

УДК 612.82/.83; 612.821

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИНДИВИДУАЛЬНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ ДИНАМИКИ КАРДИОРИТМА ПРИ ТЕСТИРОВАНИИ ОПЕРАТИВНОЙ ПАМЯТИ ЧЕЛОВЕКА

Филимонова Н.Б., Кравец Т.В.

*Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко, Киев, Украина
E-mail: filimonova@univ.kiev.ua*

Динамика кардиоритма человека при изменении психофизиологической нагрузки исследовалась методом вейвлет-анализа на основе функций Кравчука, что позволило оценить индивидуальные особенности реакции человека и вклад отдельных звеньев вегетативной нервной системы в формирование адаптационной реакции на определенную психофизиологическую нагрузку. Структурные закономерности в динамике вейвлет-спектра определялись методом кластеризации СОК-Уорда.

Ключевые слова: оперативная память, вейвлет - анализ, функции Кравчука, метод кластеризации СОК-Уорда.

ВВЕДЕНИЕ

Анализ variability сердечного ритма (ВСР) позволяет получить объективные количественные показатели функционального состояния нервной системы [1, 2]. Поскольку сердечно-сосудистая система является чувствительным индикатором адаптационных реакций целостного организма, динамика показателей ВСР отражает формирование различных функциональных систем, соответствующих поставленной на данный момент задаче. Кроме того, изменения сердечного ритма происходят в результате влияния многоконтурной, иерархически организованной многоуровневой системы управления физиологическими функциями организма. Так, ВСР обусловлена влиянием комплекса регуляторных структур (нервный аппарат самого сердца, корковые структуры головного мозга, ствольные и спинномозговые вегетативные центры и т.п.) и отражает связь изменений сердечного ритма с тонусом различных отделов вегетативной нервной системы (ВНС), состоянием сосудистого центра, высших вегетативных центров и т.д. [3]. Одним из наиболее используемых математических методов анализа периодических составляющих ВСР является спектральный анализ, т.е. Фурье-анализ соответствующих динамических рядов. Использование преобразования Фурье для выделения гармонических составляющих ВСР предполагает, что динамический ряд кардиоинтервалов является стационарным, т.е. его вероятностные характеристики в среднем не меняются со временем, и эргодическим, т.е. среднее по времени равно среднему по пространству реализаций.

Однако, адаптационные реакции индивидуальны и реализуются на основе обратных связей. Сам процесс адаптации по определению не может быть стационарным, т.к. предполагает изменение функциональной организации организма,

которая формируется и меняется исходя из успешности достижения результата. Кроме того, нервно-психическое напряжение при выполнении поставленной задачи приводит к десинхронизации взаимодействия различных контуров регуляции сердечного ритма, результатами которой является синусовая аритмия-нарушения ритма различного происхождения, что также осложняет использование Фурье-анализа. Единичные аритмии называют артефактами и исключают из расчетов и интерполируют соседними значениями RR-интервалов, что приводит к искажению первоначального ряда кардиоинтервалов. В том случае, если аритмии не единичные, а групповые, целый ряд спектральных показателей не вычисляется. Поскольку десинхронизация может быть частью адаптивной реакции и свидетельствовать о перестройке в организации функциональной системы, интерес представляет локализация подобных нерегулярных структур и их соотнесение в динамике с уровнем сложности поставленной задачи.

Основным недостатком Фурье-анализа является то, что частотные компоненты не могут быть локализованы во времени, что не позволяет исследовать динамику изменений частотных параметров сигнала. При использовании оконного преобразования Фурье, увеличение окна обработки сигнала улучшает разрешение по частоте, но ухудшает по времени, и наоборот. Проблема разрешения связана с принципом Гейзенберга, который указывает, что невозможно определить для определенного момента времени какие спектральные компоненты присутствуют в сигнале [4].

Для анализа нестационарных процессов был разработан метод вейвлет-преобразования [4]. При этом сигнал анализируется путем разложения по определенным базисным функциям (отличным от гармонических), которые получены из некоторого прототипа путем сжатия и сдвига. Функция-прототип называется материнским вейвлетом. В последние десятилетия вейвлет-анализ широко используется для исследования динамики электрофизиологических сигналов, в частности, электрокардиограмм (ЭКГ) [5-9]. Целью настоящего исследования было изучение динамики вейвлет-спектров кардиоинтервалов при тестировании оперативной памяти человека на различные типы стимулов различного уровня сложности.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

