

УДК 612.17+612.821

Особенности реакции вариабельности ритма сердца на эмоционально окрашенные видеоаудиостимулы

Чайковский И. А.¹, Кривова О. А.³, Кальниш В. В.², Козак Л. М.³, Фролов Ю. А.¹, Выровой Ю. С.⁴, Кетько М. А.⁵

¹Институт кибернетики им. В. М. Глушкова НАН Украины, г. Киев, Украина

²ГУ «Институт медицины труда АМН Украины», г. Киев, Украина

³Международный научно-учебный центр информационных технологий и систем НАН Украины и МОН Украины, г. Киев, Украина

⁴Kwendi Impact Studies, г. Киев, Украина

⁵ООО «IMESK», г. Киев, Украина

Резюме. В статье приводятся результаты статистического анализа вариабельности сердечного ритма и показателей эмоционального состояния операторов при просмотре тестовых видеоклипов. Выявлены статистически значимые различия реакции на стимулы разной эмоциональной окраски как во временных, так и в спектральных показателях сердечного ритма в зависимости от типологических особенностей вегетативной нервной системы. С использованием методов многомерного статистического анализа (дисперсионного и линейного дискриминантного) выделены показатели вариабельности ритма сердца, имеющие диагностическую ценность для объективной оценки реакции операторов на эмоционально окрашенные видеоклипы. Предложен интегральный индекс, характеризующий реакцию вариабельности ритма сердца на стимулы различной эмоциональной окраски.

Ключевые слова: вариабельность ритма сердца, аудиовидеостимулы, эмоциональная реакция, многомерный дисперсионный анализ, линейный дискриминантный анализ.

ВВЕДЕНИЕ

Объективная диагностика отклика организма человека-оператора на разнообразные изменения окружающей среды на основании анализа различных физиологических сигналов является интенсивно развивающейся областью научных исследований. Особенно много внимания в последние годы исследователи уделяют эмоциональной сфере. Надо сказать, что до сего времени не существует общепринятого определения понятия «эмоция». Нам наиболее удачным кажется определение эмоции как процесса, отражающего субъективное оценочное отношение к существующим или возможным ситуациям с точки зрения благоприятного (позитивные эмоции) или неблагоприятного (негативные эмоции) влияния этих ситуаций на выживание индивида [1].

Эмоции обладают значительной физиологической составляющей, имеющей своей целью подготовку организма к определенной деятельности. Эта составляющая реализуется главным образом через вегетативную нервную систему. Оценка реакции на стимулы, вызывающие позитивные или негативные эмоции, особенно важна в практике медицины труда, так как позволяет оптимизировать психическую нагрузку, возникающую в процессе трудовой деятельности.

Методы объективной оценки изменений эмоционального состояния можно условно разделить на 2 группы: прямые (связанные непосредственно с

оценкой процессов, происходящих в центральной нервной системе) и косвенные (основанные на оценке деятельности вегетативной нервной системы). К первой группе принадлежат относительно технически сложные – электроэнцефалография, магнитоэнцефалография и функциональная магнито-резонансная терапия. Вторая группа, прежде всего, представлена вариабельностью ритма сердца (ВРС).

Оценка вариабельности ритма сердца широко применяется для оценки функционального состояния в медицине труда и спортивной медицине, а также в клинической кардиологии [2]. Несколько последних десятилетий исследователи пытаются использовать вариабельность ритма сердца в качестве меры реакции на различные раздражители (ментальные, стрессовые, эмоциональные) [3–7]. Собраны доказательства, что сильные эмоции отражаются в паттернах сердечного ритма, при этом положительные и отрицательные эмоции могут оказывать различное влияние на изменчивость ритма сердца [8]. Исследователям удавалось классифицировать основные эмоциональные состояния по показателям вариабельности сердца [9, 10] и по физиологическим переменным [11]. Все же вопрос о наличии однозначного соответствия между изменениями регистрируемых показателей ВРС и различными эмоциональными состояниями до последнего времени остается спорным [12].

Установлено, что некоторые из показателей ВРС могут быть чувствительными индикаторами стрессовых и эмоциональных реакций [13, 14]. Реакция на эмоционально-стрессовый раздражитель является индивидуальной и зависит от возраста, пола, социальных факторов, ментального здоровья [15, 16]. При анализе реакций на групповом уровне не всегда удавалось выявить значимые взаимосвязи между показателями ВРС и эмоциональными реакциями. Результаты, полученные в разных исследованиях при воздействии эмоциональных нагрузок разного рода (аудиальных, визуальных и других тестовых стимулах), варьируются, их трудно сравнивать из-за различия в методиках. Однако в целом несомненно, что существуют убедительные экспериментальные и теоретические доказательства, представленные в обзорах, что показатели ВРС являются объективной мерой способности мозга, центральной нервной системы (ЦНС), автономной нервной системы (АНС) организовать эмоциональную реакцию и маркером индивидуальных различий в способности человека к регулируемым эмоциональным реакциям [17, 18]. Важным является вопрос о характере стимула, вызывающего эмоциональный отклик. В большинстве работ, посвященных этой теме, используется так называемый «self-recall», заключающийся в том, что инструктор просит испытуемого вспомнить и снова мысленно «пережить» какие-либо жизненные ситуации, вызывавшие ранее у испытуемого различные эмоции (страх, разочарование или, напротив, радость, удовлетворение). Такой метод, на наш взгляд, имеет существенные недостатки, поскольку чрезвычайно субъективен, полностью зависит от личного опыта испытуемого, его понимания смысла инструкции и желания сотрудничать.

В то же время имеется несколько обширных баз видеоклипов, представляющих собой эпизоды художественных фильмов. Все эти эпизоды хорошо верифицированы в рамках масштабных психологических исследований с точки зрения характера и интенсивности вызываемых ими эмоций. По нашему мнению, такие стимулы вызывают эмоции более естественным образом, следовательно, они более приближены к характеристикам психической нагрузки, возникающей в реальной жизни, в том числе и в процессе трудовой деятельности. Такие базы видеоклипов использовались в психологических исследо-

Оценка вариабельности ритма сердца широко применяется для оценки функционального состояния в медицине труда и спортивной медицине, а также в клинической кардиологии.

ваниях, например, в работе Gracanin A. с соавторами [19]. Однако исследования, в которых проводился бы анализ эмоций, вызванных подобными стимулами, с помощью не только субъективных оценок, но и объективных изменений, нам не известны.

ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

Целью настоящей работы является разработка метода оценки эмоционального отклика, пригодного для практического использования на рабочем месте, на основе анализа вариабельности ритма сердца; изучение особенностей этого отклика в различных типологических группах, а также анализ взаимосвязи субъективной и объективной составляющих реакции на эмоционально окрашенный видеостимул.

ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Задачами исследования являются:

- 1) отбор информативных показателей ВРС, которые могли бы диагностировать эмоциональную реакцию операторов на видеостимулы;
- 2) выявление степени согласованности изменений субъективной (показатели самооценки) и объективной (показатели ВРС) составляющих реакции под влиянием видеостимулов;
- 3) выявление различий реакции на стимулы в зависимости от ряда факторов: исходного уровня показателей ВРС, пола испытуемых, их психологического профиля;
- 4) конструирование интегрального показателя, объективно отражающего степень отклика на эмоционально окрашенный стимул;
- 5) тестирование разработанного интегрального показателя.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве обучающей выборки были обследованы 29 здоровых добровольцев (средний возраст 27 ± 5 лет, 15 мужчин, 14 женщин), каждому из которых на экране ноутбука последовательно были показаны три аудиовизуальных клипа длительностью 7–8 минут. Использовалась база верифицированных видеоклипов FilmStim [20]. Видеоклипы разного эмоционального воздействия демонстрировались поэтапно в очередности: позитивно, негативно и нейтрально окрашенные. На каждом этапе исследования испытуемые оценивали свое эмоциональное состояние. Для этого использовали тест дифференциальной самооценки функционального состояния САН (самочувствие, активность, настроение), методики «Градусник», «Маски» [21].

На всех этапах регистрировалась ЭКГ в 3-х отведениях с помощью системы Холтеровского мониторинга ECGpro (IMESC, Киев). Анализ ВРС производился с использованием оригинального пакета программ. Рассчитывались статистические характеристики RR-интервалов, спектрального анализа, графа сердечного ритма, нелинейной динамики. Детально методика исследования изложена в наших предыдущих работах [22, 23]. Всего было проанализировано 48 показателей ВРС и 3 показателя самооценки эмоционального состояния.

Кроме того, с целью определения типологических особенностей личности каждому испытуемому перед просмотром видеоклипов было проведено характерологическое тестирование по методике Смирнова «Исследование психологической структуры темперамента», а также анкетирование по методу Шмишека-Леонгарда «Акцентуации характера и темперамента».

Существуют убедительные экспериментальные и теоретические доказательства, представленные в обзорах, что показатели вариабельности ритма сердца являются объективной мерой способности мозга, центральной нервной системы, автономной нервной системы организовать эмоциональную реакцию и маркером индивидуальных различий в способности человека к регулируемым эмоциональным реакциям.

Для тестирования разработанного интегрального показателя использовалась экзаменационная выборка, состоящая из 50 испытуемых (средний возраст 25 ± 4 года, 23 мужчины, 27 женщин).

Задачи исследования определили выбор комплекса методов сравнительного анализа: дисперсионный, дискриминантный, кластерный, корреляционный. Все виды статистического анализа выполнялись с использованием пакета «Statistica 7.0». Во всех процедурах статистического анализа рассчитывался достигнутый уровень значимости (p), при этом критический уровень значимости принимался равным 0,05.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Оценка влияния эмоционально окрашенного видеоклипа на показатели ВРС. Отбор наиболее информативных показателей

1. Дисперсионный анализ

Многомерный дисперсионный анализ позволяет проверить гипотезу о влиянии фактора (в нашем случае – просмотр видеоклипов разной эмоциональной окраски) на измеряемые показатели.

Так как анализируемые показатели отличались размерностью и диапазоном изменений, необходимым шагом многомерного анализа данных является стандартизация массива показателей вычислением z-вклада:

$$z(x_{ij}) = \frac{(x_{ij} - \bar{x}_j)}{S_j},$$

где x_{ij} – массив показателей операторов на всех этапах исследования;

\bar{x}_j – средние значения показателей, S_j – их стандартные отклонения;

j – индекс показателей, $j = 1, 2, \dots, n$; $n = 52$ – количество показателей;

i – индекс зарегистрированных записей операторов; $i = 1, 2, \dots, M$, $M = m \times N$;

$N = 4$ – число этапов исследования; $m = 29$ – количество операторов.

Для проверки необходимого условия корректности применения дисперсионного анализа (нормальность распределения) проводился анализ распределений, поиск выбросов. В нашем случае из дальнейшего анализа был исключен показатель «Маски» как значительно несоответствующий требованиям нормальности.

На следующем шаге сравнивались средние значения показателей выборок массива на разных этапах исследования. Группирующим фактором являются этапы исследования (N), соответствующие исходному состоянию ($N = 0$) и предъявляемым видеоклипам сильной положительной ($N = +$), отрицательной ($N = -$) и нейтральной эмоциональной окраски ($N = _$). Для сравнения средних значений 51-го показателя 4-х выборок, соответствующих этапам исследования, применяли многомерный однофакторный дисперсионный анализ (one-way MANOVA).

