

КОЛЕБАТЕЛЬНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ВЕГЕТАТИВНОЙ РЕГУЛЯЦИИ СЕРДЕЧНО-СОСУДИСТОЙ СИСТЕМЫ

А.Р. Киселев – ФГУ Саратовский НИИ кардиологии Минздрава России, Центр продвижения новых кардиологических информационных технологий, старший научный сотрудник, кандидат медицинских наук; **В.И. Гриднев** – ФГУ Саратовский НИИ кардиологии Минздрава России, руководитель Центра продвижения новых кардиологических информационных технологий, кандидат медицинских наук.

OSCILLATORY PROCESSES IN VEGETATIVE REGULATION OF CARDIOVASCULAR SYSTEM

A.R. Kiselev – Saratov Scientific Research Institute of Cardiology, Centre of New Cardiological Informational Technologies, Chief Research Assistant, Candidate of Medical Science; **V.I. Gridnev** – Saratov Scientific Research Institute of Cardiology, Director of Centre of New Cardiological Informational Technologies Promotion, Candidate of Medical Science.

Дата поступления – 09.12.2010 г.

Дата принятия в печать – 24.02.2011 г.

Киселев А.Р., Гриднев В.И. Колебательные процессы в вегетативной регуляции сердечно-сосудистой системы (Обзор) // Саратовский научно-медицинский журнал. 2011. Т. 7, № 1. С. 34-39.

В обзоре обсуждаются современные представления о функциональной организации системы вегетативной регуляции кровообращения. Выделены основные колебательные процессы в вегетативной регуляции, обобщена имеющаяся в литературе информация об их функциональных особенностях и свойствах. Показано значение основного ритма сердца, дыхания и низкочастотных колебаний в вегетативной регуляции системы кровообращения. В работе также обсуждаются особенности межсистемных взаимодействий с участием вегетативной регуляции сердечно-сосудистой системы.

Ключевые слова: вегетативная регуляция, сердечно-сосудистая система, респираторная синусная аритмия, 0,1 Гц-колебания, барорефлекс.

Kiselev A.R., Gridnev V.I. Oscillatory processes in vegetative regulation of cardiovascular system (Review) // Saratov Journal of Medical Scientific Research. 2011. Vol. 7, № 1. P. 34-39.

The research work provides current understanding of the functional organization of vegetative regulation of cardiovascular system. The basic oscillatory processes in vegetative regulation system have been determined, and the information about their functional properties has been generalized. The most significant oscillatory processes are main heart rhythm, respiration and low-frequency oscillations in vegetative regulation of cardiovascular system. The article considers intersystem interactions involving the vegetative regulation of cardiovascular system.

Key words: vegetative regulation, cardiovascular system, respiratory sinus arrhythmia, 0.1 Hz-rhythm, baroreflex.

С позиции теории функциональных систем [1] сложный многоуровневый комплекс различных регуляторных структур с большим количеством внутренних и внешних связей, участвующих в регуляции кровообращения, можно условно объединить в понятие единой функциональной системы вегетативного управления. При этом данная система является нелинейной и детерминированно-хаотичной [2]. Симпатический и парасимпатический отделы вегетативной нервной системы, являясь эффекторными звеньями, осуществляют динамическое управление кровообращением и вносят значительный вклад в формирование variability ритма сердца и артериального давления [3]. Изучение variability указанных параметров является наиболее доступным неинвазивным способом изучения свойств системы вегетативной регуляции кровообращения [4, 5].

Наиболее выражено взаимодействие сердечно-сосудистой и дыхательной систем. Принято считать, что влияние акта дыхания на структуру variability ритма сердца (появление так называемой респираторной синусной аритмии) осуществляется посредством респираторно зависимой вагусной модуляции [5]. Существует линейная связь между вари-

абельностью ритма сердца и дыхательным объемом легких: величина модулированной дыханием сердечной аритмии возрастает с увеличением глубины дыхания [6]. Большое значение имеет также частота дыхания, воздействуя посредством частотно-зависимого феномена [7] на основные параметры функционирования сердечно-сосудистой системы. Механизм кардиореспираторного взаимодействия, согласно современным представлениям, имеет смешанную природу: барорефлекторную [8] и центрогенную [9].

Известно, что при контролируемом по частоте дыхании в положении лежа изменения систолического артериального давления сопровождаются противоположными изменениями в ритме сердца (уменьшение частоты сердечных сокращений при повышении уровня артериального давления и наоборот), обусловленными барорефлекторным ответом на колебания уровня артериального давления в зависимости от фаз дыхания. Подобная модуляция мгновенной частоты сердечных сокращений обеспечивается увеличением потока парасимпатических импульсов к сердцу при вдохе и возвращением их к исходному уровню при выдохе. При этом с тонусом *n.vagus* в значительной мере коррелируют спектральные диапазоны variability ритма сердца: в большей степени - мощность высокочастотного (high frequency – HF) диапазона, в меньшей – низкочастотного

Ответственный автор – Киселев Антон Робертович.
Адрес: 410028, г. Саратов, ул. Чернышевского, 141.
Тел.: (8452) 20-18-99.
E-mail: antonkis@rambler.ru

(low frequency – **LF**) диапазона [10]. Интенсивность же тонической симпатической импульсации непосредственного участия в формировании дыхательной аритмии не принимает [11], хотя меняется в такт дыханию в большинстве симпатических нервов [12].

