разные моменты измерения (регистрации) различаются, то на следующем этапе анализа среди них выделялись эти моменты (регистрации), отличные от остальных. Для парного сравнения зависимых выборок использовался непараметрический тест Вилкоксона. Применение данного критерия также не ограничено условием нормальности распределения.

В результате парного сравнения 15 выборок между собой было получено 105 пар (результаты представлялись в виде таблицы). В табл. 1 приведен пример парных сравнений. Пары, которые статистически различались (т.е. относились к разным совокупностям), отмечались в таблице нулевым значением (при $p < 0,05$). Пары, которые относились к одной совокупности, отмечались соответствующим вычисленным значением p -уровня значимости ($p > 0,05$) [10].

В приведенном ниже примере на рис. 4 число совпадений k равно двум, где $p_{13,8} = 0,19$ и $p_{13,12} = 0,08$ с округлением до второго знака после запятой (выделено в табл. 1). Пары 13/8 и 13/12 в данном примере относились к одной генеральной совокупности, так как вычисленные значения p -уровня значимости удовлетворяли условию $p > 0,05$ ($p_{13,8} = 0,19 > p = 0,05$; $p_{13,12} = 0,08 > p = 0,05$). Соответственно, число совпадений k в приведенном на рис. 4 примере равно двум из 15 возможных. В табл. 1 жирным шрифтом выделено 6 совпадений, т.е. $k = 6$. Остальные выборки различались при парном сравнении по критерию Вилкоксона (W), т.е. относились к разным совокупностям, например, пара 8/12 и другие, поскольку вычисленный уровень значимости удовлетворял условию $p < 0,05$.

Для каждой серии, состоящей из 15 выборок и полученных при регистрации 15 кинематограмм, вычислялось абсолютное число совпадений (k) и относительное значение, которое находилось в процентном отношении числа совпадений к общему числу возможных пар сравнений, т.е. 105 неповторяющихся комбинаций. Для каждого из трех состояний (произвольное ритмическое движение II пальцем, произвольный колебательный процесс верхней конечности в состоянии покоя и произвольные микродвижения верхней конечности при удержании груза) был вычислен коэффициент вариации значений числа совпадений выборок k , а также даны описательные статистические характеристики каждого состояния и выполнено сравнение числа совпадений k с использованием критерия Крускала–Уоллиса и Ньюмена–Кейлса [6].

Таблица 1

Результаты парных сравнений кинематограмм при произвольном управлении движением II пальца по критерию W ($p < 0,05$), число пар совпадений $k = 6$ (6 из 105 = 5,71%)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0		0	0,78	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0		0	0	0,57	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0,78	0		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0		0	0,27	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0,57	0	0		0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0,27	0		0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0		0	0	0	0	0,19	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0		0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0	0	0,46	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0,08	0	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0,19	0	0	0	0,08		0	0
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,46	0	0		0
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	

Пара перем.	Критерий Вилкоксона (Таблица данных1)			
	Число набл.	T	Z	p-уров.
Пара 13/1	500	24964,00	11,60879	0,000000
Пара 13/2	500	4923,00	17,82759	0,000000
Пара 13/3	500	5625,50	17,56028	0,000000
Пара 13/4	500	5988,50	17,47199	0,000000
Пара 13/5	500	1731,00	18,83906	0,000000
Пара 13/6	500	12827,00	15,34358	0,000000
Пара 13/7	500	1009,50	19,06227	0,000000
Пара 13/8	500	58403,00	1,30618	0,191492
Пара 13/9	500	0,00	19,37459	0,000000
Пара 13/10	500	34837,50	8,54500	0,000000
Пара 13/11	500	51819,00	3,20778	0,001338
Пара 13/12	500	56511,00	1,74745	0,080561
Пара 13/13				
Пара 13/14	500	44214,00	5,69590	0,000000
Пара 13/15	500	24393,50	11,82786	0,000000

Рис. 4. Пример парного сравнения выборок по критерию W

Выбор критерия Крускала–Уоллиса, являющегося непараметрическим аналогом критерия Фишера для однофакторного дисперсионного анализа, обусловлен тем, что с помощью него выполнялась процедура множественного сравнения трех независимых выборок. Этот критерий базируется на общей ранговой последовательности значений всех выборок и не требует предположения о нормальности распределения.