У 30 женщин, студенток биологического факультета Киевского национального университета имени Тараса Шевченко, средний возраст которых составлял 20 ± 2 года, мы изучали особенности обработки вербальных (буквы и цифры) и невербальных (геометрические фигуры) стимулов в оперативной памяти. Каждая из обследуемых проходила последовательно тест корректурной пробы Бурдона-Анфимова и 4 субтеста оценки уровня развития кратковременной памяти. В первом субтесте (Б) определялось развитие кратковременной памяти на буквы. Тестируемой предъявлялись последовательно 60 групп согласных букв. Такие группы включали в себя от 2-7 разных букв. Время предъявления каждой группы составляло 1.5 с, после чего она гасла. Через 1 с после этого появлялась некоторая буква, и тестируемая должна была ответить-была ли она в предъявленной группе. Остальные тесты проводились по аналогичной схеме. Во втором субтесте (Ц) определяли развитие кратковременной памяти на цифры. В третьем субтесте (Г1) определяли развитие кратковременной памяти на простые геометрические фигуры: круг, эллипс, квадрат, прямоугольник,

ромб и т.д. В четвертом субтесте (Г2) определялось развитие кратковременной памяти на геометрические фигуры с двумя признаками: форма (круг, эллипс, квадрат и прямоугольник) и окрашивание вертикальной либо горизонтальной половины фигуры. Во всех тестах сохранялась информация о времени и правильности каждого ответа [10].

Кроме того, у обследуемых регистрировали ЭКГ до начала обследования и на протяжении тестирования. Регистрация ЭКГ, расчет ритмограмм и вычисление показателей вариационной пульсометрии проводились с использованием 12-канального электрокардиографа «Поли-Спектр-12» (ООО «Нейрософт», Россия, ЕС-сертификат № RQ060612-V от 02.03.2006р.).

Статистический анализ данных проводился при помощи пакета прикладных программ Statistica 6.0 (StatSoft, USA, 2001). Для проверки гипотезы о нормальности распределения исследуемых параметров использовали критерий Лиллифора. Поскольку распределения большинства показателей были отличны от нормального, дальнейшая обработка проводилась непараметрическими методами.

Вейвлет-преобразование производилось с помощью специальной программы, разработанной на кафедре физиологии человека и животных биологического факультета Киевского национального университета имени Тараса Шевченко [11-12]. В качестве материнского вейвлета использовали функции Кравчука (Рис.1) [11-12].

Одним из методов анализа волновой структуры ритма сердца является спектральный анализ ритмограммы. При этом, в соответствии с рекомендациями [2], выделяют зону очень низких частот (VLF) - 0,003–0,04 Гц (333-25 с), зону низких частот (LF)-0,04–0,15 Гц (25 - 6,5 с), и зону высоких частот (HF) - 0,15–0,4 Гц (6,5-2,5 с). Напомним, что при вейвлет-анализе выбор ширины окна преобразования (параметр масштаба) соответствует определенному диапазону частот [2]. Исходя из приведенных рекомендаций и учитывая, что при выполнении части тестов на оперативную память проводилась короткая запись ЭКГ (около 200 с), для вейвлет-анализа полученных ритмограмм было выбрано 3 окна: окно шириной 64 точки, вычислялся вейвлет-спектр для 1-й и 2-й функций Кравчука; 32 точки, вычислялся вейвлет-спектр для 1-4 функций Кравчука и 8 точек, вычислялся вейвлет-спектр для 1 - 3 функций Кравчука. Первое окно выделяет вейвлет - спектр в VLF-диапазоне, 2-е-в LF и 3-е-в HF. Вейвлет-спектр можно только приблизительно оценить в герцах, поскольку количество колебаний функций Кравчука нельзя точно соотнести с количеством колебаний $\sin(t)$ и $\cos(t)$ за 1с.

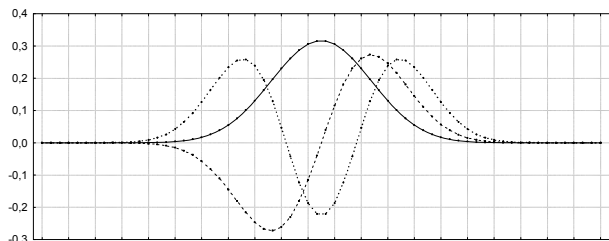


Рис. 1-Графики первых трех функций Кравчука $F_1^p(64) - F_3^p(64)$ на множестве точек $[0,1,...,63]$ при значении коэффициента асимметрии $p = 0.5$

Кластеризацию вейвлет-спектров проводили методом самоорганизующихся карт Кохонена (СОК) при помощи программы Viscovey SOMine 5.1 (Viscovery Software GmbH, Austria, 1998-2009). Viscovey SOMine реализует два кластерных алгоритма, основанных на классическом иерархическом агломерационном методе кластерного анализа (Ward): первый алгоритм в основном есть неизменный Уорд (Ward) метод, второй изменяет его таким образом, что топологическая окрестность, как это определено в СОК, влияет на шаги кластерного слияния. СОК можно рассматривать как сжатые исходные данные. С помощью этого метода кластерные методы могут быть применены к наборам данных практически неограниченного размера.