Однако дыхательная аритмия сохраняется и при прекращении непосредственно акта дыхания (при непрерывном вдувании в легкие струи воздуха [13] и при апноэ во время сна [14]), свидетельствуя о влиянии центральных механизмов управления сердцем на формирование дыхательной аритмии. Полагают [15], что основой для реализации данного феномена является общая для некоторых дыхательных и кардиомоторных нейронов сеть. При этом указывают, что действие дыхательных нейронов на кардиомоторные нейроны осуществляется в полном объеме лишь при поступлении афферентных сигналов из легких [16]. Остаточную слабую дыхательную аритмию, выявляемую у людей с пересаженным и денервированным сердцем [16], считают следствием растяжения ткани синусового узла кровью, объем которой в правом предсердии изменяется в течение дыхательного цикла.

Другим феноменом в вегетативной регуляции системы кровообращения, привлекающим внимание исследователей, являются низкочастотные колебания (в диапазоне частот 0,05-0,15 Гц у человека), выявляемые в биологических сигналах различных отделов данной системы. Интересно отметить, что исторически начало изучению данных колебаний в системе кровообращения было положено не в результате исследований variability ритма сердца, а при изучении колебаний уровня артериального давления.

Первоначальный интерес был вызван открытием С. Мейером в 1876 г. медленных волн в колебаниях уровня АД на частоте 0,1-0,15 Гц у анестезированных кроликов, названных впоследствии «волнами Мейера» («Mayer waves»). С самого первого упоминания данные волны считались вазомоторными. Усиление волн Мейера при симпатической активации стало основой для использования их как косвенного индикатора симпатической активности [17, 18]. Частота спонтанных симпатогенных колебаний артериального давления у активных кроликов составляет около 0,3 Гц, что выше частоты волн, описанных С. Мейером, поэтому термин «волны Мейера» в определенной мере некорректен для описания колебаний артериального давления, обусловленных симпатическими влияниями, но часто используется в литературе. Данная терминологическая путаница обусловлена еще и тем, что у человека вегетативные колебания уровня артериального давления наблюдаются на частоте около 0,1 Гц.

Непосредственные изучения взаимоотношений колебаний уровня АД и прямой регистрации потока симпатических импульсов выявили присутствие в них колебаний с частотой волн Мейера, которые в значительной мере были когерентны друг другу. Волны Мейера в колебаниях уровня артериального давления, безусловно, связаны с симпатическими вазомоторными влияниями, синхронно модулирующими сосудистый тонус на различных участках сосудистого русла (почки, мезентерий, скелетные мышцы) [19, 20]. При этом, например, у крыс они практически не выявляются в колебаниях сердечного выброса, присутствуя в колебаниях уровня артериального давления [19]. Частота волн Мейера устойчива для каждого вида животных. В частности, у людей она со-

ставляет около 0,1 Гц и не зависит от пола, возраста и положения тела [21-23]. У кошек и собак – также около 0,1 Гц [24], у кроликов – 0,3 Гц [25], у крыс и мышей – 0,4 Гц [19, 26].

В настоящее время существуют две основные теории, объясняющие природу медленных колебаний уровня артериального давления: пейсмекерная теория и барорефлекторная теория.

Согласно первой гипотезе, медленные волны в колебаниях уровня артериального давления являются центрогенными: их порождает нейронная сеть ствола мозга, которая определяет колебания интенсивности потока импульсов как симпатических, так и парасимпатических кардиомоторных нейронов с характерной для каждого вида животных частотой (около 0,1 Гц для человека). Основой формирования пейсмекерной теории стало наблюдение о том, что колебания в симпатической активности и/или показателях гемодинамики сохраняются на частоте волн Мейера при отсутствии внешних входящих стимулов, при этом в качестве источника колебаний предполагается наличие автономного генератора в области центральных мозговых структур, участвующих в формировании симпатического тонуса. Это предположение основано на ряде экспериментальных работ, посвященных изучению колебаний артериального давления [27], однако применимость данных исследований к интерпретации природы волн Мейера оспаривается многими авторами. Наиболее значимой в плане подтверждения пейсмекерной теории является работа N. Montano и соавторов, выполненная в 1996 г., в которой была показана возможность существования центрального ритма с частотой около 0,1 Гц (потенциально связанного с волнами Мейера) на уровне функционирования отдельных мозговых нейронов у анестезированных кошек, предварительно подвергшихся двухсторонней ваготомии и денервации барорецепторов каротидного синуса [28]. Несколько позже та же группа исследователей сообщила о выявлении 0,1 Гц-ритма в симпатической активности на уровне сердца у необезболенных, декортицированных кошек после двухсторонней ваготомии и пересечения спинного мозга на уровне C_1 [29]. Отметим, что влияние спинно-мозговых структур на волны Мейера не определено из-за противоречивости существующих данных. Таким образом, недостаточно данных для подтверждения теории пейсмекерного генеза волн Мейера, но нельзя исключить и возможность центральной генерации медленных ритмов, отражающихся в колебаниях артериального давления, при определенных условиях.