Процедура MANOVA предполагает в своем составе проверку другого необходимого условия применимости параметрического дисперсионного анализа – однородность дисперсий переменных. Критерий однородности дисперсии Левена (Levene's test) со значимостью $p > 0,05$ показал, что для большинства показателей дисперсии каждой из выборок не различаются. Для некоторых переменных («Градусник», SI, LF, CC1, Луарипов, LSX, ND) результаты теста Левена ($p < 0,05$) означают неравенство дисперсий. Так как размеры выборок одинаковы и все остальные требования удовлетворяются, по-

следним фактом можно пренебречь. В дальнейшем для уточнения результатов в подобных случаях можно воспользоваться непараметрическими методами сравнения, например, тестами Краскела-Уоллиса, Манна-Уитни.

Результаты однофакторного дисперсионного анализа показали статистически значимое влияние группирующего фактора. Результаты многомерного теста значимости Уилкса (Wilks'λ) по всему набору показателей: $W = 0,086$ при $F = 1,779$, $p = 0,000092$, что означает высокую степень дискриминации между этапами исследования ($W = 1$ – нет различий; $W = 0$ – полная дискриминация). Процедура определения наиболее информативных показателей, которые характеризуют эмоциональное состояние операторов на этапах исследования, состояла в отборе показателей, имеющих статистически значимые различия средних значений на этапах исследования. Межгрупповая изменчивость значимо больше внутригрупповой вариации для показателей САН, «Градусник», HR, Average x, SI, LF, MF. Этот набор показателей обладает высоко значимыми дискриминантными свойствами в отношении этапов исследования ($W = 0,525$, $F = 4,306$, $p = 0,0000$). Отметим, что гипотеза о различии средних для других показателей (Mo , AMo , $SampEn$) верна лишь на уровне статистической тенденции.

2. Оценка степени влияния просмотра видеоклипов на изменчивость показателей

В однофакторном дисперсионном анализе принято оценивать величину влияния фактора на изменчивость анализируемого признака. Рассчитывали показатель силы влияния η^2 (величина эффекта, или R^2 – коэффициент детерминации модели):

$$\eta^2 = R^2 = \frac{SS_B}{SS_T}$$

где SS_B – сумма квадратов отклонений средних в группах от общей средней (межгрупповая дисперсия); SS_T – общая дисперсия.

Коэффициент детерминации показывает, какая доля общей изменчивости зависимой переменной объясняется влиянием фактора, определяет вклад изучаемого фактора в общую изменчивость признака.

Принято классифицировать размер эффекта: малый ($\eta^2 \geq 0,02$); средний ($\eta^2 > 0,058$); значительный ($\eta^2 > 0,138$) и большой ($\eta^2 \geq 0,26$), когда доля дисперсии, обусловленной фактором, составляет более 26 % [24].

В таблице 1 представлены значения частных коэффициентов детерминации R_j^2 (эффектов η_j^2) для каждого из шести показателей.

Таблица 1
Оценка влияния фактора на показатели

Показатели	$R^2 (\eta^2)$	скор. R^2	F	p
CAH	0,214249	0,193202	10,17962	0,000006
«Градусник»	0,306209	0,287626	16,47733	0,000000
Average x	0,082599	0,058026	3,36134	0,021313
SI	0,075040	0,050264	3,02877	0,032435
LF	0,079820	0,055173	3,23845	0,024891
MF	0,081814	0,057220	3,32656	0,022270

Как видим, тестовые воздействия (видеоклипы) более всего повлияли на показатели самооценки: «Градусник» (влиянием фактора объясняется 30,6 % дисперсии) и САН (21,4 %). Для каждого из показателей ВСП (Average x, SI, LF, MF) величина эффекта влияния оценивается как средняя. Изменения каждого из этих показателей ВСП под воздействием просмотра видеоклипов сопоставимы по величине, а суммарный эффект влияния просмотра видеоклипов на показатели ВСП можно оценить как значительный (более 20 %).

3. Апостериорные множественные сравнения

Для детализации выявленных общих различий в средних значениях показателей на всех этапах исследования необходимо провести апостериорный анализ, который дает возможность выяснить, на каких именно этапах и какие показатели отличаются.

Проводилось сравнение средних значений каждого из набора шести информативных показателей по вариантам парного сопоставления этапов исследования.

При апостериорном парном сравнении данных применяли набор критериев: наименьшей значимой разности (Fisher LSD test), Бонферрони, Шеффе, Тьюки, Ньюмена-Кейлса, ранговый критерий Дункана.

Установлено, что по всем критериям существуют высоко значимые различия показателя САН между этапом «отрицательный видеоклип» и всеми другими этапами. Среднее значение этого показателя значимо ниже при отрицательном стимуле, чем при положительном видеоклипе. В исходном состоянии и при нейтральном стимуле уровни САН не отличаются.

Парные сравнения средних значений показателя самооценки «Градусник» (тесты Ньюмена-Кейлса, Дункана) свидетельствуют о значимых различиях на всех этапах, за исключением исходного состояния и при нейтральном стимуле.

Показатель Average x (среднее значение RR-интервалов, как и обратная величина HR – частота пульса) высоко значимо отличается между парами: с одной стороны – исходное состояние, с другой – сильно эмоционально окрашенные видеоклипы (тесты «Наименьшая значимая разность», Бонферрони, Тьюки, Ньюмена-Кейлса, Дункана). Недостоверны различия пар: «положительный видеоклип – отрицательный видеоклип», «исходное состояние – нейтральный видеоклип».

Для показателя SI значимы различия между парой «исходное состояние – положительный стимул» (выше при положительном стимуле), а по тесту наименьшая значимая разность между парой «исходное состояние – отрицательный стимул».

В соответствии с критериями Тьюки, Ньюмена-Кейлса среднее значение показателя LF (мощность колебаний спектра в длинном диапазоне) значимо выше при положительном стимуле, чем в исходном состоянии и при просмотре нейтрального видеоклипа.

Средние значения показателя MF (мощность спектра в среднем диапазоне) на всех этапах исследования высоко значимо отличаются от среднего в исходном состоянии (критерии Тьюки, Ньюмена-Кейлса). Не достоверны различия между средними значениями MF при отрицательном и положительном стимулах.

В таблице 2 приведены средние значения и стандартные отклонения показателей самооценки и ВРС, значимо отличающихся на этапах исследования.

На рисунках 1–2 представлены графические результаты однофакторного дисперсионного анализа – средние значения информативных показателей на разных этапах исследования.

Таблица 2
Средние и стандартные отклонения информативных показателей в исходном состоянии и при предъявлении видеостимулов

Показатели (среднее ± стандартное отклонение)	Этапы исследования			
	0	1	2	3
	Исходное состояние (0)	Положительный видеокалип (+)	Отрицательный видеокалип (-)	Нейтральный видеокалип (-)
CAH	5,38 ± 0,73	5,41 ± 0,9	4,37 ± 1,1	5,43 ± 0,6
«Градусник»	43,7 ± 16,23	32,7 ± 14,05	62,9 ± 22,2	43,0 ± 12,58
HR	83,62 ± 10,7	75,7 ± 8,6	76,4 ± 9,3	79,7 ± 10,2
Average x	0,743 ± 0,09	0,809 ± 0,09	0,804 ± 0,103	0,770 ± 0,104
SI	120,0 ± 102,8	67,1 ± 56,1	74,5 ± 54,48	97,0 ± 71,9
LF	1256,1 ± 766,3	2127,9 ± 1620,4	1702,7 ± 1436,1	1278,2 ± 906,3
MF	0,061 ± 0,03	0,043 ± 0,021	0,041 ± 0,023	0,046 ± 0,019

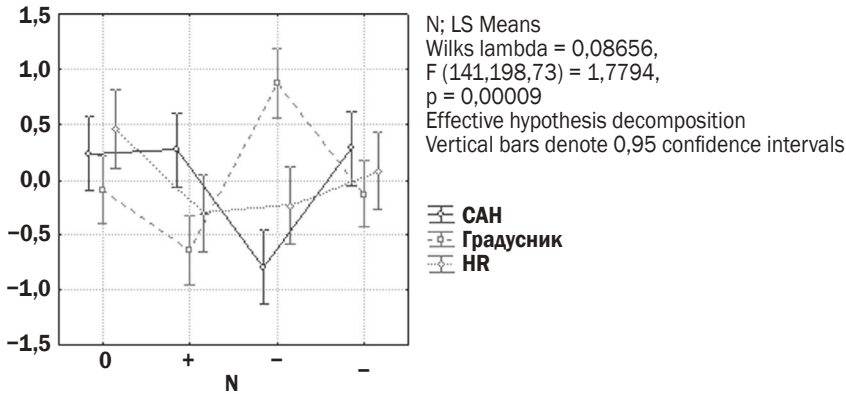


Рисунок 1
Графики дисперсионного анализа показателей самооценки эмоционального состояния (CAH, «Градусник») и частоты сердечных сокращений (HR)

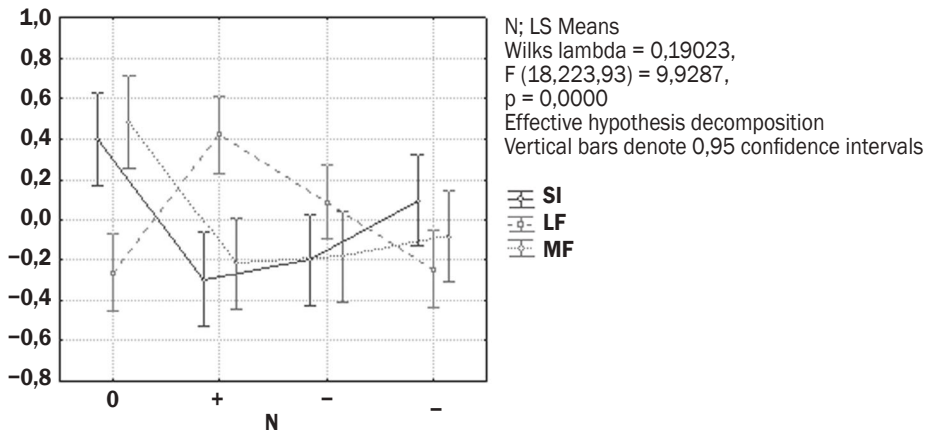


Рисунок 2
Изменения средних значений показателей SI, LF, MF в ходе исследования

Показатель САН, представляющий собой суммарную оценку самочувствия, активности и настроения, при отрицательном видеоклипе значительно меньше, чем на всех других этапах. Уровень показателя самооценки «Градусник» при просмотре положительного видеоклипа ниже, чем при отрицательном видеостимуле. Необходимо отметить, что шкала теста «Градусник» устроена так, что увеличению абсолютного значения этого показателя соответствует большая выраженность соответствующего эмоционального состояния.

Таким образом, показатели самооценки эмоционального состояния хорошо различают субъективную реакцию операторов на тестовые положительный и отрицательный видеоклипы. Недостоверны различия самооценок в исходном состоянии и при нейтральном видеоклипе.