Классический кластерный метод Уорда (Ward) принадлежит к иерархическим агломерационным кластерным алгоритмам, которые характеризуются следующим образом: в начале процесса кластеризации каждый отдельный узел образует кластер сам по себе, на каждом шаге алгоритма два кластера с минимальным расстоянием между ними (в соответствии с мерой расстояния, характеризующей конкретный алгоритм) объединяются. Мера (расстояние), характеризующая метод Уорда, основана на дисперсионном критерии (цель: небольшая разница в каждом кластере и большие различия между кластерами). На каждом шаге два кластера объединяются, если их слияние вносит наименьший вклад в дисперсионный критерий, который растет на каждом шаге. Это расстояние называется мерой Уорда и определяется следующим образом:

$$d_{rs} = \frac{n_r \cdot n_s}{n_r + n_s} \|\bar{x}_r - \bar{x}_s\|^2, \text{ где } r \text{ и } s \text{ определяют номера кластеров, } n_r \text{ и } n_s$$

– число входных векторов, принадлежащих соответствующим кластерам, \bar{x}_r и \bar{x}_s – центры гравитации кластеров, $\|\cdot\|$ – норма Эвклида. Начиная с полной матрицы расстояний (которая является симметричной матрицей) на каждом шагу строка и столбец ликвидируются (а другие строки и столбцы обновляются) до тех пор, пока матрица полностью не будет очищена, и только один кластер останется. Среднее и мощность нового кластера, построенного как результат шагов слияния, вычисляется следующим образом:

$$\bar{x}_r^{(new)} = \frac{1}{n_r + n_s} (n_r \cdot \bar{x}_r + n_s \cdot \bar{x}_s), \quad n_r^{(new)} = n_r + n_s.$$

В программе Viscovey SOMine 5.1 реализована следующая модификация этого метода. Матрица расстояний инициализируется таким образом, что учитывается количество входных записей в соответствующих узлах карты. Узлы со многими соответствующими входными записями являются взвешенными сильнее, чем узлы с меньшим количеством соответствующих записей. В качестве меры расстояния используется измененное Уорд - расстояние, поскольку возможно, что СОК содержит "пустые" узлы. Пусть r и s обозначают номера двух узлов, для которых мы хотим вычислить расстояние. Далее, пусть n_r и n_s – количество записей, которые

соответствуют узлам r и s , \bar{x}_r и \bar{x}_s – векторы этих узлов. Тогда расстояние d_{rs} определяется следующим образом:

$$d_{rs} = \begin{cases} 0, & \text{если } n_r = n_s = 0, \\ \frac{n_r \cdot n_s}{n_r + n_s} \|\bar{x}_r - \bar{x}_s\|^2, & \text{иначе.} \end{cases}$$

Это определение гарантирует, что во время первых шагов слияния только узлы (и в дальнейшем кластеры) с $n_r = 0$ ("пустые кластеры") объединяются до тех пор, пока остаются только кластеры с $n_r > 0$. Заметим, что если есть хотя бы один пустой кластер, то существует много записей в матрице расстояний с $d_{rs} = 0$, которые являются кандидатами на следующий шаг слияния (так как все эти Уорд - расстояния величины 0 - минимальны). Реализация выбирает среди них те (пустые или непустые) кластеры, которые близки по мере Эвклида.

В программе Viscovery SOMine 5.1 реализован также метод СОК-Уорда. В этом случае мера расстояния определяется по-новому: $d'_{rs} = d_{rs}$, если кластеры являются смежными на СОК, $d'_{rs} = \infty$ в противном случае. Таким образом, СОК-Уорд - расстояние учитывает топологическое расположение кластеров. В частности, два кластера, которые не являются смежными в СОК, никогда не смогут быть объединены [13].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

После статистической обработки результатов вариационной пульсометрии была выбрана типичная обследуемая как такая, большинство показателей которой принимали значения медиан обследуемой группы. В данной работе приведены результаты анализа ритмограммы только для этой обследуемой. На первом этапе начальная ритмограмма приводится к нулевому уровню-нормализуется (рис. 2.а).

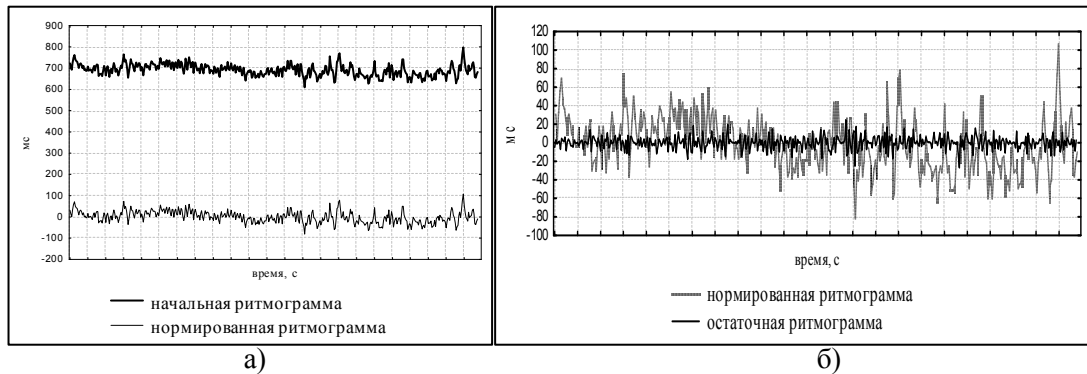


Рис.2 Графики ритмограмм: а – начальной и нормированной, б – нормированной и остаточной.