Вторая теория происхождения волн Мейера несколько более состоятельна, особенно при рассмотрении ее в оппозиции предшествующей пейсмекерной теории. В частности, активность и функциональная значимость для вегетативной регуляции барорецепторов каротидного синуса очевидна и не вызывает сомнений, поэтому данные рецепторы порождают поток афферентных импульсов в центральные отделы вегетативной регуляции сердечно-сосудистой системы, превосходящий по своей мощности и функциональной значимости потенциально существующие центрогенные ритмы. Впервые предположение о причастности барорефлекса к происхождению волн Мейера было высказано А.С. Guyton и J.W. Harris в 1951 г., чья идея была дополнена впоследствии целым рядом математических моделей на основе барорефлекса, теоретически объясняющих природу волн Мейера [30, 31]. Повышение уровня

артериального давления тормозит симпатические нейроны посредством механического воздействия на барорецепторы, способствуя понижению уровня артериального давления. Однако и в данной теории остается еще много спорных вопросов. Например, в работе J.P. Моак и соавторов в 2009 г. было показано, что низкочастотные (в LF-диапазоне спектра) колебания в вариабельности ритма сердца являются проявлением барорефлекса с дуги аорты, но не связаны непосредственно с симпатической иннервацией [32].

В целом можно сказать, что открытие барорефлекторной петли в регуляции уровня системного артериального давления практически «отменяет» концептуальное понятие «волны Мейера». Экспериментальной основой развития теории стали многочисленные данные об исчезновении (или уменьшении выраженности) волн Мейера в колебаниях артериального давления после денервации аортальных и синокаротидных барорецепторов у кошек и крыс [33], а также данные о значительном снижении их амплитуды после фармакологической альфа-адреноблокады [34].

Основным доказательством в пользу барорефлекторной теории генерации медленных волн в вариабельности артериального давления (в частности, у людей на частоте около 0,1 Гц) служит выявление высокой чувствительности системы вегетативной регуляции к внешним сигналам на частоте около 0,1 Гц, которая проявляется фазовым захватом частоты и значительным увеличением амплитуды колебаний ее выходного сигнала (в частности, колебаний уровня артериального давления). В литературе это явление часто интерпретируют как проявление резонанса в системе барорефлекса на данной частоте. В упрощенном варианте понимания барорефлекторная петля обратной связи представляет собой нелинейную систему, входным параметром для которой является импульсация с барорецепторов от воздействия на них артериального давления в дуге аорты, а выходным параметром – уровень колебаний системного артериального давления [30]. В 1926 г. E. Moissejeff, для создания экспериментальных условий изучения свойств барорефлекторной дуги, предложил изолировать от кровообращения оба каротидных синуса дуги аорты и денервировать аортальные барорецепторы, что позволило искусственно воздействовать на изолированные барорецепторы и наблюдать при этом динамику уровня системного артериального давления. В последующем данная методика использовалась для изучения барорефлекса у различных видов животных [35], полученные при этом результаты подтверждали возможность наличия резонанса в барорефлекторной петле на частоте, близкой таковой у волн Мейера.

Анализ функциональных свойств барорефлекторной петли с обратной связью в указанных выше и некоторых других сходных работах [36] выявил наличие в ней низкочастотного фильтра и времени задержки в обратной связи. Позже было косвенно определено время задержки в петле обратной связи барорефлекса, составившее порядка 2,5–2,6 секунд [37], что совместимо с основной частотой колебаний на уровне 0,1 Гц. Барорефлекторная система имеет нелинейную природу и обеспечивает поддержание оптимального уровня выходного сигнала [38], что имеет защитное значение, учитывая ее повышенную чувствительность к внешним сигналам на частоте собственных колебаний выходного сигнала системы вегетативной регуляции. Амплитуда медленных

колебаний уровня артериального давления зависит от различных факторов: уровня симпатической активности, модулируемого различными внешними факторами, общего тонуса нервной системы [39], показателей системной гемодинамики [40], психоэмоциональных факторов [41] и др. Свойства барорефлекторной петли являются специфическими для каждого из видов животных, что обусловлено прежде всего сопоставимой между различными их видами скоростью проведения нервного импульса по немиелинизированным нервным волокнам (около 1 м/с) при различных размерах их организма и основной частоте колебаний в петле барорефлекса. Отметим, что параметры вегетативной регуляции сердца у человека в целом очень схожи с таковыми у некоторых животных, в частности собак и коров [42].

Нелинейность свойств барорефлекторной дуги объясняется одними авторами особенностями функционирования центральных отделов вегетативной регуляции сердечно-сосудистой системы, другими – свойствами барорецепторов. В двух модельных исследованиях [43, 44] высказано предположение, что в условиях внешних случайных воздействий на сердечно-сосудистую систему в выходном ее сигнале (в частности, изменчивости уровня артериального давления) определяется $1/f$ шум, что особенно выражено при отсутствии в системе регуляции барорефлекторной дуги (при денервации барорецепторов) [45].