При принятии альтернативной гипотезы (между выборками существуют неслучайные различия по уровню исследуемого признака) производилось сравнение абсолютного числа пар совпадения выборок k для состояния произвольного выполнения движений, состояния покоя и в условиях статической нагрузки по критерию Ньюмена–Кейлса. В результате устанавливались различия (отсутствие различий) между тремя сравниваемыми независимыми группами.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Расчет числа совпадений k в 15 сериях регистрации кинематограмм при произвольном управлении движением II пальца с ограничением по амплитуде 4 мм в интервале 5 секунд показало, что ни в одной серии число k не повторяется и варьируется в диапазоне от 6 до 29 пар совпадений. При этом коэффициент вариации k составил 51,79 %. Полученные данные в виде абсолютных и относительных значений (процент совпадений выборок от общего числа возможных комбинаций парных сравнений с доверительной вероятностью не ниже 95 %) представлены в табл. 2 и на рис. 5. Общее число пар совпадений в 15 сериях составило в сумме 184 из 1575 возможных, т.е. 11,6 %.

Для сравнения с состоянием покоя, в котором вытянутая вперед рука осуществляет произвольные колебательные движения с низкой амплитудой (микродвижения), был выполнен расчет числа пар совпадений для данного состояния (15 серий регистрации кинематограмм). Полученные результаты представлены в табл. 3 и на рис. 5. Также было рассчитано общее число пар совпадений в 15 сериях, которое было в 3,68 раза меньше, чем в случаях произвольного управления движениями II пальца, и составило 50 из 1575 возможных, т.е. 3,17 %. Коэффициент вариации – 48,99 %.

Анализ результатов, приведенных в табл. 3, показывает, что число k_2 также варьируется, но в меньшем диапазоне, чем k_1 , а именно от 1 до 6. Таким образом, между произвольными и произвольными движениями существуют количественные

Таблица 2

Абсолютное число пар совпадений выборок значений амплитуд движения II пальца при регистрации кинематограмм в условиях выполнения произвольного движения пальцем (k_1) при попарном сравнении 15 кинематограмм (105 пар сравнения) по критерию W ($p < 0,05$)

№ выборки	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
День	Первый					Второй					Третий				
Абсолютное число совпадений, k	29	6	10	14	6	14	18	10	7	10	19	8	9	17	7
Общее число пар совпадений в 15 сериях	184														

Таблица 3

Абсолютное число пар совпадений (k_2) выборок значений амплитуд движения верхней конечности при регистрации кинематограмм в условиях покоя при попарном сравнении 15 кинематограмм (105 пар сравнения) по критерию W ($p < 0,05$)

№ выборки	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
День	Первый					Второй					Третий				
Абсолютное число совпадений, k	4	1	2	4	3	6	1	4	5	4	3	1	5	2	5
Общее число пар совпадений в 15 сериях	50														

различия, выражающиеся в увеличении числа пар совпадений выборок, а также в диапазоне колебания k . При этом, однако, коэффициент вариации различается несущественно. Общим признаком для двух этих режимов управления движениями (произвольное и произвольное) является варибельность k . Следовало бы предположить, что при произвольном контроле движений можно сформировать устойчивый периодический режим колебаний, который бы в идеале описывался функцией косинуса или синуса. Однако в реальном эксперименте мы этого не наблюдаем, поскольку в каждой серии экспериментов получаем совершенно разные результаты по числу пар возможных совпадений выборок. Увеличение k по сравнению с произвольным колебательным процессом (не управляемым силой воли) свидетельствует о попытке упорядочить колебательный процесс в случае произвольного управления микродвижениями (амплитудой и частотой). В результате этого выборки при парном сравнении совпадают в большем числе случаев, так как микроколебания конечности структурируются за счет управляющих структур нервной системы. Однако говорить о полном произвольном контроле даже сравнительно простых движений (колебательное движение пальцем, т.е. приближение и удаление от датчика) мы не можем, поскольку число k в этом случае бы было одинаковым во всех 15 сериях регистрации кинематограмм. При увеличении количества степеней свободы функции произвольного контроля движений будут еще менее выражены. Максимально возможное число совпадений выборок при полной их идентичности для серии из 15 регистраций кинематограмм составляет 105. Из этого следует, что на произвольное движение накладывает свой отпечаток некая произвольная составляющая, управлять которой человек не может в полной мере. Это может происходить в результате изменения афферентного сигнала, поступающего через зрительный, слуховой, проприоцептивный каналы информации.