Информативными для выявления объективной реакции операторов на видеостимулы различной эмоциональной окраски являются изменения показателей ВРС: среднее значение длительности RR-интервалов (частота сердечных сокращений (ЧСС)), индекс напряжения SI, мощность спектра в длинном диапазоне LF, мощность спектра в среднем диапазоне MF. Реакция на видеостимулы сильной (положительной и отрицательной) окраски проявляется в увеличении среднего значения RR-интервалов, снижении индекса напряжения, уменьшении мощности спектра в среднем диапазоне и увеличении мощности спектра в длинном диапазоне (см. рисунок 2). Отметим, что сдвиги показателей ВРС более выражены при просмотре положительного видеоклипа.

Информативными для выявления объективной реакции операторов на видеостимулы различной эмоциональной окраски являются изменения показателей ВРС: среднее значение длительности RR-интервалов (частота сердечных сокращений), индекс напряжения SI, мощность спектра в длинном диапазоне LF, мощность спектра в среднем диапазоне MF.

4. Дисперсионный анализ, непараметрические тесты

Проводился уточняющий анализ различий переменных «Градусник» и SI, для которых нарушено условие однородности групповых дисперсий. Применялись непараметрические тесты сравнения.

Результат теста Краскела-Уоллиса – $H(3, N = 116) = 36,919$; $p = 0,0000$ – для показателя «Градусник» подтверждает ранее сделанный вывод о различиях «Градусник» на всех этапах, кроме этапов исходного состояния – нейтральный видеоклип.

Для проверки различий между парами выборок (этапами исследования) использовали как критерий тест Манна-Уитни для показателей «Градусник», SI. Отметим, что результаты этого теста также подтверждают достоверное уменьшение степени напряжения (SI) при просмотре положительного видеоклипа ($U = 271$, $p = 0,019$), подтвердились также выводы по показателю самооценки «Градусник».

5. Двухфакторный дисперсионный анализ с учетом индивидуальных различий

Источником общей изменчивости является вариабельность показателей каждого из операторов на разных этапах исследования. Поэтому необходимо исследовать отдельное влияние этих двух факторов: индивидуального и фактора стимулов.

Проверялась гипотеза о различиях средних по двум группирующим факторам (первый N – этапы исследования, второй Nom – идентификатор операторов) при помощи двухфакторного дисперсионного анализа в предположении независимости факторов.

В таблице 3 представлены основные результаты двухфакторного дисперсионного анализа информативных показателей. Установлено, что вариативность,

обусловленная фактором предъявления видеоклипов, и индивидуальные различия между испытуемыми являются более выраженными, чем случайные различия. Кроме того, различия средних значений шести информативных показателей по группирующему фактору Nom больше ($W_{Nom} = 0,0020$, $p < 0,00$), чем различие по фактору N ($W_N = 0,149$, $p < 0,00$). Влияние фактора «просмотр видеоклипов» на изменчивость информативных показателей составляет 44 % от общей дисперсии ($\eta_{N^2} = 0,44$). Эффект индивидуальных различий составляет 65 % вариабельности, обусловленной неучтенными факторами ($\eta_{N^2} = 0,65$). Иными словами, средние значения индивидуальных показателей больше отличаются между собой, чем средние значения всей группы операторов на разных этапах исследования.

Таблица 3
Результат двухфакторного (этапы, операторы) многомерного дисперсионного анализа

Фактор	Тест	Значение	Критерий Фишера F	Число степеней свободы фактора Effect df	Степень свободы ошибки Error df	Значимость p
N	Wilks	0,1902	9,9286	18	223,93	0,000000
Nom	Wilks	0,0020	5,2536	168	473,07	0,000000

На рисунках 3–4 представлены графические результаты двухфакторного дисперсионного анализа. На рисунке 3 приведены средние значения RR-интервалов для каждого оператора на протяжении всего исследования, а на рисунке 4 – среднегрупповые значения RR-интервалов на каждом этапе исследования.

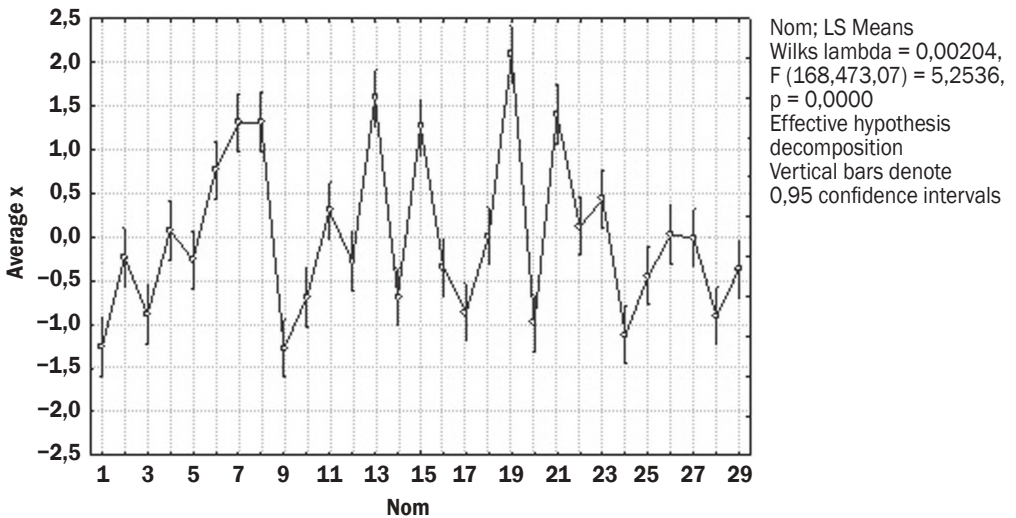


Рисунок 3
Графики средних значений RR-интервалов (Average x) на протяжении исследования

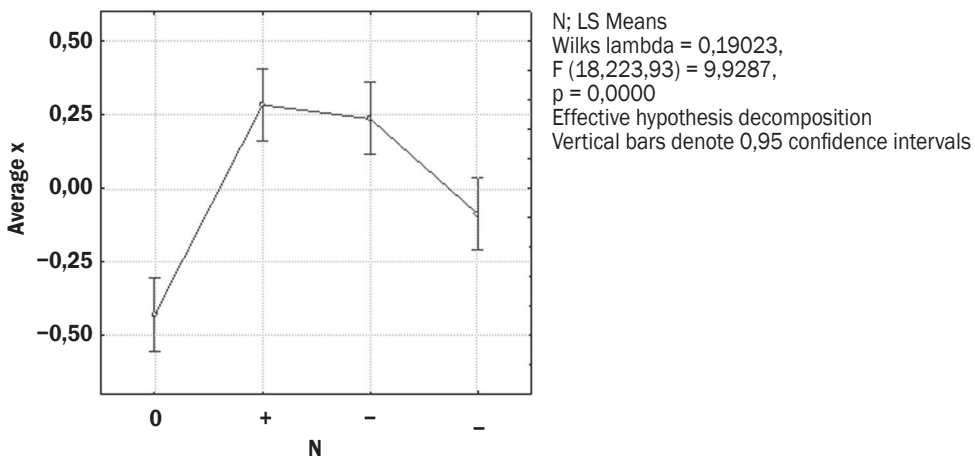


Рисунок 4
Изменение средних значений RR-интервалов (Average x) группы из 29 операторов на этапах исследования

Из графика на рисунке 3 видно, что индивидуальные средние значения RR-интервалов операторов значительно отличаются. Выявлено значимое различие средних значений Average x между этапами исследования. Сравнивая графики на рисунках 3 и 4, также приходим к выводу, что различия в средних значениях RR-интервалов между некоторыми операторами больше, чем разница среднегрупповых значений этого показателя между этапами исследования.

Подобный вывод следует и по ряду других показателей ВРС, кроме 4-х указанных, что свидетельствует о неоднородности исследованной группы. Есть все основания провести кластерный анализ данных в исходном состоянии, чтобы выделить типологические группы операторов.

6. Дискриминантный анализ

Как известно, целью дискриминантного анализа является принятие решения о том, какие переменные разделяют (то есть «дискриминируют») анализируемые наборы данных (так называемые «группы»).

Проводился пошаговый дискриминантный анализ всего набора показателей на всех этапах исследования. Группирующая переменная – этапы исследования (N). Предварительно показатели стандартизировались по каждому испытуемому. Условием отбора было $F > 2,5$; $p < 0,05$. В результате отобрано набор из 11 показателей: CAH, «Градусник», Average x, RMSSD, PNN50, SI, LF, SampEn, LSY, ND, F3n. В таблице 4 представлена матрица классификации состояний операторов в ходе исследования, где для каждого этапа указаны: процент правильно классифицированных наблюдений, число наблюдений.

На рисунке 5 представлена скатерограмма значений канонических дискриминантных функций для каждого испытуемого. Метками обозначены группы, соответствующие разным состояниям операторов или этапам исследования. Как видно из рисунка, все 4 состояния достаточно хорошо раз-

деляются, особенно велико расстояние между исходным состоянием и состоянием при просмотре отрицательного видеоклипа, немного меньше между исходным состоянием и состоянием при просмотре положительного видеоклипа.

Таблица 4
Матрица классификации при использовании показатели самооценки и показатели ВСП

Этапы исследования	% правильной классификации	0 (исходное состояние)	+ (положительный видеоклип)	- (отрицательный видеоклип)	- (нейтральный видеоклип)
0 (исходное состояние)	96,55173	28	1	0	0
+ (положительный видеоклип)	96,55173	0	28	1	0
- (отрицательный видеоклип)	96,55173	0	1	28	0
- (нейтральный видеоклип)	93,10345	1	1	0	27
Всего	95,68965	29	31	29	27

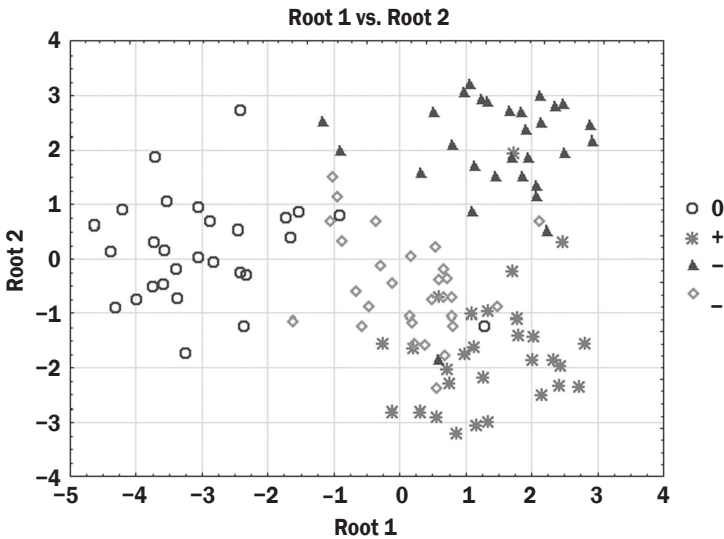


Рисунок 5
Скатерограмма значений канонических дискриминантных функций для каждого испытуемого на всех этапах исследования (Average x)

Если из набора 11 показателей исключить субъективные показатели самооценки эмоционального состояния САИ и «Градусник», то результаты классификации этапов исследования несколько ухудшаются, но по-прежнему остаются высокими (таблица 5).