Таким образом, барорефлекторная составляющая вегетативной регуляции системы кровообращения играет значительную роль в регуляции уровня системного артериального давления, преобразуя шумовую высокочастотную импульсацию с барорецепторов каротидного синуса и аорты в функцию регуляции активности симпатического отдела вегетативной нервной системы [40].

Кроме колебаний уровня артериального давления медленные колебания на частоте около 0,1 Гц у человека выявляются и в вариабельности ритма сердца, являясь результатом функциональной активности того же механизма вегетативной регуляции кровообращения, что и для данных колебаний в вариабельности артериального давления [46]. При этом при повышении системного артериального давления уровень частоты сердечных сокращений снижается, а при снижении артериального давления – увеличивается.

Учитывая наличие ряда доказательств в пользу как пейсмекерной, так и барорефлекторной теории происхождения медленных колебаний в сердечно-сосудистой системе, можно принять как «рабочий» компромиссный вариант между данными теориями. 0,1 Гц-колебания (у человека) порождаются, возможно, нейронной сетью ствола головного мозга, которая определяет колебания интенсивности потока импульсов как симпатических, так и парасимпатических кардиомоторных нейронов с периодом около 10 секунд [15, 18]. При этом центральное происхождение низкочастотных колебаний в сердечном ритме обусловливает тот факт, что свойства данного периодического процесса едва ли могут определяться каким-либо одним единственным фактором, даже таким, как барорефлекс. Данное предположение подтверждается в работе G. Nollo и соавторов (2005 г.) [47], которые показали значение небарорефлекторных факторов во взаимодействии медленных колебаний в ритме сердца и системном артериальном давлении. Кроме того, в ряде работ был показан обратный эффект влияния вариабельности ритма сердца на из-

менчивость артериального давления [48], что также подвергает сомнению первопричинность барорефлекса в генерации 0,1 Гц-колебаний в системе кровообращения. Известно, что 0,1 Гц-колебания в вариabельности ритма сердца находятся в определенных функциональных взаимоотношениях с различными сенсорными системами человека, а также отделами центральной нервной системы, ответственных за высшую нервную деятельность [49].

Важно отметить, что 0,1 Гц-колебания у человека выявляются также в вариabельности кровенаполнения сосудов микроциркуляторного русла кожи [50] и скелетных мышц [51]. При этом, по-видимому, данные колебания являются следствием тех же механизмов вегетативной регуляции, но имеют преимущественно, вероятно, центрогенную, а не барорефлекторную природу. Однако особенности 0,1 Гц-колебаний в периферическом сосудистом русле остаются дискуссионным вопросом.

Кардиобарорецепторная регуляция может обуславливать динамику в кровяном давлении и сердечном ритме от нескольких секунд до нескольких минут. В анатомических и электрофизиологических исследованиях центральных механизмов, обеспечивающих барорефлекс, выявлена значительная роль быстрых нервных центров и симпатических ядер спинного мозга в формировании вариabельности сердечного и дыхательного ритмов [52]. Входным каналом барорецепторного контроля частоты сердечных сокращений являются множественные афферентные сигналы от баро- и хеморецепторов, респираторных нейронов и высших нервных центров. Взаимодействие сосудодвигательного и дыхательного центров характеризуется нелинейными свойствами, функционируя как комплексная нелинейная система с согласованием во времени [53]. Таким образом, вегетативная регуляция кровообращения представляет собой систему со сложной нейронной сетью, где спонтанные колебания в выходном сигнале обусловлены динамикой свойств самой системы и входными возмущениями, в том числе и описанным ранее кардиореспираторным взаимодействием, обуславливающим особенности формирования высокочастотных колебаний в вариabельности ритма сердца (частотно-зависимый феномен) [7].

Существование в сердечно-сосудистой системе различных колебательных процессов, таких, как ритм сердца, дыхание, кровообращение и система их вегетативной регуляции, предполагает функциональное взаимодействие между ними на различном уровне организации. Одной из доказательных форм организации функциональных взаимоотношений между колебательными процессами является их синхронизация между собой [54]. Наиболее хорошо изученной является кардиореспираторная синхронизация, в частности синхронизация между колебаниями в вариabельности ритма сердца на частоте дыхания и самим дыханием, являющаяся функционально-организационной основой для возникновения описанной ранее в тексте респираторной синусной аритмии. Однако сравнительно недавно было обнаружено, что основной сердечный ритм и ритм дыхания также могут быть синхронизованы между собой [55]. При этом фазовая синхронизация дыхательного и сердечного ритмов и модуляция сердечного ритма дыханием выступают в качестве конкурирующих аспектов кардиореспираторного взаимодействия, так как степень синхронизации дыхания и основного ритма сердца обратно пропорциональна величине респираторной

синусной аритмии. В проводимых различными авторами исследованиях выявлено, что у спортсменов длительность участков прямой кардиореспираторной синхронизации выше, чем у людей со средним уровнем физической активности [55]. В клинической практике иногда находит применение явление кардиореспираторного синхронизма, имеющее непосредственное отношение к обсуждаемому межсистемному взаимодействию, заключающееся в развитии кардиореспираторной синхронизации уровня 1:1 при совпадении частот дыхания и сердцебиения [56].