Так, в исследованиях *Cropper S.J., Wuergler S.M.* [23] приводятся экспериментальные данные о влиянии цветовосприятия на кинематические характеристики движений человека. Положение тела, изменение взаимного расположения частей тела (отличающегося даже незначительно при каждой регистрации кинематограмм) может изменять афферентацию от проприорецепторов, а следовательно, и выходной сигнал, регистрируемый в виде кинематограмм.

Таким образом, процентное соотношение реального числа совпадений k в каждой серии с предельно возможным является показателем идентичности сравниваемых выборок. Увеличение числа k будет свидетельствовать об уменьшении вариативности, увеличении степени контроля над движением либо о внешнем воздействии, например, статической нагрузки. Предполагается, что такой фактор, как утомление, также будет влиять на число пар совпадений выборок k .

Изменение афферентных потоков может быть не замечено человеком, в особенности когда это касается воздействия слабых стимулов, например, световой природы [5]. В результате у человека формируется иллюзорное представление о свободе выбора, о полном контроле над своими действиями, а в случае получения объективных данных, например, в виде числа пар совпадений выборок, которые разнятся по абсолютным значениям в каждой серии, может возникнуть иллюзия другого рода – о хаотической работе структур нервной системы, управляющих движениями, и о хаотичности самих движений [9]. Между тем, речь идет о детерминированных процессах, о наличии причинно-следственной связи между афферентацией и эфферентацией, что полностью согласуется с приведенным выше высказыванием И.М. Сеченова об иллюзорности человеческого самосознания [18].

Для состояния покоя можно говорить о меньшем числе пар совпадений выборок (менее 6 %), что свидетельствует о более выраженных различиях кинематограмм, т.е. о большей вариации значений амплитуды сигнала в исходных выборках.

На третьем этапе исследований нами была экспериментально проверена гипотеза о том, что при изменении афферентации изменяются и эфферентные потоки нервных импульсов, направленные к мышцам, участвующим в удержании груза массой 0,3 кг (который прикреплялся к вытянутой вперед руке).

Результаты, представленные в табл. 4, подтверждают гипотезу об увеличении числа пар совпадений выборок по сравнению с состоянием покоя вытянутой вперед руки в условиях статической нагрузки.

Общее число пар совпадений выборок k увеличилось в 2,24 раза по сравнению с состоянием покоя и в абсолютном выражении составило 112 из 1575 возможных, т.е. 7,11 %. Коэффициент вариации числа пар совпадений выборок k – 50,07 %. Следует отметить, что коэффициент вариации для всех трех состояний у данного обследуемого отличался незначительно, что, возможно, является некой индивидуальной характеристикой.

Таким образом, изменение афферентации от проприорецепторов вызывает изменение потока управляющих эфферентных импульсов к мышцам, участвующим в удержании конечности в заданном положении. Полученные результаты также представлены на рис. 5 в сравнительном аспекте.

Таблица 4

Абсолютное число пар совпадений (k_3) выборок значений амплитуд движения верхней конечности при регистрации кинематограмм в условиях статической нагрузки (0,3 кг) при попарном сравнении 15 кинематограмм (105 пар сравнения) по критерию W ($p < 0,05$)

№ выборки	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
День	Первый					Второй					Третий				
Абсолютное число совпадений, k	4	3	9	14	8	5	6	9	5	8	12	5	15	5	4
Общее число пар совпадений в 15 сериях	112														