В отличие от принятой в вейвлет-анализе схемы [4], мы начинаем обработку сигнала максимально широким окном, поскольку рассматриваем более высокие частоты как модуляции более низких. Кроме того, после вычисления вейвлет-спектра, выделенные частоты вычитаются из сигнала. Таким образом, на первом этапе вычисляется вейвлет – спектр последовательно окном 64 точки, после вычитания из ритмограммы выделенных частот-окном 32 точки и аналогично, окном 8 точек. На Рис.2.б представлен график остаточной ритмограммы. Вейвлет - анализ позволяет выделить и более высокочастотные составляющие, однако, поскольку их интерпретация не совсем понятна, в данной работе мы ограничились рекомендованными диапазонами.

На Рис.3 представлен вейвлет-спектр ритмограммы, соотношенный во времени с выполнением соответствующих тестов. Наличие трех окон при вейвлет-анализе ритмограммы и неточности при вычислении Фурье-спектров функций Кравчука привели к неравномерной шкале по оси частот.

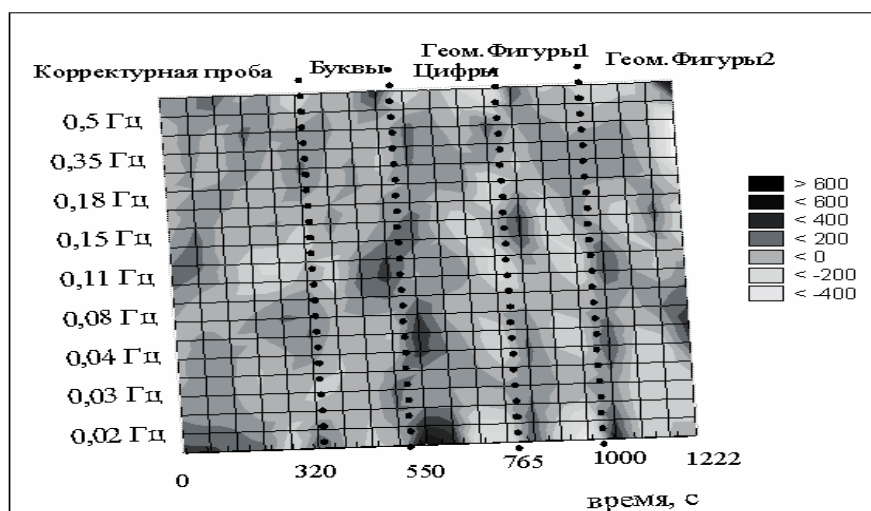


Рис. 3 График вейвлет-спектра ритмограммы обследуемой при тестировании внимания (тест корректирующей пробы Бурдона-Анфимова) и оперативной памяти на буквы, цифры, геометрические фигуры с одним признаком и геометрические фигуры с двумя признаками.

Как показывает анализ вейвлет-спектрограммы, обнаружена повышенная активность в VLF-диапазоне вначале тестирования уровня внимания, а также вначале всех тестов на оперативную память и особенно на цифры. Как отмечено в [14-16] формирование очень низкочастотных волн в спектре ВСП, по-видимому, обусловлено влиянием надсегментарных отделов ВНС, эндокринных или гуморальных факторов на синусовый узел. Показано, что в ВСП имеются очень низкочастотные ритмы, обусловленные секрецией ренина, а также связанные с колебаниями в крови уровня адреналина, норадреналина и 17-оксикортикостероидов. Полагают, что основной (околонулевой) пик данного диапазона связан с активностью надсегментарных (гипоталамических) эрготропных

центров вегетативной регуляции. Причем очень низкочастотная составляющая минимальна в спектре у здоровых лиц и грубо нарушается при органических поражениях (опухоли, инсульты, паркинсонизм) правого полушария, ответственного за вегетативную регуляцию [15]. Таким образом, можно отметить усиление влияния надсегментарных уровней (корково-лимбических отделом головного мозга) на автономный уровень регуляции кровообращения вначале хождения тестов. Возможно, это связано с психоэмоциональным возбуждением и усилением произвольного внимания. На начальной стадии адаптации к новому тесту возможно необходима активация более высоких уровней регуляции. То, что пик активности совпадает с началом тестирования оперативной памяти на цифры, возможно, отражает индивидуальную эмоциональную реакцию как на однообразие - однотипность тестов на буквы и цифры («надоело»), так и на некоторое субъективное переживание. Так, в [17] отмечено, что все обследуемые из группы с повышенной мощностью спектра в диапазоне VLF находились на момент проведения исследования в состоянии сильного эмоционального стресса, либо имели выраженную невротическую симптоматику.

