

О КОРРЕЛЯЦИИ МЕЖДУ СЕРДЕЧНОЙ И МОЗГОВОЙ АКТИВНОСТЬЮ

В. А. Минкин¹, М. А. Бланк²

¹ООО «Многопрофильное предприятие «Элсис», Санкт-Петербург, Россия,
minkin@elsys.ru

²ФГБУ «РНЦРХТ им. академика А. М. Гранова», Санкт-Петербург, Россия

Аннотация: Проведено исследование психофизиологических состояний (ПФС) при параллельном измерении физиологических сигналов сердечной активности (ЧСС и ВСР) и мозговой активности (технологией виброизображения ВИ). Установлена пропорциональность математических характеристик сигналов ЧСС и ВИ для свободных ПФС, которая нарушается для ПФС, вызванных навязанными стимулами. Установлено отсутствие корреляции между вариабельностью сердечного ритма (ВСР) и периодом мозговой активности (ПМА) в диапазоне очень низких частот (VLF). Приведены преимущества использования технологии виброизображения для исследования мозговой активности.

Ключевые слова: виброизображение, частота сердечных сокращений (ЧСС), вариабельность сердечного ритма (ВСР), быстрое преобразование Фурье (FFT), очень низкочастотный диапазон (VLF), период мозговой активности (ПМА), свободное ПФС, вызванные стимулы.

HEART AND BRAIN ACTIVITY CORRELATION

Viktor A. Minkin¹, Mikhail A. Blank²

¹Elsys Corp., St. Petersburg, Russia, minkin@elsys.ru;

²RNCRST named after academic A. M. Granov, St. Petersburg, Russia

Abstract: Study of various psychophysiological states (PPS) was done by the parallel measurements of cardiac activity by heart rate (HR), heart rate variability (HRV) and brain activity by vibraimage (VI) technology. The correlation between HR and VI signals was established for task free state. Correlation between HR and VI is violated for PPS caused by imposed stimuli. No correlation between HRV and brain activity period (BAP) in very low frequency range (VLF) was detected. The advantages of vibraimage technology for brain activity study were presented.

Keywords: vibraimage, heart rate (HR), heart rate variability (HRV), fast Fourier transformation (FFT), very low frequency (VLF), brain activity period (BAP), task free state, imposed stimuli.

В настоящее время существует несколько технологий для изучения и визуализации мозговой активности. Большая часть используемых методов основана на структурной визуализации или функциональном анализе (Bunge&Kahn, 2009). Известно несколько различных подходов к изучению мозга, применяемых

в медицине, психологии и нейрофизиологии. Разработчики некоторых технологий исследования мозговой активности заявляют о близком успехе в понимании процессов мозговой активности (Farah et al., 2014), однако, на наш взгляд, до полного понимания физиологии мозговой активности еще очень далеко.

Первой технологией, использованной для исследования мозговой активности, была электроэнцефалография (ЭЭГ). Ритмическая деятельность мозга была впервые обнаружена великим русским физиологом Иваном Сеченовым в далеком 1882 году и описана в публикации «Гальванические явления на продолговатом мозге лягушки» (Сеченов, 1952). Немецкий физиолог и психиатр Ганс Бергер записал первую ЭЭГ человека в 1924 году (Millett, 2001). Традиционно ЭЭГ изучает электрическую активность мозга в диапазоне частот выше 1 Гц, но также известны ритмы ЭЭГ ниже 0,1 Гц, называемые DC-EEG или потенциалы медленных изменений (Мурик, 2013).

При разработке технологии виброизображения (Минкин, 2007; 2020) была установлена корреляция между параметрами высокочастотных сигналов виброизображения и сигналами ЭЭГ для человека в активном состоянии, такими как стресс или агрессия. При сравнительном анализе виброизображения (ВИ) и ЭЭГ необходимо учитывать, что сигналы ВИ более низкочастотны, чем электрические сигналы из-за механической инерции движений. Определенная Николаем Бернштейном постоянная времени любых биомеханических перемещений у человека в 0,1 секунды ограничивает верхнюю частоту в спектре вестибулярных перемещений 10 Гц (Бернштейн, 1990).

В конце прошлого века советские ученые разработали новое научное направление — космическая медицина, сочетающее науку и практические исследования для подготовки космонавтов. Несколько разработчиков, в том числе врачи кардиологи Р. М. Баевский, Л. В. Чирейкин и А. Н. Флейшман (Баевский и др., 2001) вместе со своими коллективами разработали двухконтурную модель регуляции сердца, основанную на исследовании variability сердечного ритма (ВСР). Основной целью космической медицины была оценка активности, поведения и функциональных возможностей человека в различных условиях, в том числе при отсутствии гравитации. Одним из элементов исследования кардиоинтервалов является спектральный анализ. Посредством быстрой Фурье обработки сигналов ВСР были выявлены различные максимумы на получаемых спектрограммах. Каждый из максимумов, получаемых при спектральной обработке сигналов сердечной активности, свидетельствует о наличии биологических ритмов сердечной активности в определенных частотных областях. Один из наиболее выраженных ритмов сердечной активности как биологического сигнала (Halberg, 1987) был выявлен в области очень низких частот, период таких колебаний составляет примерно 30–60 секунд.