Большой интерес также представляют исследования фазовой синхронизации ритмов с частотой 0,1 Гц у человека, учитывая важное значение данных колебаний в вегетативной регуляции сердечно-сосудистой системы. Возможность синхронизации уровня 1:1 между 0,1 Гц-колебаниями в вариabельности ритма сердца и вариabельности кровенаполнения сосудов микроциркуляторного русла у практически здоровых людей была выявлена достаточно недавно [50]. Показано, что в норме данные 0,1 Гц-колебания находятся в состоянии синхронизованности значительную часть времени (что составляет в покое более 25% от общего времени). С физиологической точки зрения наличие синхронизации между вегетативными регуляторными механизмами сердца и периферического кровообращения вполне может быть обосновано, так как микроциркуляция крови находится под контролем системных и местных регуляторных механизмов с участием реактивности сосудистой стенки. Важная роль вегетативных механизмов в регуляции микроциркуляции крови обуславливает развитие нарушений в последней на фоне различных видов вегетативной дисфункции у человека [57]. Существующее мнение, что данные колебания на уровне капиллярного русла имеют исключительно вазомоторную природу [58], спорно и требует дальнейшего изучения.

Доказательством функциональной независимости механизмов вегетативной регуляции, обуславливающих появление 0,1 Гц-колебаний в вариabельности ритма сердца и вариabельности кровенаполнения микроциркуляторного русла, является различная ширина диапазона фазового захвата частоты каждого из указанных 0,1 Гц-колебаний внешним сигналом (управляемым дыханием) с линейно меняющейся частотой [59]. Наблюдаемое явление захвата дыханием низкочастотных колебаний в вариabельности ритма сердца и вариabельности кровенаполнения микроциркуляторного русла в диапазоне, близком к основной частоте системы (т.е. вблизи 0,1 Гц), характерно для классических автогенераторов под действием внешних возмущений. Это также свидетельствует о том, что основная частота низкочастотных колебаний в системе кровообращения не является стационарной и может варьировать в узких пределах (в диапазоне 0,06-0,14 Гц [59]), обеспечивая тем самым гибкую адаптацию вегетативной регуляции к условиям функционирования. Результаты указанной работы изменяют существующие представления о природе повышенной чувствительности вегетативной регуляции к внешним сигналам с частотой около 0,1 Гц, объясняя данный феномен с позиции резонанса в петле обратной связи барорефлекса. Учитывая наблюдаемый фазовый захват частоты собственных колебаний системы вегетативной регуляции внешним сигналом [59], можно полагать, что 0,1 Гц-колебания в выходном сигнале являются результатом динамики внутренних свойств системы

вегетативной регуляции кровообращения, обусловленных общей инерционностью данной системы, а не пейсмерной автогенерацией данных колебаний.

Современные представления о вегетативной регуляции системы кровообращения открывают новые перспективы для развития медицины. Например, в настоящее время активно развивается подход к повышению производительности труда и улучшения общего психофизиологического состояния сотрудников предприятий, основанный на использовании свойств биологической обратной связи в вегетативной регуляции сердца [60]. Находит клиническое применение и оценка синхронизованности колебаний в вегетативной регуляции системы кровообращения [50, 61, 62].