Таблица 5
Матрица классификации при использовании 9 показателей ВРС

Этапы исследования	% правильной классификации	0 (исходное состояние)	+ (положительный видеоклип)	- (отрицательный видеоклип)	- (нейтральный видеоклип)
0 (исходное состояние)	93,10345	27	0	1	1
+ (положительный видеоклип)	82,75862	0	24	5	0
- (отрицательный видеоклип)	62,06897	0	7	18	4
- (нейтральный видеоклип)	82,75862	0	0	5	24
Всего	80,17241	27	31	29	29

Интересно отметить, что дискриминантный анализ, проведенный при использовании только 2-х показателей самооценки (САН и «Градусник»), показал правильную классификацию: для положительного стимула в 82,7 % случаев, отрицательного – 86,2 %, а для исходного состояния и при просмотре нейтрального видеоклипа точность классификации оказалась низкой (27,5 % и 59,5 % соответственно).

Анализ особенностей реакции на видеостимулы в типологических группах. Кластерный анализ

Задача выделения среди операторов типологических групп решалась с применением кластерного анализа. Методами Уорда и k-средних выделено два кластера, отличающиеся показателями самооценки и показателями ВРС в исходном состоянии.

Кластер 1 (9 операторов) характеризуется учащенным пульсом, короткими значениями RR-интервалов и моды (M_0), высокими значениями AM_0 , большим индексом напряжения SI, меньшей мощностью спектра в длинном диапазоне LF и большей в среднем MF, а также малым RMSSD (среднеквадратическая разность последовательных кардиоинтервалов), повышенным отношением LF/HF, что свидетельствует о преобладании симпатического тонуса ВНС [3]. В кластере 2 (20 человек) показатели ВРС близки к средним значениям по всей группе; по-видимому, операторов этого кластера можно отнести к смешанному (нормотоническому и ваготоническому) типу регуляции. Отметим, что существует различие между кластерами по показателю самооценки САН, а именно: в исходном состоянии самочувствие, активность и настроение были выше у «нормотоников» по сравнению с самооценкой группы «симпатикотонический тип».

Проанализируем реакцию на видеостимулы различной эмоциональной окраски в двух типологических группах операторов (кластер 1 – «симпатотоники», кластер 2 – «смешанный тип»). Для этого используем двухфакторный дисперсионный анализ (Factorial ANOVA). Первый фактор – этапы исследования N (0, +, -, _), второй – кластеры CL («симпатотоники», «смешанный тип»).

В таблице 6 представлен основной результат анализа взаимодействия факторов. Уровни средних значений показателей достоверно отличаются как на разных этапах исследования, так и в кластерах, кроме того, существуют значимые различия между кластерами и этапами ($p = 0,006288$).

Таблица 6
Результат двухфакторного (этапы, кластеры) дисперсионного анализа

Фактор	Тест	Значение	Критерий Фишера F	Число степеней свободы фактора Effect df	Степень свободы ошибки Error df	Значимость p
Постоянные модели	Wilks	0,841610	3,23075	6	103,00	0,005990
N	Wilks	0,464039	5,05598	18	291,81	0,000000
CL	Wilks	0,433264	22,45503	6	103,00	0,000000
N*CL	Wilks	0,709328	2,09300	18	291,81	0,006288

Отметим, что субъективные реакции (показатели самооценки) в кластерах значительно отличаются (рисунок 6). Кроме того, существует эффект взаимодействия фактора «тип кластера» (CL) и фактора «видеостимул» (N). Взаимодействие двух факторов означает, что влияние одного из них проявляется по-разному на разных уровнях другого фактора. В типологических группах по-разному оценивают свою реакцию на видеоклипы противоположной эмоциональной окраски. Реакция «симпатотоников» на отрицательный видеоклип (показатели самооценки САИ и «Градусник») больше, чем при просмотре положительного видеоклипа. При просмотре видеоклипа положительной окраски в кластере «смешанный тип» изменение показателя самооценки «Градусник» больше, чем в кластере «симпатотоники». Отличаются кластеры и диапазонами самооценок. Разброс показателей самооценки для группы «смешанный тип» меньше, чем у «симпатотоников».

Субъективные реакции (показатели самооценки) в кластерах значительно отличаются.

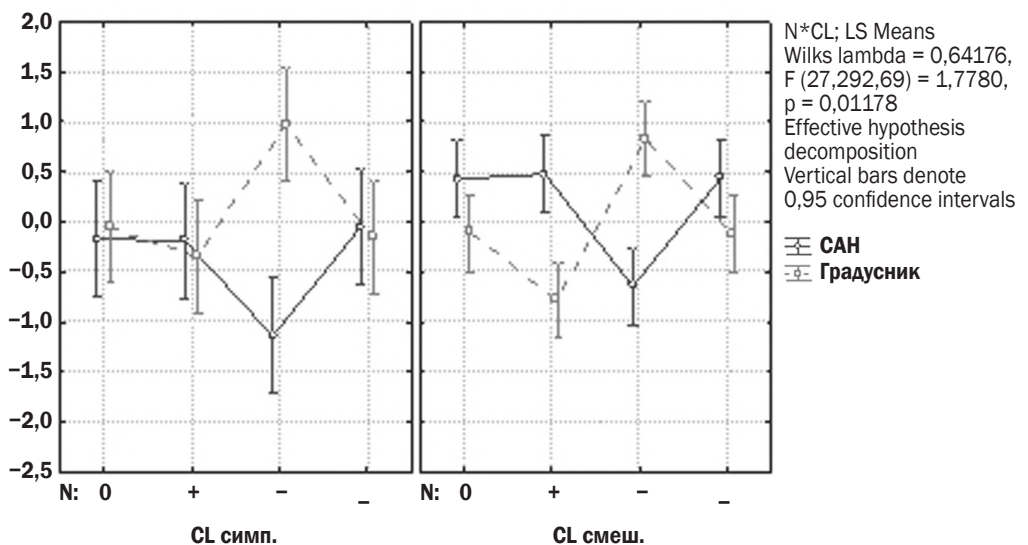


Рисунок 6
Показатели самооценки в кластерах «симпатотоники» и «смешанный тип» на разных этапах исследования

В то же время результаты двухфакторного дисперсионного анализа (ДА) показали отсутствие значимого взаимодействия эффектов (стимул, тип регуляции) для таких показателей, как среднее RR-интервалов (рисунок 7) и индекс напряжения. Действие факторов (этапы исследования, тип регуляции) однонаправленное, но в кластере «симпатотоники» реакция на видеоклипы более выражена, чем в кластере «смешанный тип». В каждом из кластеров она проявляется увеличением среднего значения RR-интервалов (снижением ЧСС) и снижением индекса напряжения. В кластере 1 («симпатотоники») с высоким исходным индексом напряжения при просмотре видеоклипов индекс напряжения SI снижается. В кластере 2 («смешанный тип») степень напряжения гораздо ниже, а также нет ее значимых изменений на видеостимулы.

На рисунке 8 представлены графики изменения показателей мощности спектра в среднем MF и длинном диапазонах LF в двух кластерах. На всех этапах исследования в кластере 1 («симпатотоники») мощность спектра в среднем диапазоне MF значимо выше, чем в кластере 2 («смешанный тип»).

По влиянию на показатель MF (мощность спектра в среднем диапазоне) существует порядковое взаимодействие факторов «тип регуляции» и «видеостимул» (отрицательный). В кластере «смешанный тип» изменения MF на этапах просмотра клипов с разной эмоциональной окраской отличны от кластера «симпатотоники». А именно: в кластере «симпатотоники» при отрицательном видеоклипе мощность спектра в среднем диапазоне (MF) снижается больше, чем при положительном видеоклипе. У операторов со смешанным типом регуляции MF незначительно уменьшается при просмотре положительного клипа.

На всех этапах исследования в кластере «симпатотоники» мощность спектра в длинном диапазоне (LF) значимо меньше, чем в кластере «смешанный тип». В обоих кластерах на этапах просмотра видеоклипов происходят однонаправленные изменения показателя LF, но при просмотре видеоклипа с положительной эмоциональной окраской мощность спектра в длинном диапазоне увеличивается больше, чем при показе отрицательного.

Проводилось уточнение достоверности различий уровней показателей каждого из кластеров на разных этапах исследования. В кластере «смешанный тип регуляции» есть значимые различия: уровней LF – в исходном состоянии и при положительном стимуле, а также между этапами просмотр положительного и нейтрального клипов (тест Fisher LSD). Показатель MF значимо отличается при положительном стимуле от значений в исходном состоянии.

В кластере «симпатотоники» значимы различия уровней Average x, Mo, SI, MF между исходным состоянием и другими этапами исследования (тест наименьшей значимой разности). По уровням показателей AMO и LF значимы различия между исходным состоянием и на этапе просмотра положительного видеостимула.

Затем исследовалось влияние таких факторов, как пол и психологический профиль. По признаку «пол» обнаружены статистически значимые различия в уровнях показателей LF, RAF, MF, которые выше у мужчин, а ND, NDS значимо выше у женщин. Кроме того, индекс напряжения SI у мужчин на этапах обследования менялся более резко, чем у женщин.

По результатам психологического тестирования были выделены следующие подгруппы: сангвиники – 6 человек, холерики – 9, флегматики – 10, ме-

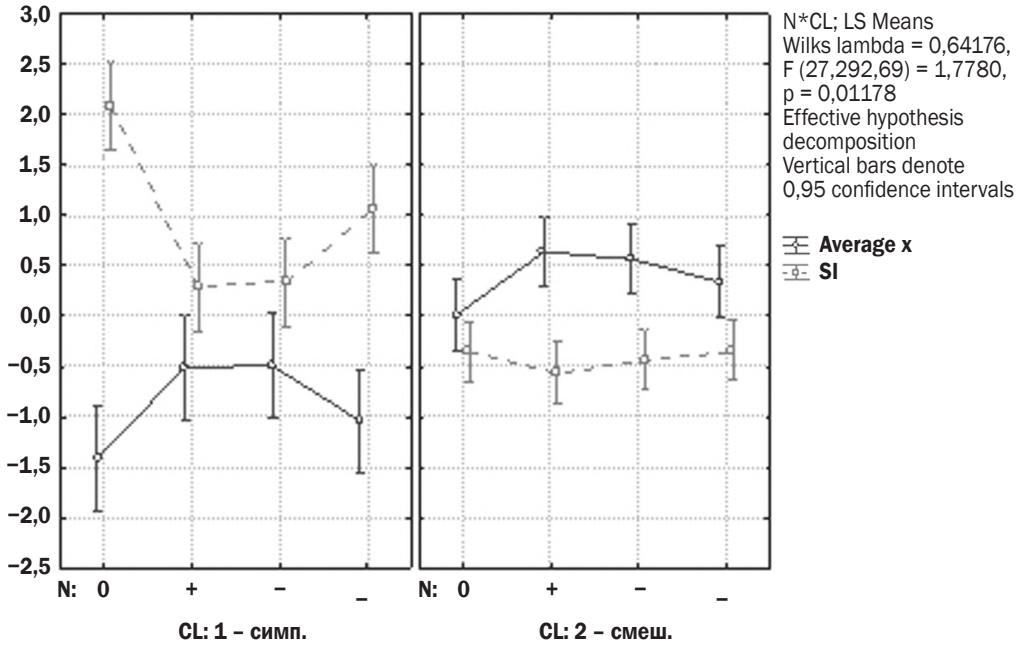


Рисунок 7
Средние значения RR-интервалов и индекса напряжения на этапах исследования в кластерах