Колебания в LF-диапазоне отражают суммарный эффект вегетативной регуляции на ритм сердца [14-16]. Происхождение этих компонент кардиоритма связывают с многоуровневым и нелинейным характером процессов регуляции сердечного ритма и наличием переходных процессов [3, 18-19]. В целом по их спектральной мощности можно судить о состоянии симпатической регуляции сердечного ритма [20]. Колебания в области 0,1 Гц в системе вегетативного управления сердечно-сосудистой системой считают общим системным механизмом, генерируемом в центральном отделе системы управления и характеризующим эффект обратной связи [3, 18-19]. Кроме того, возможно, что в формировании 0,1 Гц – ритма принимают участие кроме центрального и барорефлекторный, и миогенный механизмы [20]. Анализ вейвлет-спектра ритмограммы показывает повышение активности в области 0,1 Гц в самом начале тестирования, в финальной части теста на оперативную память на буквы, когда сложность теста максимальная и вначале теста на геометрические фигуры с 2 признаками, что свидетельствует, по-видимому, о центральном механизме адапционных реакций к возросшему уровню сложности.

По спектральной мощности в HF-диапазоне судят об активности парасимпатического отдела вегетативной нервной системы. Кроме того, эта составляющая спектра связана с активностью ядра блуждающего нерва, которая влияет на синусовый узел [20]. Также рассматривается возможный центральный механизм формирования высокочастотных колебаний в результате прямого взаимодействия дыхательного и сосудистого центров, а также барорефлекторный механизм за счет колебаний артериального давления [20]. В [21] показана связь высокочастотных колебаний с адапционными реакциями. По графику вейвлет-спектра трудно судить об изменениях в указанном диапазоне. Это связано с тем, что амплитуда колебаний ритмограммы, как правило, уменьшается с увеличением частоты. На графике видно, что происходят определенные колебания парасимпатической активности, которые вероятно связаны с адапционными

реакциями. В любом случае, анализ графика носит описательный и приблизительный характер.

Вейвлет-коэффициенты содержат информацию о форме ритмограммы, т.е. фактически о состоянии организма. Целью дальнейшей работы было выделить множество определенных состояний, которые бы имели вполне конкретные частотные характеристики, а динамику состояния рассматривать как траекторию в данном множестве состояний. Для выявления структурных закономерностей в динамике вейвлет-спектра проведен кластерный анализ полученного вейвлет-спектра по всему исследуемому диапазону частот при помощи программы Viscosity SOMine 5.1.

Для матрицы вейвлет-коэффициентов построена нейросеть с ошибкой квантования (мерой того, как хорошо векторы данных от набора исходных данных подобраны определенным узлом), равной 0,01587. Мера эвристического качества для каждой группы определенных кластеров (кластерный индикатор) вычисляется для всех методов кластерного анализа и является средством нахождения истинной кластеризации. Индикатор отображается в диаграмме, в которой количество кластеров указывается на горизонтальной оси. Вертикальная ось показывает значение индикатора для каждой системы кластеров, которое можно интерпретировать следующим образом: если индикатор является высоким для конкретной системы кластеров, кластеризацию можно рассматривать как "естественную" для построенной карты. Соответственно, когда индикатор низок для системы кластеров, кластеризация является "искусственной", т.е. пики графика кластерного индикатора показывают истинные кластеризации.

Для кластерного метода Уорда диаграмма индикатора не позволяла установить истинную кластеризацию (Рис.4.а), поэтому для кластеризации вейвлет-спектров был использован метод СОК-Уорда, для которого исходя из диаграммы индикатора (рис.4.б) была выбрана система из 5 кластеров.

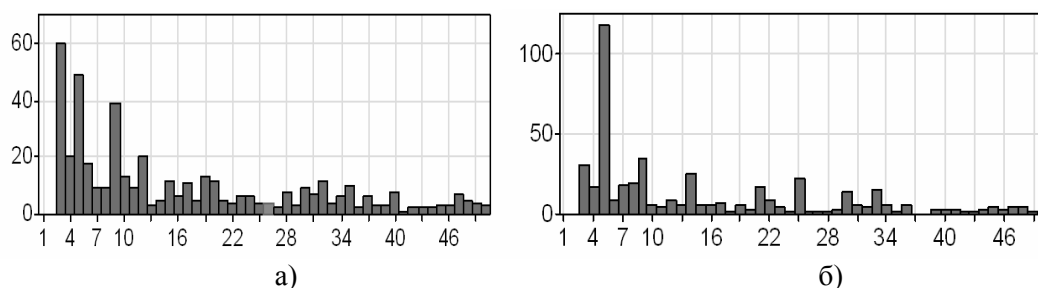


Рис.4 Диаграмма индикатора для: а – метода Уорда, б – метода СОК-Уорда.

Каждый кластер характеризуется определенным соотношением частот. На Рис.5 указан профиль вкладов всех частот (в программе они называются атрибутами) в формирование определенного кластера.