Библиографический список

1. Анохин П.К. Принципиальные вопросы общей теории функциональных систем. Принципы системной организации функций. М.: Наука, 1973. С. 5-61.
2. Glass L. Introduction to Controversial Topics in Nonlinear Science: Is the Normal Heart Rate Chaotic? // *Chaos*. 2009. Vol. 19. P. 028501.
3. Heart rate variability: Standards of measurement, physiological interpretation, and clinical use // *Europ. Heart J.* 1996. Vol. 17. P. 354-381.
4. Баевский Р.М., Иванов Г.Г. Вариабельность сердечного ритма: теоритические аспекты и возможности клинического применения. М.: Медицина, 2000. 295 с.
5. Kamath M.V., Fallen E.L. Power Spectral Analysis of Heart Rate Variability: A Noninvasive Signature of Cardiac Autonomic Function // *Critical Reviews in Biomechanical Engineering*. 1993. Vol. 21, iss. 3. P. 245-311.
6. Wang D.Y., Pomfret C.J., Healy T.E. Respiratory sinus arrhythmia: a new, objective sedation score // *Br. J. Anaesth.* 1993. Vol. 71, iss. 3. P. 354-358.
7. Effect of respiratory rate on the relationships between RR interval and systolic blood pressure fluctuations: a frequency-dependent phenomenon / M.V. Pitzalis, F. Mastropasqua, F. Massari [et al.] // *Cardiovascular Research*. 1998. Vol. 38, iss. 2. P. 332-339.
8. Cardiocirculatory coupling during sinusoidal baroreceptor stimulation and fixed-frequency breathing / C. Keyl, M. Dambacher, A. Schneider [et al.] // *Clinical Science*. 2000. Vol. 99. P.113-124.
9. Taylor J.A., Eckberg D.L. Fundamental relations between short-term RR interval and arterial pressure oscillations in humans // *Circulation*. 1996. Vol. 93. P. 1527-1532.
10. Kunitake T., Ishiko N. Power spectrum analysis of heart rate fluctuations and respiratory movements associated with cooling the human skin // *J. Auton. Nerv. Syst.* 1992. Vol. 38, № 1. P. 45-55.
11. Хаютин В.М., Лукошкова Е.В. Колебания частоты сердцебиений: спектральный анализ // *Вестник аритмологии*. 2002, № 26. С. 10-21.
12. Häbler H.-J., Jänig W., Michaelis M. Respiratory modulation in the activity of sympathetic neurons // *Progr. in Neurobiol.* 1994. Vol. 43. P. 567-606.
13. Shykoff B.E., Nagvi S.S., Menon A.S., Slutsky S. Respiratory sinus arrhythmia in dogs // *J. Clin. Invest.* 1991. Vol. 87, iss. 5. P. 1621-1627.
14. Respiratory-related heart rate variability persists during central apnea in the dog: mechanisms and implications / R.L. Horner, D. Brooks, R.J. Kozak [et al.] // *J. Appl. Physiol.* 1995. Vol. 78, iss. 6. P. 2003-2013.
15. On the existence of a common cardio-respiratory network / D.W. Richter, K.M. Spyer, K.M. Gilbey [et al.] // *Cardio-respiratory and motor coordination*. Berlin: Springer-Verlag, 1991. P. 118-130.
16. Respiratory sinus arrhythmia in humans: an obligatory role for vagal feedback in the lung / B.H. Taha, P.M. Simon, J.A. Dempsey [et al.] // *J. Appl. Physiol.* 1995. Vol. 78, iss. 2. P. 638-645.
17. Julien C., Malpas S.C., Stauss H.M. Sympathetic modulation of blood pressure variability // *J. Hypertens.* 2001. Vol. 19. P. 1707-1712.
18. Malpas S.C. Neural influences on cardiovascular variability: possibilities and pitfalls // *Amer. J. Physiol. Heart Circ. Physiol.* 2002. Vol. 282. P. 6-20.
19. Hemodynamic basis of oscillations in systemic arterial pressure in conscious rats / B.J. Janssen, J. Oosting, D.W. Slaaf [et al.] // *Amer. J. Physiol.* 1995. Vol. 269. P. 62-71.
20. Malpas S.C., Burgess D.E. Renal SNA as the primary mediator of slow oscillations in blood pressure during hemorrhage // *Amer. J. Physiol.* 2000. Vol. 279. P. 1299-1306.
21. Taylor J.A., Williams T.D., Seals D.R., Davy K.P. Low-frequency arterial pressure fluctuations do not reflect sympathetic outflow: gender and age differences // *Amer. J. Physiol.* 1998. Vol. 274. P. 1194-1201.
22. Oscillatory patterns in sympathetic neural discharge and cardiovascular variables during orthostatic stimulus / R. Furlan, A. Porta, F. Costa [et al.] // *Circulation*. 2000. Vol. 101. P. 886-892.
23. Low-frequency oscillation of sympathetic nerve activity decreases during development of tilt-induced syncope preceding sympathetic withdrawal and bradycardia / A. Kamiya, J. Hayano, T. Kawada [et al.] // *Amer. J. Physiol. Heart Circ. Physiol.* 2005. Vol. 289. P. 1758-1769.
24. Mancina G., Parati G., Castiglioni P., Di Rienzo M. Effect of sinoaortic denervation on frequency-domain estimates of baroreflex sensitivity in conscious cats // *Amer. J. Physiol.* 1999. Vol. 276. P. 1987-1993.
25. Janssen B.J., Malpas S.C., Burke S.L., Head G.A. Frequency-dependent modulation of renal blood flow by renal nerve activity in conscious rabbits // *Amer. J. Physiol.* 1997. Vol. 273. P. 597-608.
26. Janssen B.J., Smits J.F. Autonomic control of blood pressure in mice: basic physiology and effects of genetic modification // *Amer. J. Physiol. Regul. Integr. Comp. Physiol.* 2002. Vol. 282. P. 1545-1564.
27. Grasso R., Rizzi G., Schena F., Cevese A. Arterial baroreceptors are not essential for low frequency oscillation of arterial pressure // *J. Auton. Nerv. Syst.* 1995. Vol. 50. P. 323-331.
28. Presence of vasomotor and respiratory rhythms in the discharge of single medullary neurons involved in the regulation of cardiovascular system / N. Montano, T. Gnechchi-Ruscione, A. Porta [et al.] // *J. Auton. Nerv. Syst.* 1996. Vol. 57. P. 116-122.
29. Effects of spinal section and of positive-feedback excitatory reflex on sympathetic and heart rate variability / N. Montano, C. Cogliati, V.J. Da Silva [et al.] // *Hypertension*. 2000. Vol. 36. P. 1029-1034.
30. DeBoer R.W., Karemaker J.M., Strackee J. Hemodynamic fluctuations and baroreflex sensitivity in humans: a beat-to-beat model // *Amer. J. Physiol.* 1987. Vol. 253. P. 680-689.
31. Linear modelling analysis of baroreflex control of arterial pressure variability in rats / B. Chapuis, E. Vidal-Petiot, V. Ore'a [et al.] // *J. Physiol.* 2004. Vol. 559. P. 639-649.
32. Supine low-frequency power of heart rate variability reflects baroreflex function, not cardiac sympathetic innervation / J.P. Moak, D.S. Goldstein, B.A. Eldadah [et al.] // *Cleveland Clinic Journal of Medicine*. 2009. Vol. 76. Suppl. 2. P. 51-59.
33. Mancina G., Parati G., Castiglioni P., Di Rienzo M. Effect of sinoaortic denervation on frequency-domain estimates of baroreflex sensitivity in conscious cats // *Amer. J. Physiol.* 1999. Vol. 276. P. 1987-1993.
34. Barre's C., De Souza Neto E.P., Julien C. Effect of alpha-adrenoceptor blockade on the 0.4-Hz sympathetic rhythm in conscious rats // *Clin. Exp. Pharmacol. Physiol.* 2001. Vol. 28. P. 983-985.
35. Dynamics of sympathetic baroreflex control of arterial pressure in rats / T. Sato, T. Kawada, M. Inagaki [et al.] // *Amer. J. Physiol. Regul. Integr. Comp. Physiol.* 2003. Vol. 285. P. 262-270.
36. Dynamic baroreflex control of blood pressure: influence of the heart vs. peripheral resistance / H.K. Liu, S.J. Guild, J.V. Ringwood [et al.] // *Amer. J. Physiol. Regul. Integr. Comp. Physiol.* 2002. Vol. 283. P. 533-542.
37. Методика реконструкции модели системы симпатической барорефлекторной регуляции артериального давления по экспериментальным временным рядам / А.С. Караваев, В.И. Пономаренко, М.Д. Прохоров [и др.] // *Технологии живых систем*. 2007. Т. 4, № 4. С. 34-41.
38. Input size dependence of the baroreflex neural arc transfer characteristics / T. Kawada, Y. Yanagiya, K. Uemura [et al.] // *Amer. J. Physiol. Heart Circ. Physiol.* 2003. Vol. 284. P. 404-415.