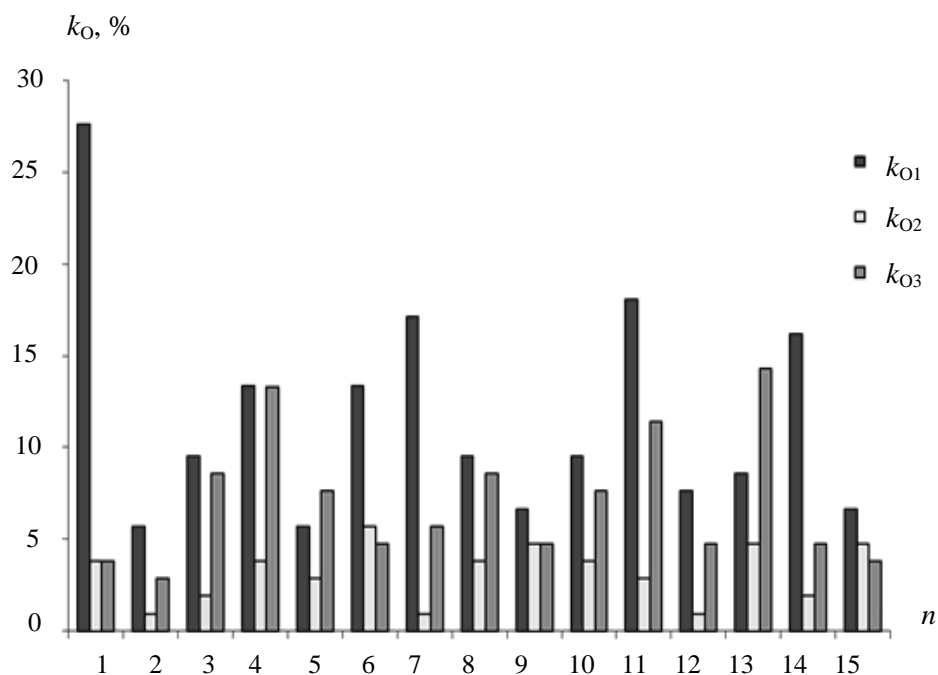


Рис. 5. Графическое представление трех состояний по числу совпадений выборок (k) при парном сравнении, где k_{O1} – относительное значение числа совпадений пар выборок (%) при произвольном управлении движением II пальца правой руки; k_{O2} – то же в состоянии покоя; k_{O3} – то же в условиях статической нагрузки (0,3 кг); n – номер серии

Таблица 5

Описательная статистика показателей числа пар совпадений выборок k в трех различных состояниях

Показатель	k_1	k_2	k_3
Среднее (M)	12,27	3,33	7,47
Дисперсия выборки (D)	40,35	2,67	13,98
Стандартное отклонение (s)	6,35	1,63	3,74
Доверительный интервал с $p = 0,95$ (\pm)	3,21	0,83	1,89
Стандартная ошибка (m)	1,64	0,42	0,97
Персентиль (0,05)	6,0	1,0	3,7
Персентиль (0,95)	22,0	5,3	14,3
Медиана (Me)	10,0	4,0	6,0
Мода (Mo)	10,0	4,0	5,0
Минимум (min)	6	1	3
Максимум (max)	29	6	15
Сумма	184	50	112
Коэффициент вариации (V)	51,79	48,99	50,08
Число наблюдений (n)	15	15	15

Таблица 6

Сравнение абсолютного числа пар совпадения выборок k для состояния произвольного выполнения движений, состояния покоя и в условиях статической нагрузки по критерию Ньюмена–Кейлса

Группа сравнения	Разность средних рангов	Стандартная ошибка	q	$p < 0,05$
$k_{1,2}$	24,37	3,39	7,19	+
$k_{1,3}$	10,23	2,27	4,50	+
$k_{3,2}$	14,13	2,27	6,22	+

В результате сравнения числа k для трех состояний (описательная статистика представлена в табл. 5) были получены достоверные различия по критерию Крускала–Уоллиса ($H = 26,26$, $p < 0,001$). Парные сравнения выполнены с использованием критерия Ньюмена–Кейлса (данные приведены в табл. 6).