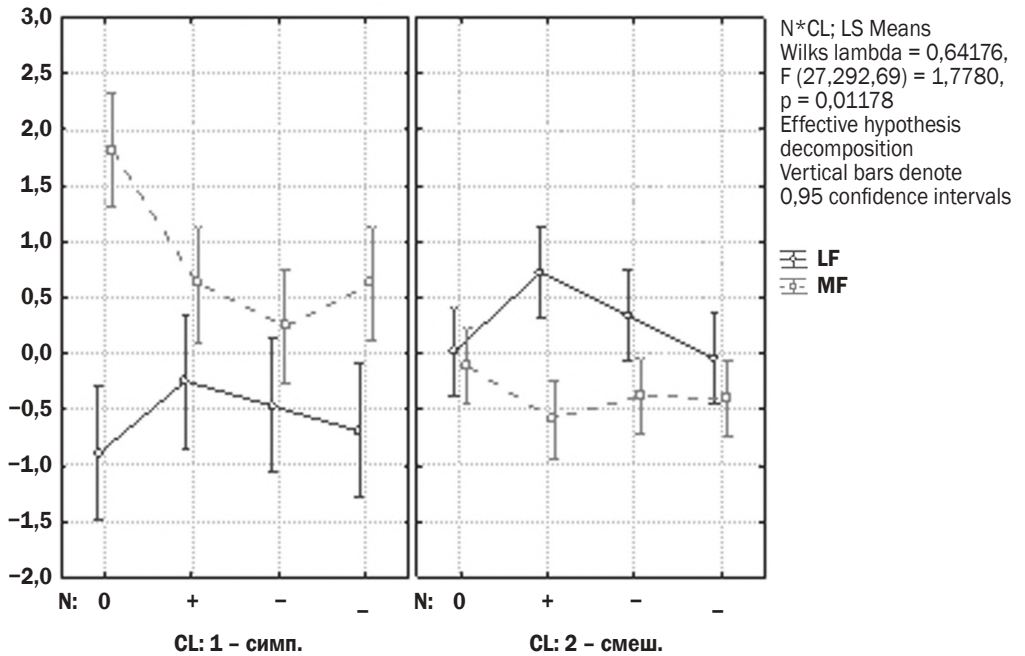


Рисунок 8
Изменение мощности спектра в диапазонах MF и LF в группах «симпатотоники» (слева) и «смешанный тип» (справа)

ланхолики – 4. Отметим, что не наблюдалось однозначного соответствия между типом вегетативной регуляции и типом темперамента. Для оценки межгрупповых различий малых групп использовались непараметрические тесты: критерий Крускала-Уоллиса для множественных сравнений, а для парных сравнений – критерий Манна-Уитни. В группах с разными типами темперамента различаются показатели самооценки эмоционального состояния, особенно значительными эти различия были между меланхоликами и холериками. Кроме того, эти два типа достоверно отличались по показателям SI, Emotion, LF ($H = 11,5$, $p = 0,0007$). У холериков в исходном состоянии меньше степень напряжения SI, а показатели LF, Emotion и TP выше, чем у меланхоликов. Особенность реакции меланхоликов состояла в значительном снижении степени напряжения SI даже на отрицательный стимул по сравнению с исходным состоянием.

Выборка была разделена также на две группы, имеющие значимые различия по профилю акцентуаций. Группа с выраженной эмоциональной лабильностью значительно отличалась показателями самооценки на всех этапах исследования, а также увеличением мощности MF на этапе просмотра отрицательного видеоклипа.

Анализ взаимосвязи субъективной и объективной составляющих реакции на эмоционально окрашенный видеостимул. Корреляционный анализ

Для выявления взаимосвязей между показателями, характеризующими объективную и субъективную компоненту отклика на видеостимулы, применялся корреляционный анализ. Рассчитывали парные коэффициенты корреляции Пирсона, а также коэффициенты ранговой корреляции между показателями субъективной оценки (CAH, «Градусник») и показателями ВРС (Average x, M_0 , AM_0 , LF, MF, SI, SampEn).

Процедуры поиска корреляционных связей применяли к массиву выявленных информационных показателей на всех этапах исследования. Выявлена слабая отрицательная зависимость между показателем самооценки эмоционального состояния CAH и мощностью спектра в среднем диапазоне MF ($r = -0,191$, $p < 0,04$). Расчеты коэффициентов ранговой корреляции Спирмена, статистик Гамма и Кендала показали наличие слабой положительной взаимосвязи показателя CAH и длинночастотного компонента спектра LF ($R_s = 0,235$, $p < 0,05$).

Проводилось уточнение взаимосвязей показателей самооценки эмоционального состояния с информативными показателями ВРС при предъявлении тестовых стимулов разного эмоционального воздействия.

На этапе демонстрации положительно эмоционально окрашенного видеоклипа между объективной и субъективной составляющей реакции выявлена слабая положительная зависимость между показателями CAH и LF ($r = 0,37$, $p < 0,05$) и отрицательная взаимосвязь показателей CAH и MF ($r = -0,43$, $p < 0,05$). Ранговые тесты Спирмена, Гамма и Кендала подтвердили наличие значимых взаимосвязей между показателем CAH и LF ($R_s = 0,49$), также как CAH и SI ($R_s = -0,336$); CAH и AM_0 ($R_s = -0,336$, $p < 0,05$). Показатель самооценки «Градусник» коррелирует с показателями SI ($R_s = 0,336$), AM_0 ($R_s = 0,418$).

На этапе просмотра отрицательного видеоклипа значимых взаимосвязей между показателями самооценки и показателями ВРС не выявлено.

При просмотре нейтрально окрашенного видеоклипа наблюдается отрицательная зависимость между показателями САИ и MF ($r = -0,49$, $p < 0,05$) и положительная взаимосвязь между показателями САИ и SampEn ($r = 0,49$, $p < 0,05$).

Конструирование интегрального показателя

Как уже было сказано, главным заданием настоящего исследования является разработка метода оценки эмоционального отклика, пригодного для практического использования. Эта задача неизбежно требует создания интегрального показателя (иными словами – композитного индекса), поскольку изменения отдельных показателей ВРС отражают лишь частные аспекты исследуемого феномена, кроме того, они могут быть разнонаправленными. Следовательно, для того, чтобы сделать определенный вывод относительно силы эмоционального отклика на стимул, необходим обобщающий индекс, синтезирующий в себе эффект отдельных составляющих. Методика расчета такого индекса может быть разной, однако в любом случае должна включать в себя такие последовательные шаги, как теоретическое обоснование композитного индекса для решения конкретной задачи, отбор адекватных поставленной задаче данных, анализ этих данных (включая их нормализацию) методами мультивариантной статистики, отбор информативных частных показателей (включая отбраковку коррелированных показателей), собственно конструирование композитного индекса путем агрегации частных показателей. Как было показано выше, нами были проделаны все эти шаги. Для конструирования композитного индекса мы использовали дискриминантный анализ.

Этот индекс рассчитывается как значение дискриминантной функции для параметров ВРС согласно выражению:

$$F = \sum_{N=1}^{10} A_N \frac{X_N}{X_{N\text{AVE}}},$$

где A_N – коэффициенты дискриминантной функции, вычисленные на основе анализа данных описанной выше учебной группы; X_N – текущее значение информативного показателя ВРС для исследуемого лица, рассчитанное как среднее арифметическое в скользящем временном окне во время просмотра видеоролика; $X_{N\text{AVE}}$ – среднее значение параметра, полученное как среднее арифметическое в течение всего времени измерения в исходном состоянии.

Вывод об отсутствии или наличии эмоционального отклика при просмотре видеоклипа делается на основании значения дискриминантной функции F в исходном состоянии и во время просмотра. Если значение F больше нуля, то эмоциональный отклик имеет место, причем величина F пропорциональна выраженности реакции. При этом нужно заметить, что в исходном состоянии функция F должна быть меньше или равна нулю.

Таким образом, предлагаемый способ основан на сравнении знака и величины дискриминантной функции в двух последовательных состояниях – покой и просмотр эмоционально окрашенного видеоролика. Он позволяет объективно выявить наличие у испытуемого эмоционального отклика. При наличии такого отклика данный способ позволяет количественно оценить силу реакции (рисунок 9).

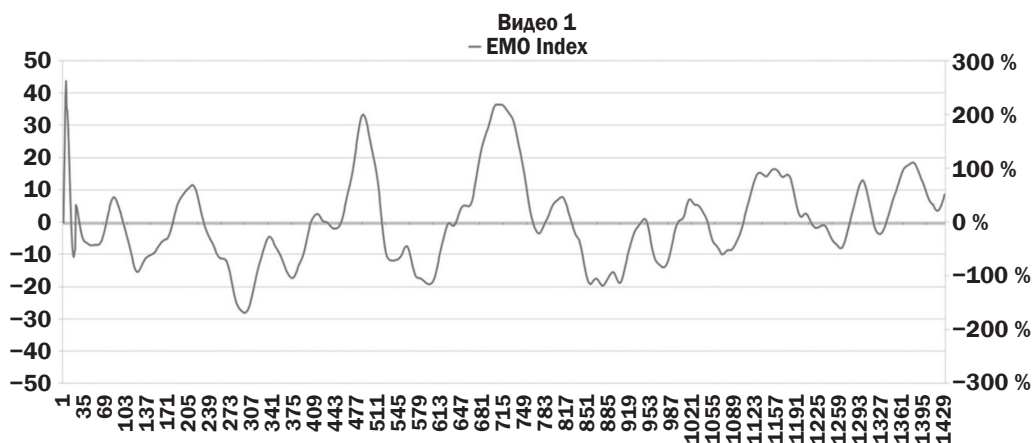


Рисунок 9
Динамика значения дискриминантной функции F во время просмотра эмоционально окрашенного видеоролика

Тестирование чувствительности интегрального показателя

Заключительный этап конструирования композитного индекса – это оценка его чувствительности [25]. В данном контексте под чувствительностью мы понимаем регистрацию превышающего ноль значения дискриминантной функции F в ответ на верифицированный в масштабном психологическом исследовании стимул. В нашем случае таким стимулом должны были быть видеоклипы с доказанной способностью вызывать те или иные эмоции. Для решения этой задачи нами использовались данные известного исследования Shaefer et al. [26]. В этом исследовании принимали участие 364 человека, которым в течение нескольких недель предъявлялись эпизоды из 70 предварительно отобранных кинокритиками художественных фильмов. Все испытуемые с помощью нескольких различных анкетных методик самооценки описывали характер и силу эмоций, которые вызывает каждый из этих эпизодов. В частности, использовалась так называемая шкала дифференциации эмоций (Differential Emotions Scale (DES)) [27], которая содержит 20 групп прилагательных, характеризующих соответствующее количество эмоций. Кроме того, давалась возможность оценить интенсивность каждой из эмоций по семибальной шкале – от 1 (эмоция полностью отсутствует) до 7 (очень интенсивная эмоция). Затем результаты для каждого видеоклипа усреднялись по всей группе обследованных. Таким образом, в результате каждый из предлагаемых видеоклипов был всесторонне охарактеризован с точки зрения спектра эмоций, который этот видеоклип вызывает в представительной выборке, а также с точки зрения интенсивности этих эмоций.