39. Baroreflex control of renal sympathetic nerve activity and spontaneous rhythms at Mayer wave's frequency in rats / Y. Cheng, B. Cohen, Ore'a V. [et al.] // *Auton. Neurosci.* 2004. Vol. 111. P. 80-88.
40. Differential responses of frequency components of renal sympathetic nerve activity to arterial pressure changes in conscious rats / D. Bertram, V. Ore'a, B. Chapuis [et al.] // *Amer. J. Physiol. Regul. Integr. Comp. Physiol.* 2005. Vol. 289. P. 1074-1082.
41. Lucini D., Norbiato G., Clerici M., Pagani M. Hemodynamic and autonomic adjustments to real life stress conditions in humans // *Hypertension.* 2002. Vol. 39. P. 184-188.
42. Comparative study of heart rate variability between healthy human subjects and healthy dogs, rabbits and calves / A. Manzo, Y. Ootaki, C. Ootaki [et al.] // *Lab. Anim.* 2009. Vol. 43. P. 41-45.
43. Linear modelling analysis of baroreflex control of arterial pressure variability in rats / B. Chapuis, E. Vidal-Petiot, V. Ore'a [et al.] // *J. Physiol.* 2004. Vol. 559. P. 639-649.
44. Hammer P.E., Saul J.P. Resonance in a mathematical model of baroreflex control: arterial blood pressure waves accompanying postural stress // *Amer. J. Physiol. Regul. Integr. Comp. Physiol.* 2005. Vol. 288. P. 1637-1648.
45. Julien C., Chapuis B., Cheng Y., Barre's C. Dynamic interactions between arterial pressure and sympathetic nerve activity: role of arterial baroreceptors // *Amer. J. Physiol. Regul. Integr. Comp. Physiol.* 2003. Vol. 285. P. 834-841.
46. Heart rate and blood pressure variability in normal subjects compared with data from beat-to-beat models developed from de Boer's model of the cardiovascular system / A.M. Whittam, R.H. Claytont, S.W. Lord [et al.] // *Physiol Meas.* 2000. Vol. 21, iss. 2. P. 305-318.
47. Exploring directionality in spontaneous heart period and systolic pressure variability interactions in humans: implications in the evaluation of baroreflex gain / G. Nollo, L. Faes, A. Porta [et al.] // *Amer. J. Physiol. Heart Circ. Physiol.* 2005. Vol. 288. P. 1777-1785.
48. Legramante J.M., Raimondi G., Massaro M., Iellamo F. Positive and negative feedback mechanisms in the neural regulation of cardiovascular function in healthy and spinal cord-injured humans // *Circulation.* 2001. Vol. 103. P. 1250-1255.
49. Nickel P., Nachreiner F. Sensitivity and Diagnosticity of the 0.1-Hz Component of Heart Rate Variability as an Indicator of Mental Workload // *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society.* 2003. Vol. 45, iss. 4. P. 575-590.
50. Внутренняя синхронизация основных 0,1Гц – частотных ритмов в системе вегетативного управления сердечно-сосудистой системой / А.Р. Киселев, А.Б. Беспятов, О.М. По- сненкова [и др.] // *Физиология человека.* 200. Т. 33, № 2. С. 69-75.
51. Dynamic carotid baroreflex control of the peripheral circulation during exercise in humans / D.W. Wray, P.J. Fadel, D.M. Keller [et al.] // *J. Physiol.* 2004. Vol. 559, iss. 2. P. 675-684.
52. Dampney R.A.L. Functional organization of central pathways regulating the cardiovascular system // *Physiol. Rev.* 1994. Vol. 74. P. 323-364.
53. Синхронизация сердцебиения и ритма регуляции сосудистого тонуса с дыханием / В.И. Пономаренко, В.И. Грид- неев, М.Д. Прохоров [и др.] // *Биомедицинские технологии и радиоэлектроника.* 2004. № 8-9. С. 40-51.
54. Glass L. Synchronisation and rhythmic processes in physiology // *Nature.* 2001. Vol. 410. P. 277-284.
55. Bračić-Lotrič M., Stefanovska A. Synchronization and modulation in the human cardiorespiratory system // *Physica A.* 2000. Vol. 283. P. 451-461.
56. Покровский В.М. Сердечно-дыхательный синхронизм в оценке регуляторно-адаптационных возможностей орга- низма. Краснодар: Кубань-книга, 2010. 244 с.
57. Иванов С.Н. Вегетативная регуляция и перифериче- ское кровообращение у подростков с нейроциркуляторной дистонией кардиального типа // *Вестник аритмологии.* 2003. № 32. С. 70-74.
58. Крупаткин А.И. Колебания кровотока частотой около 0,1 Гц в микрососудах кожи не отражают симпатическую ре- гуляцию их тонуса // *Физиология человека.* 2009. Т. 35, № 2. С. 60-69.
59. Synchronization of low-frequency oscillations in the human cardiovascular system / A.S. Karavaev, Prokhorov, V.I. Ponomarenko [et al.] // *Chaos.* 2009. Vol. 19. P. 033112.
60. Sutarto M.D. A.P. Abdul Wahab M.N., Mat Zin N. Heart Rate Variability (HRV) biofeedback: A new training approach for operator's performance enhancement // *Journal of Industrial Engineering and Management.* 2010. Vol. 3, iss. 1. P. 176-198.
61. Оценка на основе определения синхронизации низ- кочастотных ритмов динамики вегетативной регуляции сер- дечно-сосудистой системы при применении метопаглола у больных ИБС, перенесших инфаркт миокарда / А.Р. Киселев, В.И. Гриднеев, О.М. Посненкова [и др.] // *Терапевтический архив.* 2007. Т. 79, № 4. С. 23-31.
62. Оценка пятилетнего риска летального исхода и разви- тия сердечно-сосудистых событий у пациентов с острым ин- фарктом миокарда на основе синхронизации 0,1 Гц-ритмов в сердечно-сосудистой системе / А.Р. Киселев, В.И. Гриднеев, А.С. Караваев [и др.] // *Саратовский научно-медицинский журнал.* 2010. Т. 6, № 2. С. 328-338.