Большинство предыдущих исследований взаимосвязи сердечной и мозговой активности были выполнены при анализе кардиосигнала и ЭЭГ (Billones et al., 2018). Несмотря на заметное количество работ в данном направлении, ранее не было выявлено четкой корреляции между мозговой и сердечной активностью, хотя известно, что мозг является основным потребителем кислорода в организме

человека. Одним из пояснений отсутствия результатов является то, что технология ЭЭГ имеет значительные ограничения при изучении мозговой активности, так как не предназначена для исследования человека в активном состоянии. Большая часть сравнительных исследований сигналов ЭЭГ и ЭКГ были проведены во сне или других ограниченных состояниях человека (Ako et al., 2003; Messik et al., 1987; Billones et al., 2018).

Целью работы являлось сравнительное исследование мозговой активности человека в нормальных рабочих условиях при работе за компьютером и рабочим столом при синхронной записи физиологических сигналов ЧСС, ВСР и ВИ.

Материалы и методы

Для определения корреляции между сигналами сердечной и мозговой активности были исследованы сигналы ЭКГ и ВИ в четырех различных ПФС одного испытуемого. Сигнал ЭКГ был получен с помощью 4 отведений электрокардиографа ECG Dongle (ECG Dongle, 2020). Сигнал мозговой активности на основе вестибулярно-эмоционального рефлекса (Minkin&Nikolaenko, 2008) регистрировался системой виброизображения Vibraimage PRO10 (Vibraimage PRO10, 2020). Длительность измерения физиологических сигналов в каждом ПФС составляла 600 секунд. Все ПФС характеризовали различную мозговую активность пользователя на одном рабочем месте за компьютером. В каждом ПФС было проведено по 10 повторных измерений физиологических сигналов. Первое ПФС (1ПФС) характеризовало пользователя в активном режиме работы за компьютером. Второе ПФС (2ПФС) характеризовало режим отдыха пользователя, смотрящего в окно во двор с медленно изменяющейся обстановкой, проездом машин и хождением пешеходов. Третье ПФС (3ПФС) характеризовало испытуемого, сидящего на рабочем месте с закрытыми глазами. Четвертое ПФС (4ПФС) характеризовало прохождение испытуемым тестирования на компьютере с периодическим предъявлением стимулов программой VibraMI (Минкин&Николаенко, 2017; VibraMI, 2020).

Результаты исследования

Рассмотрим данные сравнительного анализа спектрограмм сигналов ЭКГ и виброизображения, полученных при обследовании испытуемых в различных психофизиологических состояниях. Оба сигнала ЭКГ и ВИ практически не ограничивают физическую активность человека, поэтому могут быть получены в любых условиях. Сигнал ЭКГ получен с помощью электрокардиографа ECG Dongle (ECG Dongle, 2020), а сигнал виброизображения системой Vibraimage PRO10 (Vibraimage PRO10, 2020).

На рисунках 1 и 2 представлены примеры спектрограмм Фурье, полученные для кардиологического сигнала ВСР (рис. 1) и сигнала виброизображения (рис. 2) для активно работающего за компьютером программиста. На рисунке 3 приведена типовая гистограмма распределения ЧСС за время тестирования, составляющее 600 секунд, и приведены средние значения ЧСС и СКО ЧСС.

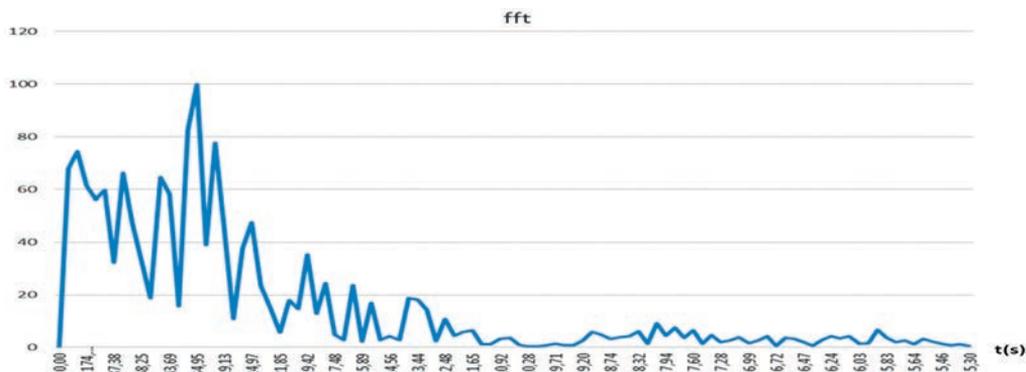


Рис. 1. Пример спектрограммы, полученной быстрой обработкой Фурье кардиологического сигнала ВСР