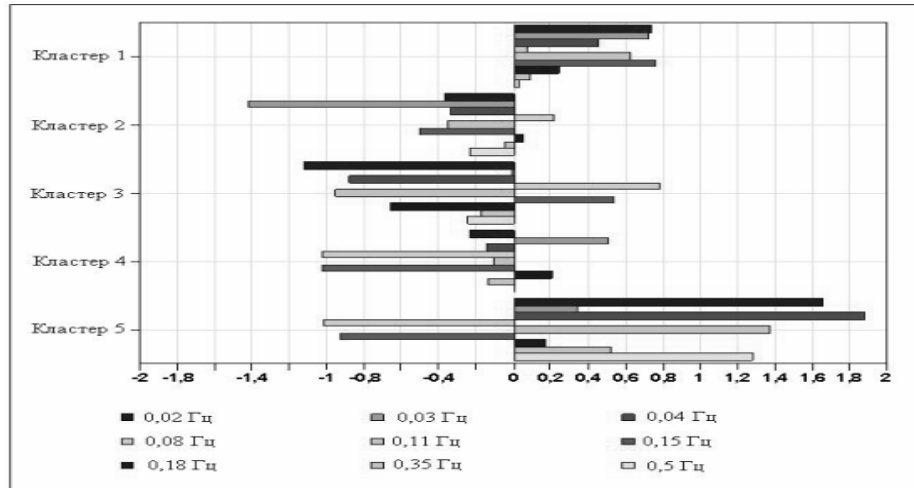


Рис. 5 Профиль вейвлет - частот, определяющих выделенные кластеры.

Были построены самоорганизующиеся карты вейвлет-спектра для теста корректурной пробы Бурдона-Анфимова и тестов оперативной памяти на буквы, цифры, геометрические фигуры с одним и двумя признаками (Рис.6). Для дальнейшего анализа карт были добавлены метки. Метки состоят из буквы, кодирующей тип теста и номера-номера строчки вейвлет-коэффициента в спектральной матрице, соответствующей временному окну шириной 5,7 с.

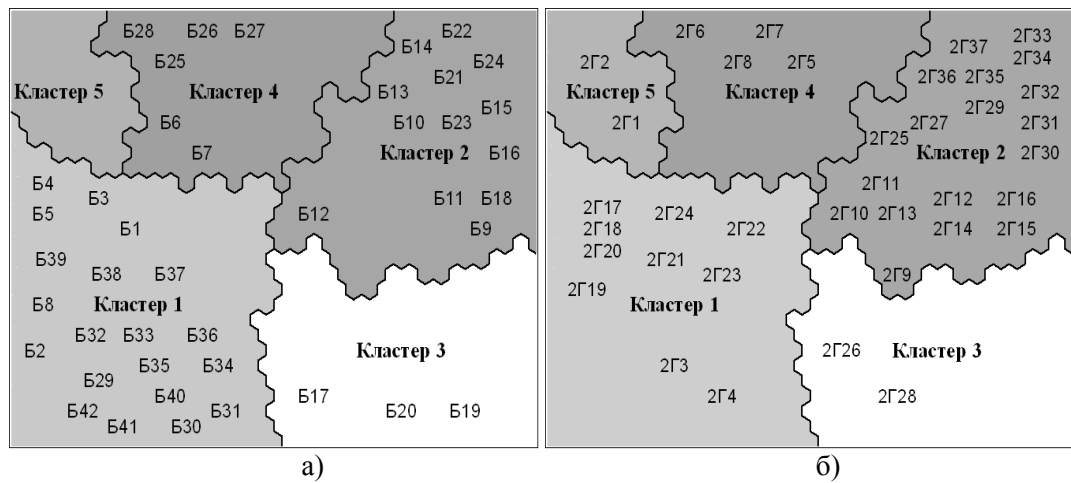


Рис. 6 Пример самоорганизующихся карт вейвлет-спектра для теста оперативной памяти: а – на буквы (тип теста - Б) и б – геометрические фигуры с 2 признаками (тип теста – Г).

В 1-й кластер попали номера вейвлет-коэффициентов, соответствующие началу тестирования уровня внимания, тестам Б, Ц, фазе вработывания при тестировании

Г2 и окончанию тестирования оперативной памяти на буквы. Анализ профилей вейвлет-частот показывает однонаправленный вклад колебаний в VLF- и LF-диапазонах (кроме 0,08 Гц), что, по-видимому, свидетельствует об участии симпатического отдела вегетативной нервной системы и надсегментарных уровней в усилении произвольного внимания и формировании реакции вработывания.

Ко 2-й кластеру были отнесены номера вейвлет-коэффициентов, соответствующие тесту Б на 3 стимула, тесту Ц на 5 стимулов, Г2 – на 3, 6-7 стимула и конечной фазе тестирования уровня внимания. Максимальный вклад в формирование данного кластера внесла частота около 0,03 Гц, что, возможно, обусловлено некоторым гормональным влиянием на частоту кардиоритма.