УДК 616.7

Оригинальная статья

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ РЕГУЛЯЦИИ ДВИЖЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАТЕМАТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ЭЛЕКТРОЭНЦЕФАЛОГРАММЫ

В.А. Балабанова – Российская детская клиническая больница, г. Москва, заведующая отделением нейрофизиологии, кандидат биологических наук; **Д.А. Киселев** – Научно-исследовательская лаборатория (НИЛ) разработки проблем физического и психического здоровья Российской ГМУ им. Н.И. Пирогова Минздравсоцразвития России, старший научный сотрудник, кандидат биологических наук; **О.А. Лайшева** – профессор кафедры реабилитологии и физиотерапии ФУВ Российского ГМУ им. Н.И. Пирогова Минздравсоцразвития России, доктор медицинских наук; **В.В. Губанов** – ГОУ ВПО Саратовский ГМУ им. В.И. Разумовского Минздравсоцразвития России, заведующий кабинетом восстановительного лечения клиники профпатологии и гематологии.

EFFICACY EVALUATION OF FUNCTIONAL MOTOR REGULATION METHOD WITH MATHEMATICAL ANALYSIS OF EEG

V.A. Balabanova – Moscow Children Clinical Hospital, Head of Department of Neurophysiology, Candidate of Biological Science; **D.A. Kiselev** – Russian State Medical University n.a. N.I. Pirogov, Scientific Research Laboratory of Physical and Mental Health Problems, Senior Research Assistant, Candidate of Biological Science; **O.A. Laishva** – Russian State Medical University n.a. N.I. Pirogov, Department of Rehabilitology and Physiotherapy, Professor, Doctor of Medical Science; **V.V. Gubanov** – Saratov State Medical University n.a. V.I. Razumovsky, Clinic of Professional Pathology and Haematology, Head of Medical Rehabilitation Room.

Дата поступления – 02.12.2010 г.

Дата принятия в печать – 24.02.2011 г.

Балабанова В.А., Киселев Д.А., Лайшева О.А., Губанов В.В. Оценка эффективности применения метода функциональной регуляции движения с использованием математического анализа электроэнцефалограммы // *Саратовский научно-медицинский журнал.* 2011. Т. 7, № 1. С. 39-44.