Как следует из сравнительного анализа, представленного в табл. 6, все три состояния количественно различаются между собой по числу пар совпадений выборок k , что имеет прикладное значение для сравнения кинематограмм, зарегистрированных в различных состояниях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, при регистрации произвольных и непроизвольных движений человека необходимо учитывать влияние внешней афферентации на состояние двигательных функций организма. Однократный съем информации о движении отражает лишь текущее состояние двигательного анализатора, а в условиях воздействия внешних и внутренних стимулов происходит постоянное изменение в структуре движений. Произвольное управление заключается в выборе цели, постановке задачи, например, направленной на удержание конечности в заданном положении, но не в способности полностью влиять на параметры самих движений (частоту и амплитуду). Такое волевое управление имеет ограничение, поскольку движения, выполняемые произвольно, модулируются за счет непрерывного изменения афферентации. В лабораторных условиях возможно создание лишь частично стандартизированных условий проведения эксперимента, заключающихся в регуляции освещения и акустических параметров среды. Следует отметить, что, по нашим предыдущим исследованиям [5], зрительный анализатор очень чувствителен к незначительным изменениям параметров световой среды, которые могут не осознаваться человеком. Кроме того, положение тела также будет оказывать влияние на параметры движений, что требует дальнейшего изучения.

Также нами была обозначена проблема количественной оценки вариабельности движений, носящих произвольный и непроизвольный характер. Дальнейшие исследования в этой области позволят количественно установить взаимосвязи вариабельности движений с параметрами внешних стимулов (световых, акустических), а также выяснить роль внутренних факторов, что может иметь прикладное значение в диагностике различных патологий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бернштейн Н.А. О ловкости и ее развитии. – М.: Физкультура и спорт, 1991. – 288 с.
2. Брагинский М.Я., Еськов В.М. Алгоритм анализа нормального или патологического изменения треморограмм человека в условиях статических и динамических нагрузок: свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2000610599. – М., 2000.
3. Брагинский М.Я., Еськов В.М., Майстренко Е.В. Дифференциальный датчик для регистрации высокоамплитудного тремора: свидетельство Российской Федерации на полезную модель № 24920. – М., 2002.
4. Брагинский М.Я. Разработка методов и средств диагностики двигательных функций человека с использованием автоматизированного комплекса: автореф. дис....канд. техн. наук. – Сургут, 2004. – 19 с.
5. Бурькин Ю.Г., Буров И.В., Наумов К.В., Тиде Н.В. Изучение взаимодействия зрительного и двигательного анализаторов человека при восприятии слабых световых стимулов // Синергетика природных, технических и социально-экономических систем: сб. ст. VIII Международной науч. конф. – Тольятти, 2010. – С. 77–82.
6. Гланц С. Медико-биологическая статистика. – М.: Практика, 1998. – 459 с.
7. Громовик Б.П., Унгурян Л.М. Разработка понятийной сущности составляющих нейроэкономики с точки зрения фармации // Научные ведомости Белгородского государственного университета. – 2014. – № 24 (195), вып. 28. – С. 167–172.
8. Дункер К. Качественное (экспериментальное и теоретическое) исследование продуктивного мышления // Психология мышления: сб. переводов с нем. и англ. – М., 1965. – С. 21–85.
9. Еськов В.М., Гавриленко Т.В., Бурькин Ю.Г., Пашнин А.С. Хаотическая динамика произвольных и непроизвольных движений / Сургут гос. ун-т. ХМАО-Югры. – Сургут: Библиографика, 2014. – 149 с.
10. Еськов В.М., Гавриленко Т.В., Еськов В.В., Горбунов Д.В., Черников Н.А. Программа расчета матриц парных сравнений условно одинаковых выборок в идентификации гомеостаза: свидетельство о регистрации программы № 2016617594. – М., 2016.
11. Запорожец А.В., Венгер Л.А., Зинченко В.П., Рузская А.Г. Восприятие и действие. – М.: Просвещение, 1967. – 323 с.
12. Леонтьев А.Н. Проблемы развития психики. – М.: Мысль, 1965. – 480 с.
13. Леру П. Визуальные продажи: использование зрительных образов в продажах и на презентациях. – М.: Добрая книга, 2010. – 304 с.
14. Линдстром М. Biology: увлекательное путешествие в мозг современного потребителя. – М.: Альпина Бизнес Букс, 2012. – 208 с.
15. Логинов С.И., Ефимова Ю.С., Бурькин Ю.Г., Брагинский М.Я. Влияние фотостимуляции зрительного анализатора на показатели пострурального тремора стрелков-полиатлонистов // Теория и практика физической культуры. – 2012. – № 6. – С. 91–94.
16. Миролубов А.В. Использование искусственных функциональных связей мозга для регуляции психофизиологического состояния человека: автореф. дис.... д-ра мед. наук. – СПб., 1996. – 40 с.
17. Плеханов Г.Ф. Основные закономерности низкочастотной электромагнитобиологии. – Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1990. – 188 с.
18. Сеченов И.М. Элементы мысли. – СПб.: Питер, 2001. – 416 с.
19. Тарасенко Ф.П. Прикладной системный анализ (Наука и искусство решения проблем): учеб. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 2004. – 186 с.
20. Трухачева Н.В. Математическая статистика в медико-биологических исследованиях с применением пакета Statistica. – М.: ГЭОТАР-Медиа, 2013. – 384 с.
21. Хадарцев А.А., Фудин Н.А., Радчич И.Ю. Физиологические основы визуального восприятия при подготовке спортсменов с позиций синергетики // Вестник новых медицинских технологий. – 2012. – Т. XIX, № 2. – С. 17–20.
22. Хадарцев А.А., Еськов В.М., Несмеянов А.А., Фудин Н.А. Физиологические основы восприятия золотого сечения в спорте с позиций синергетики // Владикавказский медико-биологический вестник. – 2013. – Т.16, № 24–25. – С. 104–113.
23. Cropper S.J., Wuerger S.M. The perception of motion in chromatic stimuli // Behavioral and Cognitive Neuroscience Reviews. – 2005. – Vol. 4, № 3. – P. 192–217.
24. Duncker K. Zur Psychologie des produktiven Denkens. – Berlin: Springer, 1935.
25. Libet B. Unconscious cerebral initiative and the role of conscious will in voluntary action // The Behavioral and Brain Science. – 1985. – № 8. – P. 529–566.
26. Libet B. Do we have free will? // Journal of Consciousness Studies. – 1999. – № 8, 9. – P. 47–57.
27. Roth G. Ist die willensfreiheit eine illusion? // Biologie in unserer Zeit. – 1998. – № 1. – P. 6–16.
28. Soon C.S. Unconscious determinants of free decisions in the human brain // Nature Neuroscience. – 2008. – P. 1–3.