В 3-й кластер были включены номера вейвлет-коэффициентов, соответствующие тесту Б на 4 стимула, тесту Ц-на 4 и 7 стимулов, тесту Г1 - на 5-7 стимулов, тесту Г2 – на 5 стимулов и середине тестирования уровня внимания. В формировании этого кластера принимали колебания всего частотного диапазона с исключением частот около 0,08 Гц и 0,15 Гц. Этот кластер фактически характеризует некоторый перелом в работе. Не совсем понятна в этом процессе роль частот около 0,08 Гц и 0,15 Гц, которые фактически сформировали 4-й кластер.

4-й кластер состоит из номеров вейвлет-коэффициентов, соответствующие тесту Б на 5 стимулов, тесту Ц – на 6 стимула, Г1-на 4 стимула, Г2 – на конец теста 2 стимулов и начало теста на 3 стимула, и перед переломным моментом в тесте уровня внимания. Можно предположить, что этот кластер объединил состояния сильного напряжения. Роль частот около 0,08 Гц и 0,15 Гц требует дальнейшего исследования и уточнения.

5-й кластер содержит наименьшее количество состояний, которые проявились только на самой начальной стадии тестов Г1, Г2 и теста Ц на 3 стимула. При формировании этого кластера внесли однонаправленный вклад практически все частоты, кроме все тех-же частот около 0,08 Гц и 0,15 Гц. Заметим, что в этом случае максимально проявился вклад частоты около 0,1 Гц. Возможно, этот кластер характеризует адаптацию к обработке невербальной информации.

Следует отметить, что данная система кластеров достаточно адекватно соотносится с типом и уровнем сложности тестовых заданий.

Проведенная кластеризация является примером возможного анализа индивидуальной адаптационной реакции на психофизиологическую нагрузку. Вейвлет-анализ ритмограммы позволяет оценить функциональное состояние организма в динамике. Соотнесение изменения вейвлет-спектра с типом, уровнем сложности тестовых заданий и эффективностью их выполнения позволит получить объективную количественную оценку состояния отдельных звеньев вегетативной регуляции кровообращения.

ВЫВОДЫ

1. На основе вейвлет-анализа кардиоритма можно объективно и количественно оценить вклад отдельных звеньев вегетативной нервной системы в

формирование адаптационной реакции человека на определенную психофизиологическую нагрузку.

2. Вейвлет-анализ кардиоритмы позволяет оценить индивидуальные особенности реакции человека на психофизиологическую нагрузку в динамике, в том числе особенности переходных процессов при изменении типа и сложности стимулов.
3. Метод кластеризации СОК-Уорда позволяет выявить структурные закономерности в динамике вейвлет-спектра, которые отражают изменение функционального состояния организма при изменении типа и уровня сложности тестовых стимулов, предъявляемых для запоминания.

Список литературы

1. Баевский Р.М. Математический анализ изменений сердечного ритма при стрессе / Баевский Р.М., Кириллов О.И., Клецкин С.З. – М.: Наука, 1984. – 221 с.
2. Рабочая группа Европейского кардиологического общества и СевероАмериканского общества стимуляции и электрофизиологии. Вариабельность сердечного ритма. Стандарты измерения, физиологической интерпретации и клинического использования // Вестн. Аритмол. – 1999. – №11. – С. 53–78.
3. Внутренняя синхронизация основных 0.1 частотных ритмов в системе вегетативного управления сердечно-сосудистой системой / А.Р. Киселев, А.Б. Беспятов, О.М. Посненкова [и др.] // Физиология человека. – 2007. – Т.33, №2. – С.69–75.
4. Блаттер К. Вейвлет-анализ. Основы теории / Блаттер К. – М.: Техносфера, 2006. – 272 с.
5. Анализ сигнал-усредненной ЭКГ (по данным вейвлет – преобразования) у здоровых и больных ИБС / С.А. Бойцов, С.Л. Гришаев, В.Н. Солнцев [и др.] // Вестник аритмологии. – 2001. – № 23. – С. 32–36.
6. Wavelet transform as a potential tool for ECG analysis and compression / J.A. Crowe, N.M. Gibson, M.S. Woolfson [et al.] // Journal of the Biomedical Engineering. – May-1992. Vol. 14(3). – P.268–272.
7. Wavelet analysis of high-resolution ECGs in post-infarction patients: role of the basic wavelet and of the analyzed lead / D. Morlet, J.P. Couderc, P. Touboul [et al.] // International Journal Biomedicine Computing. – Jun- 1995. – Vol. 39(3). – P.311–325.
8. Рунова Е.В. Метод временной локализации изменений частотной структуры сердечного ритма, основанный на дискретном вейвлет-преобразовании / Е.В. Рунова, И.В. Мухина // Физиология человека. – 2008. – Т. 34, №2. – С.124–127.
9. Бодин О.И. Особенности анализа электрокардиографической информации с использованием вейвлет – преобразования / О.И. Бодин, И.П. Бурукина // Медицинская техника. – Изд-во Медицина, 2006. – №2. – С. 26–29.
10. Філімонова Н.Б. Особливості обробки зорової вербальної та невербальної інформації в оперативній пам'яті людини / Н.Б. Філімонова, Т.В. Куценко, М.Ю. Макачук // Фізика живого. – 2006. – Т.14. – № 3. – С. 75–86.
11. Забара С.С. Метод виділення інваріантних ознак сигналів / С.С. Забара, Н.Б. Філімонова, К.Х. Зеленський // Доповіді Національної академії наук України. – 2009. – №3. – С. 55–59.
12. Філімонова Н.Б.К кластеризація динаміки ЕКГ людини за нейронною мережею Кохонена та вейвлет-аналізом на основі функцій Кравчука / Н.Б. Філімонова, М.Ю. Макачук, Т.В. Кравець // Вісник Київського університету. Серія Фізіологія. – 2010. – Вип. 12. – С. 14–16
13. Дебок Г. Анализ финансовых данных с помощью самоорганизующихся карт / Г. Дебок, Т. Кохонен – М.: Изд-дом «АЛЬПИНА», 2001. – 317 с.
14. De Boer R.W. On the spectral analysis of blood pressure variability / R.W. De Boer, J.M. Karemaker, J. Stracker // Am. J. Physiol. – 1986. – V.251, N.3. Pt.2. – P. 685.
15. Фоякин А.В. Факторы риска кардиальных осложнений при ишемическом инсульте / А.В. Фоякин, Л.А. Гераскина, Е.В. Самохвалова // Невролог. вестн. – 2007. – № 1. – С. 227–228.
16. Malik M. Components of heart rate variability: what they really mean and what we really measure / M. Malik, A.J. Camm // Am. Heart J. – 1994. – N. 127. – P. 1376–1381.