С целью тестирования разработанного нами композитного индекса по описанной в разделе «Материалы и методы» методике было обследовано 50 здоровых добровольцев (средний возраст – 32 года, мужчины/женщины – 50/50). В качестве тестируемых видеоклипов использовались эпизоды из 10 фильмов, участвовавших в исследовании [26], то есть для этих клипов была известна их способность вызывать те или иные эмоции, а также интенсивность этих эмоций. Рассчитывалась корреляция между максимальным значением дискриминантной функции F во время просмотра конкретного видеоклипа и известной из исследования Shaefer et al. интенсивностью соответствующей эмоции, которую вызывает этот клип. Результаты представлены на рисунке 10.

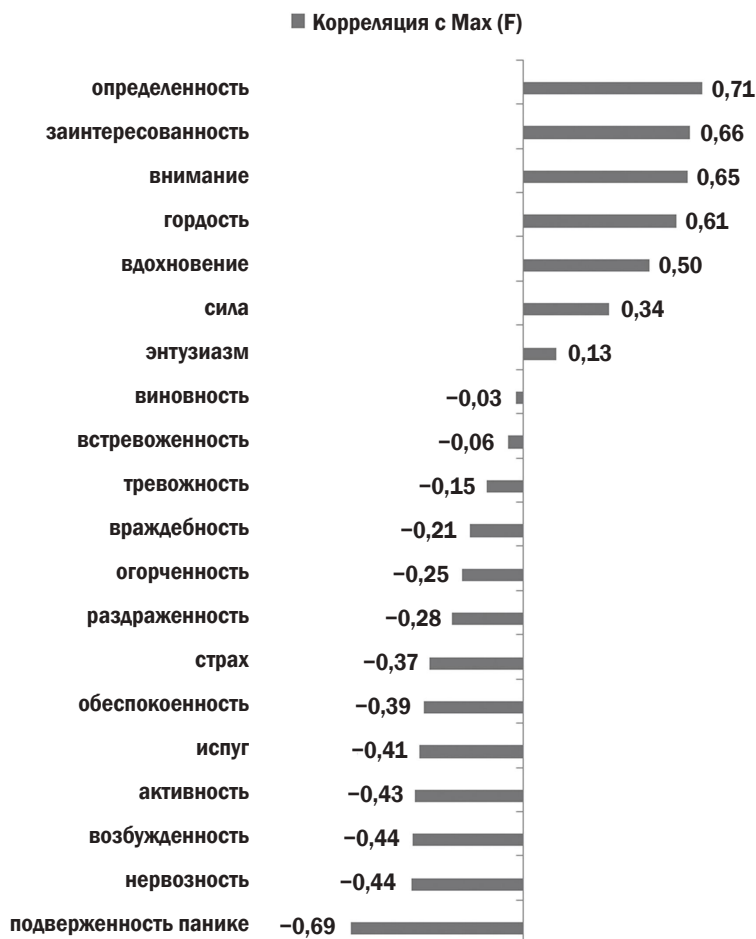


Рисунок 10
Корреляция интегрального показателя эмоционального отклика F с интенсивностью эмоций, включенных в опросник DES, во время просмотра верифицированных видеоклипов

Как видно на рисунке, наиболее высокие положительные значения коэффициента корреляции зафиксированы между значениями F и такими эмоциями, как «определенность» ($r = 0,71$), «заинтересованность» ($r = 0,68$), «внимание» ($r = 0,66$). В то же время наибольшая отрицательная корреляция зарегистрирована между F и эмоциями «подверженность панике» ($r = -0,69$), «нервозность» и «возбужденность» ($r = -0,44$).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Управление психической нагрузкой является наиболее важной задачей при создании современных автоматизированных рабочих мест человека-оператора. В этой связи имеет смысл четко определить понятие «психическая нагрузка». Несмотря на широкий спектр использования, на сегодняшний день не существует общепринятого определения этого термина [28]. Согласно опубликованному в 1991 году стандарту Международной организации по стандар-

Управление психической нагрузкой является наиболее важной задачей при создании современных автоматизированных рабочих мест человека-оператора.

тизации психическая нагрузка относится к рабочему окружению и характеризуется комплексом факторов, воздействующим на индивида в процессе деятельности: содержание задачи, технические средства (оборудование, автоматика), физические и социальные условия. Психическая нагрузка вызывает психическое напряжение [29]. В свою очередь в психическом напряжении выделяют когнитивную составляющую (обусловленную объективным содержанием задачи, например, числом контролируемых параметров) [30] и эмоциональную (отражает вероятность ошибочного действия, значимость последствий ошибки и результата деятельности для индивида) [31]. Таким образом, очевидно, что без оценки эмоционального отклика на предъявляемые задачи невозможно адекватно оценить степень психического напряжения. В нашем исследовании проводился сравнительный статистический анализ влияния просмотра видеоклипов на изменение показателей variability сердечного ритма и показателей самооценки эмоционального состояния и был выделен ряд наиболее информативных параметров variability ритма сердца для разделения состояний покоя и эмоционального напряжения. Выделены информативные показатели ВСР, на изменение которых просмотр видеоклипов оказывает значимое влияние. Изменения групповых средних каждого из этих показателей ВСР превышают 6 %, а характер совместных изменений показателей делает различия в реакции на эмоционально окрашенные тестовые стимулы очевидными. Это дает основание утверждать, что объективный характер реакции операторов на эмоционально окрашенные стимулы можно определять по выделенному набору информативных показателей. Такие показатели variability сердечного ритма, как HR, Average x, SI, LF, MF и некоторые другие, являются информативными в том смысле, что они дают возможность диагностировать эмоциональную реакцию операторов на видеостимулы.

На фоне снижения ЧСС (увеличения среднего значения RR-интервалов) снижается индекс напряжения, происходит увеличение модуляции сердечного ритма, которое проявляется в перераспределении мощности спектра. Расчет мощности спектра в диапазоне длинных волн (LF). Уменьшается мощность спектра в диапазоне средних волн (MF).

На фоне снижения частоты сердечных сокращений (увеличения среднего значения RR-интервалов) снижается индекс напряжения, происходит увеличение модуляции сердечного ритма, которое проявляется в перераспределении мощности спектра.

Среди указанных параметров, прежде всего, следует отметить такой легко контролируемый показатель, как частота сердечных сокращений, которая уменьшается во время просмотра эмоционально окрашенных клипов (а во время просмотра нейтрального клипа она достоверно не изменяется). Такой эффект был зарегистрирован при просмотре клипов обоих знаков. По нашему мнению, причиной этого феномена является активация парасимпатической нервной системы (блуждающего нерва) вследствие концентрации внимания на происходящем на экране. Подобный эффект описан ранее в работе Richards J. E. и Casey B. J. [32]. Иными словами, происходит выделение «объекта» на экране в качестве некоторой определенности, фигуры из общего фона путем формирования очага оптимального возбуждения в лобных, по видимому, долях головного мозга. Интересно отметить, что, несмотря на удлинение среднего интервала RR, отмечалось уменьшение variability ритма сердца, что свидетельствует об увеличении активности именно высших, корковых, уровней регуляции, парадоксальным образом сочетающегося с активацией парасимпатического отдела ВНС.

То, что ведущим механизмом объективной реакции при просмотре эмоционально окрашенных видеоклипов является именно концентрация внимания,

хорошо подтверждается результатами анализа корреляции интегрального показателя эмоционального отклика F с интенсивностью 20-ти эмоций из опросника DES, возникающих во время просмотра верифицированных видеоклипов. Наибольшая положительная корреляция (0,65–0,71) зарегистрирована в группе эмоций, отражающих именно этот аспект нервной деятельности – «определенность», «заинтересованность», собственно «внимание». Наибольшая же отрицательная корреляция, наоборот, с такими эмоциями, как «подверженность панике», «нервозность», «возбужденность», то есть с эмоциями, отражающими отсутствие концентрации.

Интересно, что кажущаяся парадоксальной на первый взгляд реакция снижения ЧСС на просмотр эмоционально окрашенных клипов согласуется с результатами Gross, Levenson, полученными еще в 1997 году [33]. Авторы изучали проявления эмоций, вызванных показом фильмов разной эмоциональной окраски (веселого, грустного, нейтрального). Один из полученных результатов заключался в том, что объективная эмоциональная реакция на все три фильма проявлялась в увеличении интервала между сердцебиениями, но для нейтрального фильма в меньшей степени, чем для остальных.

В то же время в большом количестве исследований (в том числе и в наших собственных [34]) показано, что психологический стресс, имеющий эмоциональную составляющую (например, выступление перед публикой) вызывает не уменьшение, а увеличение ЧСС.

В этой связи важно отметить, что стресс и эмоциональный отклик, которые в литературе часто не разделяются, не тождественны друг другу.

Стрессовая ситуация, связанная с необходимостью активных действий испытуемого, вызывает значительно большее психическое напряжение, чем пассивное переживание, вызванное просмотром видеоклипа. Соответственно, и механизмы адаптации в этих ситуациях, по-видимому, различаются. При просмотре видеоклипа задействуется лишь хронотропный механизм, проявляющийся в изменении частоты сердечных сокращений и вариабельности сердечного ритма. При стрессе, спровоцированном публичным выступлением, включается также и инотропный механизм, связанный с изменением силы сердечных сокращений, косвенным проявлением чего является тонкое изменение формы отдельных элементов электрокардиограммы.

Важно отметить, что в главных своих чертах реакция на эмоционально окрашенный видеостимул оказалась универсальной для всех обследованных типологических групп, то есть для симпатотоников, нормотоников, ваготоников, представителей обоих полов всех типов темперамента. Просмотр эмоционально окрашенных видеоклипов (повторим – обоих знаков) вызывает достоверное замедление частоты сердечных сокращений, приводит к уменьшению индекса напряжения и перераспределению мощности спектра. Выявлены некоторые тонкие особенности этих изменений у мужчин и женщин, а также в группах с разным типом регуляции сердечной деятельности и темпераментом. Личностные особенности характера и темперамента определяют остроту эмоционального реагирования. Интересно в этом аспекте отметить, что амплитуда изменений индекса напряжения у мужчин значительно больше, чем у женщин. Та же закономерность имеет место в группе меланхоликов по сравнению с другими типами темперамента.

Кроме хорошо и давно известных статистических и спектральных параметров вариабельности ритма сердца, нами были также исследованы возмож-

Стресс и эмоциональный отклик, которые в литературе часто не разделяются, не тождественны друг другу.