METHOD OF QUANTITATIVE ESTIMATION OF THE DEGREE OF ARBITRARINESS OF THE HAND MOVEMENTS

Y.G. Burykin, M.Y. Braginskii (Surgut, Russia), V.I. Korchin (Khanty-Mansiysk, Russia), S.A. Tretyakov (Surgut, Russia)

The article presents a method for quantifying the randomness of arm movements. Habitual human voluntary actions contain an involuntary component. Even simple actions, for example the finger movement can not be performed with movement parameters – such as the amplitude or the frequency, fully controlled. When the experiment is repeated many times, the motor pattern is always different. N. Bernstein described this effect and called it "repetition without repetition". However, the observation of this effect does not give answers to the main questions: what is the cause in each case of this variation? How do we quantify the rates of voluntary and involuntary components in the movement? Human identity means the idea of the cause of actions, as pointed out by I. Sechenov, it is an illusion: the original cause of every action is always the external sensory excitation, because without it no thought is possible. Often extramental sensory stimuli can influence the person's behavior. This is important in situations related to the problem of choice in the political, social and domestic spheres. Actively developing neuroeconomics is applied orientation, based on the results of neurobiological research, obtained by modern research methods. We proposed a method consisting of statistical comparison of all possible pairs of the received samples and counting the number of matches (i.e. lack of statistically significant differences when comparing this pair of samples – k) for the quantification of randomness of arm movements. The results indicate the variability of output indexes of motor functions, depending on the degree and the type of afferent influences (modality). The largest number of pairs of matching samples observed for voluntary arm movements – 11.6% of the total number, and the lowest at rest 3.2%, while afferentation under static load – 7.1%.

Key words: neuroeconomics, proprioceptors, arbitrariness, involuntary movements of the regulation, coordination, determinism, chaos.

Получено 20 марта 2017