17. Машин В.А. Анализ variability ритма сердца при негативных функциональных состояниях в ходе сеансов психологической релаксации / В.А. Машин, М.Н. Машина // Физиология человека. – 2000. – Т. 26. № 4. – С. 48–54.
18. Изучение природы периодических колебаний сердечного ритма на основе проб с управляемым дыханием / А.Р. Киселев, В.Ф. Киричук, О.М. Посненкова [и др.] // Физиология человека. – 2005. – Т.31, №3. – С.76–83.
19. Шевченко О.В. Динамика 0,1 гц–компоненты спектра variability сердечного ритма на фоне лечения фозиноприлом и атенололом у больных артериальной гипертонией / О.В. Шевченко, А.Р. Киселев, В.И. Гриднев // Саратовский научно–медицинский журнал. – 2008. – №1 (19) – С.84–87.
20. Чуян О.М. Фізіологічні механізми variability серцевого ритму (огляд літератури) / О.М. Чуян, О.А. Бірюкова, М.Ю. Раваєва // Вчені записки Таврійського національного університету ім. В.І. Вернадського. Серія „Біологія, хімія”. – 2008. – Т. 21 (60). – № 3. – С. 168–189.
21. Высоочастотные колебания в сигнале пульсовой волны и их связь с адаптационными реакциями / Михайлов Н.Ю., Толмачев Г.Н., Шепелев И.Е. [и др.] // Биофизика. – 2008. – Т. 53, Вып.3. – С.482–487.

Філімонова Н.Б. Визначення індивідуальних особливостей динаміки кардіоритму при тестуванні оперативної пам'яті людини / Н.Б. Філімонова, Т.В. Кравец // Вчені записки Таврійського національного університету ім. В.І. Вернадського. Серія „Біологія, хімія”. – 2010. – Т. 23 (62), № 3. – С. 176-187.

Динаміка кардіоритму людини при зміні психофізіологічного навантаження досліджувались методом вейвлет-аналізу на основі функцій Кравчука, що дозволило оцінити індивідуальні особливості реакції людини та внесок окремих гілок вегетативної нервової системи у формування адаптивної реакції на визначене психофізіологічне навантаження. Структурні закономірності в динаміці вейвлет-спектру визначались методом кластеризації СОК-Уорда.

Ключові слова: оперативна пам'ять, вейвлет-аналіз, функції Кравчука, метод кластеризації СОК-Уорда.

Filimonova N.B. Definition of specific features of dynamics of the cardiorhythm at testing the working memory of the person / N.B. Filimonova, T.V. Kravets // Scientific Notes of Taurida V.Vernadsky National University. – Series: Biology, chemistry. – 2010. – Vol. 23 (62), No 3. – P. 176-187.

Dynamics of the cardiorhythm of the person at change of the psychophysiological loads was researched by a method of the wavlet-analysis on the basis of Krawtchouk functions that has allowed estimating the specific features of reaction of the person and the contribution of separate parts of vegetative nervous system to creation of the adaptive reaction on defined psychophysiological load. Structural regularity in dynamics of the wavlet-spectrum were defined by the method SOM-Ward clustering.

Keywords: working memory, wavlet-analysis, Krawtchouk functions, method SOM-Ward clustering.

Поступила в редакцію 17.09.2010 г.