ности семейства параметров, принадлежащих к наиболее современной и быстро развивающейся области анализа вариабельности ритма сердца, а именно: к оценке степени «хаотичности» ритма с помощью теории нелинейных динамических систем. Эта теория показывает, что поведение динамической системы может быть более или менее хаотическим, то есть сложным, непредсказуемым. Чем более непредсказуема система, тем больше связей внутри нее, тем она устойчивее к внешним возмущающим воздействиям, тем больше она адаптирована к стрессу.

В нашем исследовании не выявлена большая информационная ценность этой группы параметров по сравнению с «традиционными» показателями. Тем не менее они несомненно полезны для выявления некоторых частных нюансов. Так, например, оказалось, что особенностью реакции нормотоников на отрицательно окрашенный видеоклип является увеличение показателя SampEn (энтропии шаблонов); притом в исходном состоянии этот показатель был значительно ниже, чем у других.

Как и ожидалось, наибольшую информативность, то есть способность наилучшим образом разделять состояние обследуемых в исходном состоянии при просмотре эмоционально окрашенных видеоклипов обоих знаков и нейтрального видеоклипа, проявила комбинация из показателей ВРС и показателей субъективной самооценки. Объективные показатели ВРС также продемонстрировали весьма высокую дискриминирующую способность, тогда как дискриминирующая способность показателей самооценки САН и «Градусник» при изолированном применении оказалась неудовлетворительной.

Отсутствие сильных линейных корреляционных связей объективной и субъективной составляющих реакции может быть объяснено зависимостью самооценок от неучтенных факторов (социальные, культурные, личностные особенности), которые определяют неоднородность эмоционального отклика. Эти особенности станут предметом изучения в дальнейших работах. Так, например, недавно была выявлена зависимость некоторых аспектов субъективной и объективной реакции человека на стимулы, вызывающие чувство страха, от его политических убеждений (от склонности поддерживать либеральные или консервативные ценности) [35]. В наших планах – исследование влияния этого фактора на изменения показателей вариабельности ритма сердца под влиянием такого фактора.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ вариабельности ритма сердца дает возможность с высокой достоверностью определять эмоциональное состояние обследуемого, в том числе прямо на рабочем месте. Просмотр эмоционально окрашенных видеоклипов (обоих знаков) вызывает достоверное замедление частоты сердечных сокращений, снижается индекс напряжения, происходит увеличение модуляции сердечного ритма, которое проявляется в перераспределении мощности спектра. Эта реакция носит универсальный характер, однако выявлены некоторые тонкие особенности этих изменений у мужчин и женщин, а также в группах с разным типом регуляции сердечной деятельности и темпераментом. Личностные особенности характера и темперамента определяют остроту эмоционального реагирования. Объективные показатели ВРС и субъективные показатели самооценки относительно независимы друг от друга, между ними не выявлено сильных корреляционных связей.

Наибольшую информативность, то есть способность наилучшим образом разделять состояние обследуемых в исходном состоянии при просмотре эмоционально окрашенных видеоклипов обоих знаков и нейтрального видеоклипа, проявила комбинация из показателей вариабельности ритма сердца и показателей субъективной самооценки.

Features heart rate variability of response to emotive audio-visual stimuli

Chaikovsky I. A.¹, Krivova O. A.³, Kalnysh V. V.², Kozak L. M.³, Frolov Y. A.¹, Vyrovoi Y. S.⁴, Ketko M. A.⁵

¹Glushkov Institute of Cybernetics NAS Ukraine, Kyiv, Ukraine

²Institute for Occupational Health of the NAMS of Ukraine, Kyiv, Ukraine

³International Research and Training Center for Information Technologies and Systems under NAS and MES of Ukraine, Kyiv, Ukraine

⁴Kwendi Impact Studies, Kyiv, Ukraine

⁵IMESK Ltd, Kyiv, Ukraine

SUMMARY

Introduction. Heart rate variability (HRV) research is of great importance not only to assess the functional state of the organism, but also to evaluate stress and emotional states. A one of the problems is that no complete coincidence between changes in the parameters of HRV and emotional reactions. Furthermore, in the practice of HRV analysis a consensus is also lacking on the best HR variability measure for classification emotional reactions.

Purpose. To identify the set of informative HRV parameters as an objective evaluation criterion emotional reaction in response to stimuli (video clips).

Results. A video clip method was used to elicit emotional reactions through self-report measures (29 operators). Three video clips (positive, negative, and neutral) were demonstrated (FilmStim database). The range of possible measures (48 indicators) was derived from time domain, frequency domain and nonlinear analysis electrocardiogram (ECG).

Statistical analyses were performed using the statistical software package STATISTICA 10. Multivariate analysis of variance (MANOVA) was applied to analyze the effect of video clips. Data were explored to meet the assumptions for using ANOVA.

One-way MANOVA revealed that 6 indicators of emotional reactions (ER) (2 self-report measures and 4 HRV measures HR, SI, LF, MF) were statistically significant (Wilks' Lambda = 0.525, F = 4.306, p < 0.001) with effect size of $\eta^2 = 0.22$.

We analyzed these 6 indicators using different post-hoc univariate F test for between-stimuli comparison. Mann-Whitney U-test and Kruskal-Wallis H-test also were used for variables (SI, LF) with non-Gaussian distribution. Stepwise linear discriminant analysis was performed to extract a new feature set consisting of the most significant indicators for improving classification performance. The average overall classification accuracy was assessed achieved 95.68 %. A composite index, based on discriminant analysis, was developed to assess the reaction to emotive stimuli.

Conclusions. In the present study it was been developed technique of statistical analysis of subjective and objective components of the reaction operators on different emotional modality stimuli. This technique involves application of the methods: descriptive, multivariate analysis of variance, linear discriminant analysis. It was shown that the measures of HRV (HR, average R-R intervals, SI, LF, MF) and some others (PNN50, ND, SampEn, LXS) can reasonably be considered as physiological markers for the measurement of stress and emotion.

Keywords: heart rate variability, emotion, video clip method, emotional reaction, MANOVA, linear discriminant analysis.

ЛИТЕРАТУРА

1. Payne E. F. (2003) Definition of emotions. Journal of BEM, vol. 4, no. 3, pp. 38–43.
2. Баевский Р. М. Анализ variabilityности сердечного ритма при использовании различных электрокардиографических систем / Р. М. Баевский, Г. Г. Иванов, Л. В. Чирейкин [и др.] // Вестник аритмологии. – 2001. – № 24. – С. 65–87.

3. McCraty R., Atkinson M., Tiller W., Rein G., Watkins A. (1995) The effects of emotions on short term heart rate variability using power spectrum analysis. *American Journal of Cardiology*, vol. 76, pp. 1089–1093.
4. Lyonfields J. D., Borkovec T. D., Thayer J. F. (1995) Vagal tone in generalized anxiety disorder and the effects of aversive imagery and worrisome thinking. *Behavior Therapy*, vol. 26, no. 3, pp. 457–466.
5. Bernardi L., Wdowczyk-Szulc J., Valenti C., Castoldi S., Passino C., Spadacini G., Sleight P. (2000) Effects of controlled breathing, mental activity and mental stress with or without verbalization on heart rate variability. *Journal of the American College of Cardiology*, vol. 35, no. 6, pp. 1462–1469.
6. Hjortskov N., Rissen D., Blangsted A. K., Fallentin N., Lundberg U., Sjøgaard K. (2004) The effect of mental stress on heart rate variability and blood pressure during computer work. *Journal of Applied Physiology*, vol. 92, no. 1–2, pp. 84–89.
7. Krypotos A. M., Jahfari S., van Ast V. A., Kindt M., Forstmann B. U. (2011) Individual Differences in Heart Rate Variability Predict the Degree of Slowing during Response Inhibition and Initiation in the Presence of Emotional Stimuli *Front Psychol. Frontiers in Psychology*, vol. 2, pp. 268–278.
8. McCraty R. (2006) *Emotional Stress, Positive Emotions, and Psychophysiological Coherence*. Weinheim: Wiley-VCH.
9. Rainville P., Bechara A., Naqvi N., Damasio A. (2006) Basic Emotions Are Associated with Distinct Patterns of Cardiorespiratory Activity. *International Journal of Psychophysiology*, vol. 61, no. 1, pp. 5–18.
10. Машин В. А. Классификация функциональных состояний и диагностика психоэмоциональной устойчивости на основе факторной структуры показателей вариабельности сердечного ритма / В. А. Машин, М. Н. Машина // *Росс. физиол. журн. им. И. М. Сеченова*. – 2004. – Т. 90. – № 12. – С. 1508–1521.
11. Kolodyazhnyi V., Kreibig S., Roth W., Gross J., Wilhelm F. (2011) An affective computing approach to physiological emotion specificity: Towards subject-independent and stimulus-independent classification of film-induced emotions. *Psychophysiology*, vol. 48, pp. 908–922.
12. Kreibig S. D. (2010) Autonomic nervous system activity in emotion: A review. *Biological Psychology*, vol. 84, pp. 394–421.
13. Schubert C., Lambertz M., Nelesen R. A., Bardwell W., Choi J.-B., Dimsdale J. E. (2009) Effects of stress on heart rate complexity – A comparison between short-term and chronic stress. *Biological Psychology*, vol. 80, no. 3, pp. 325–332.
14. Appelhans B. M., Luecken L. J. (2006) Heart rate variability an index of regulated emotional responding. *Review of General Psychology*, vol. 10, pp. 229–240.
15. Stroud L., Salovey P., Epel E. (2002) Sex differences in stress responses: social rejection versus achievement stress. *Biological Psychology*, vol. 52, pp. 318–327.
16. Taelman J., Vandeput S., Spaepen A., Van Huffel S. (2009) Influence of Mental Stress on Heart Rate and Heart Rate Variability. *4th European Conference of the International Federation for Medical and Biological Engineering IFMBE Proceedings*, vol. 22, pp. 1366–1369.
17. Appelhans B. M., Luecken L. J. (2006) Heart rate variability an index of regulated emotional responding. *Review of General Psychology*, vol. 10, pp. 229–240.
18. Thayer J., Åhs F., Fredrikson M., Sollers J., Wager T. D. (2012) A meta-analysis of heart rate variability and neuroimaging studies: Implications for heart rate variability as a marker of stress and health. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, vol. 36, pp. 747–756.
19. Gračanin A., Kardum I., Hudek-Knežević J. (2007) Relations between dispositional expressivity and physiological changes during acute positive and negative affect. *Psychological Topics* 1, vol. 2, pp. 311–328.
20. База верифицированных видеоклипов. URL: <http://www.ipsps.ucl.ac.be/recherche/FilmStim/>.
21. Ильин Е. П. Психофизиология состояний человека / Е. П. Ильин. – СПб: Питер, 2005. – 412 с.
22. Чайковский І. А. Можливості аналізу варіабельності ритму серця в діагностиці емоційного стану людини / І. А. Чайковський, В. В. Кальниш, Т. А. Єна [та ін.] // *Медицина інформатика та інженерія*. – 2011. – № 1. – С. 57–62.
23. Кальныш В. В. Многомерный статистический анализ объективной и субъективной составляющей реакции на эмоциональное воздействие: методические аспекты / В. В. Кальныш, И. А. Чайковский, О. А. Кривова [и др.]. *Клиническая информатика и телемедицина*. – 2013. – № 10. – С. 175–176.
24. Cohen J. (1988) *Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences*. Hillsdale: Erlbaum.
25. Nardo M., Saisana M., Saltelli A., Tarantola S., Hoffmann A., Giovannini E. (2008) *Handbook on constructing composite indicators: methodology and user guide*. France: OECD publishing.
26. Schaefer A., Nils F., Sanchez X., Philippot P. (2010) Assessing the effectiveness of a large database of emotion-eliciting films: A new tool for emotion researchers. *Cognition and Emotion*, vol. 24, no. 7, pp. 1153–1172.

27. Boyle G. J. (1984) Reliability and validity of Izard's differential emotions scale. *Personality and Individual Differences*, vol. 5, no. 6, pp. 747–751.
28. Машин В. А. Психическая нагрузка, психическое напряжение и функциональное состояние операторов систем управления / В. А. Машин // Вопросы психологии. – 2007. – № 6. – С. 86–96.
29. Міжнародний стандарт ISO 10075-1:1991. Ергономічні принципи, що стосуються навантаження при умовній діяльності: Общіє терміни и их определения.
30. Kramer A. F. (1991) Physiological metrics of mental workload: A review of recent progress. London: Taylor and Francis.
31. Myrtek M., Brugner G., Muller W. (1996) Validation studies of emotional, mental and physical workload components in the field. Seattle: Hogrefe & Huber.
32. Richards J. E., Casey B. J. (2001) Heart rate variability during attention phases in young infants. *Psychophysiology*, vol. 6, pp. 86–96.
33. Gross J., Levenson R. (1997) Hiding Feelings: The Acute Effects of Inhibiting Negative and Positive Emotion. *Journal of Abnormal Psychology*, vol. 106, no. 1, pp. 95–103.
34. Chaikovsky I. (2006) Intraindividual variability of T-wave shape on electrocardiogram as indicator of stress. Proc. of 33-rd international congress on electrocardiology (Koln, Germany).
35. Oxley D. R., Smith K. B., Alford J. R., Hibbing M. V., Miller J. L., Scalora M., Hatemi P. K., Hibbing J. R. (2008) Political Attitudes Vary with Physiological Traits. *Science*, vol. 321, pp. 1667–1670.

REFERENCES

1. Payne E. F. (2003) Definition of emotions. *Journal of BEM*, vol. 4, no. 3, pp. 38–43.
2. Baevskiy R. M., Ivanov G. G., Chireykin L. V., Gavrilushkin A. P., Dovgalevskiy P. Ya., Kukushkin Yu. A., Mironova T. F., Prilutskiy D. A., Semenov A. V., Fedorov V. F., Fleyshman A. N., Medvedev M. M. (2001) Analiz variabelnosti serdechnogo ritma pri ispolzovanii razlichnykh elektrokardiograficheskikh sistem [Analysis of heart rate variability using different electrocardiographic systems]. *Vestnik aritmologii*, vol. 24, pp. 65–87.
3. McCraty R., Atkinson M., Tiller W., Rein G., Watkins A. (1995) The effects of emotions on short term heart rate variability using power spectrum analysis. *American Journal of Cardiology*, vol. 76, pp. 1089–1093.
4. Lyonfields J. D., Borkovec T. D., Thayer J. F. (1995) Vagal tone in generalized anxiety disorder and the effects of aversive imagery and worrisome thinking. *Behavior Therapy*, vol. 26, no. 3, pp. 457–466.
5. Bernardi L., Wdowczyk-Szulc J., Valenti C., Castoldi S., Passino C., Spadacini G., Sleight P. (2000) Effects of controlled breathing, mental activity and mental stress with or without verbalization on heart rate variability. *Journal of the American College of Cardiology*, vol. 35, no. 6, pp. 1462–1469.
6. Hjortskov N., Rissen D., Blangsted A. K., Fallentin N., Lundberg U., Søgaard K. (2004) The effect of mental stress on heart rate variability and blood pressure during computer work. *Journal of Applied Physiology*, vol. 92, no. 1–2, pp. 84–89.
7. Krypotos A. M., Jahfari S., van Ast V. A., Kindt M., Forstmann B. U. (2011) Individual Differences in Heart Rate Variability Predict the Degree of Slowing during Response Inhibition and Initiation in the Presence of Emotional Stimuli. *Frontiers in Psychology*, vol. 2, pp. 268–278.
8. McCraty R. (2006) *Emotional Stress, Positive Emotions, and Psychophysiological Coherence*. Weinheim: Wiley-VCH.
9. Rainville P., Bechara A., Naqvi N., Damasio A. (2006) Basic Emotions Are Associated with Distinct Patterns of Cardiorespiratory Activity. *International Journal of Psychophysiology*, vol. 61, no. 1, pp. 5–18.
10. Mashin V. A., Mashina M. N. (2004) Klassifikatsiya funktsionalnykh sostoyaniy i diagnostika psikhoeotsionalnoy ustoychivosti na osnove faktornoy struktury pokazateley variabelnosti serdechnogo ritma [The functional state classification and evaluation of the stability level in mental loads based on the factor structure of heart rate variability parameters]. *Rossiyskiy fiziologicheskii zhurnal im. I. M. Sechenova*, vol. 12, pp. 1508–1521.
11. Kolodyazhnyi V., Kreibig S., Roth W., Gross J., Wilhelm F. (2011) An affective computing approach to physiological emotion specificity: Towards subject-independent and stimulus-independent classification of film-induced emotions. *Psychophysiology*, vol. 48, pp. 908–922.
12. Kreibig S. D. (2010) Autonomic nervous system activity in emotion: A review. *Biological Psychology*, vol. 84, pp. 394–421.
13. Schubert C., Lambertz M., Nelesen R. A., Bardwell W., Choi J.-B., Dimsdale J. E. (2009) Effects of stress on heart rate complexity – A comparison between short-term and chronic stress. *Biological Psychology*, vol. 80, no. 3, pp. 325–332.
14. Appelhans B. M., Luecken L. J. (2006) Heart rate variability an index of regulated emotional responding. *Review of General*

Psychology, vol. 10, pp. 229–240.

15. Stroud L., Salovey P., Epel E. (2002) Sex differences in stress responses: social rejection versus achievement stress. *Biological Psychology*, vol. 52, pp. 318–327.

16. Taelman J., Vandeput S., Spaepen A., Van Huffel S. (2009) Influence of Mental Stress on Heart Rate and Heart Rate Variability. *4th European Conference of the International Federation for Medical and Biological Engineering IFMBE Proceedings*, vol. 22, pp. 1366–1369.

17. Appelhans B. M., Luecken L. J. (2006) Heart rate variability an index of regulated emotional responding. *Review of General Psychology*, vol. 10, pp. 229–240.

18. Thayer J., Åhs F., Fredrikson M., Sollers J., Wager T. D. (2012) A meta-analysis of heart rate variability and neuroimaging studies: Implications for heart rate variability as a marker of stress and health. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, vol. 36, pp. 747–756.

19. Gračanin A., Kardum I., Hudek-Knežević J. (2007) Relations between dispositional expressivity and physiological changes during acute positive and negative affect. *Psychological Topics* 1, vol. 2, pp. 311–328.

20. FilmStim database. URL: <http://www.ipsp.ucl.ac.be/recherche/FilmStim/>.

21. Ilin Ye. P. (2005) *Psikhofiziologiya sostoyaniy cheloveka* [The Psychophysiology of human states]. Saint Petersburg: Piter.

22. Chajkovskiy I., Kaljnysh V., Jena T., Jena A., Budnyk V., Vyrovj Ju., Ketjko M., Frolov Ju. (2011) Mozhlyvosti analizu variabelnosti rytmu serca v diaghnostyci emocijnogho stanu ljudyiny [Value of heart rate variability analysis n diagnostics of emotional state]. *Medychna informatyka ta inzhenerija*, vol. 1, pp. 57–62.

23. Kalnysh V. V., Chaykovskiy I. A., Krivova O. A., Yena T. A., Frolov Yu. A., Yena A. A., Kovalenko A. S. (2013) Mnogomernyy statisticheskiy analiz obektivnoy i subektivnoy sostavlyayushchey reaksii na emotsionalnoe vozdeystvie: metodicheskie aspekty [Multivariate statistical analysis of objective and subjective component of the response to the emotional impact: methodological aspects]. *Klinicheskaya informatika i teleditsina*, vol. 10, pp. 175–176.

24. Cohen J. (1988) *Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences*. Hillsdale: Erlbaum.

25. Nardo M., Saisana M., Saltelli A., Tarantola S., Hoffmann A., Giovannini E. (2008) *Handbook on constructing composite indicators: methodology and user guide*. France: OECD publishing.

26. Schaefer A., Nils F., Sanchez X., Philippot P. (2010) Assessing the effectiveness of a large database of emotion-eliciting films: A new tool for emotion researchers. *Cognition and Emotion*, vol. 24, no. 7, pp. 1153–1172.

27. Boyle G. J. (1984) Reliability and validity of Izard's differential emotions scale. *Personality and Individual Differences*, vol. 5, no. 6, pp. 747–751.

28. Mashin V. A. (2007) Psikhicheskaya nagruzka, psikhicheskoe napryazhenie i funktsionalnoe sostoyanie operatorov sistem upravleniya [Mental workload, mental strain and functional states of the operators of control systems.]. *Voprosy psikhologii*, vol. 6, pp. 86–96.

29. ISO 10075:1991 *Ergonomic principles related to mental work-load – General terms and definitions*. Available at: http://www.iso.org/iso/catalogue_detail.htm?csnumber=18045.

30. Kramer A. F. (1991) *Physiological metrics of mental workload: A review of recent progress*. London: Taylor and Francis.

31. Myrtek M., Brugner G., Muller W. (1996) *Validation studies of emotional, mental and physical workload components in the field*. Seattle: Hogrefe & Huber.

32. Richards J. E., Casey B. J. (2001) Heart rate variability during attention phases attention phases in young infants. *Psychophysiology*, vol. 6, pp. 86–96.

33. Gross J., Levenson R. (1997) Hiding Feelings: The Acute Effects of Inhibiting Negative and Positive Emotion. *Journal of Abnormal Psychology*, vol. 106, no. 1, pp. 95–103.

34. Chaikovskiy I. (2006) *Intraindividual variability of T-wave shape on electrocardiogram as indicator of stress*. Proc. of 33-rd international congress on electrocardiology (Köln, Germany).

35. Oxley D. R., Smith K. B., Alford J. R., Hibbing M. V., Miller J. L., Scalora M., Hatemi P. K., Hibbing J. R. (2008) Political Attitudes Vary with Physiological Traits. *Science*, vol. 321, pp. 1667–1670.

Рецензент: Пышнов Г. Ю., д-р мед. наук, профессор кафедры медицины труда, психофизиологии и медицинской экологии Национальной медицинской академии последипломного образования им. П. Л. Шупика
Статья поступила в редакцию 22.01.2015 г.