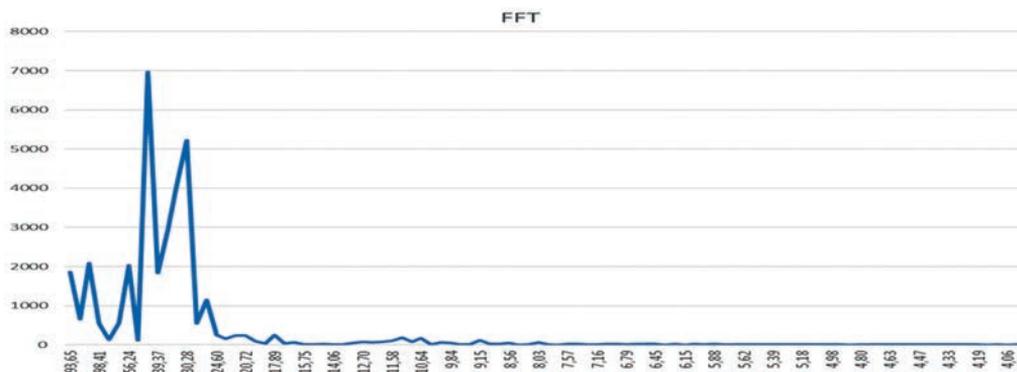


Рис. 2. Пример спектрограммы быстрой обработки Фурье для сигнала ПФС, полученного технологией виброизображения

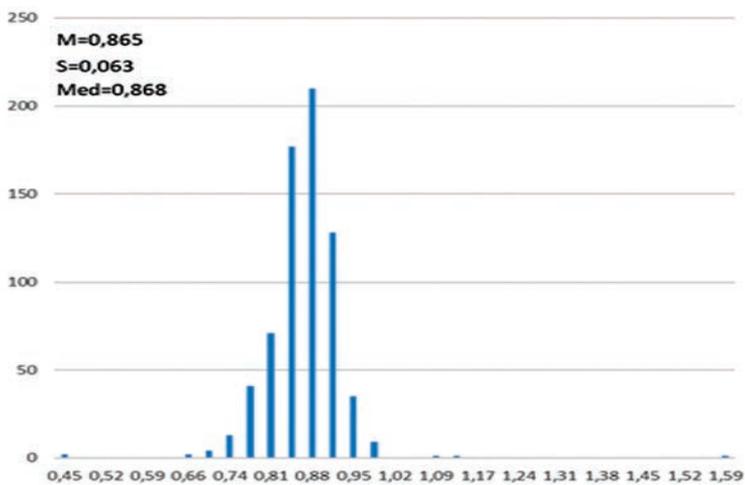


Рис. 3. Плотность распределения периода изменения ЧСС за 600 секунд

Обратим внимание, что максимумы спектров сигналов ВСП и ВИ, полученные одновременно для одного ПФС, не совпадают по горизонтальной оси (период физиологических процессов) и общему характеру, а имеют смещение максимума по временной оси.

Полученные математические данные сравнительных исследованиях мозговой и сердечной активности приведены в таблицах 1–3.

Из таблиц 1–3 следует, что каждое из ПФС характеризуется собственным периодом ЧСС, оценками Avg(M) и Min(M), причем различные математические оценки периода ЧСС уверенно подтверждают различия между состояниями.

Таблица 1

Изменение параметров ЧСС при исследовании 4 ПФС

HR	Avg(M), с	$\sigma(M)$, с	Avg(σ), с	$\sigma(\sigma)$, с	Min(M), с	Min(σ), с
1ПФС (Synchro)	0,921	0,022	0,062	0,006	0,921	0,921
2ПФС (Active)	0,893	0,021	0,061	0,007	0,865	0,865
3ПФС (SCE)	0,929	0,017	0,049	0,002	0,909	0,909
4ПФС (SOE)	0,964	0,028	0,058	0,007	0,927	0,927

Таблица 2

Изменение параметров ВСП при исследовании 4 ПФС

HRV	Avg(max)	$\sigma(\max)$	Avg(fft)	$\sigma(\text{fft})$	Min(max)	Min(fft)
1ПФС Synchro	17,100	7,342	26,635	0,897	17,100	26,635
2ПФС (Active)	83,347	64,676	46,168	2,143	34,950	44,652
3ПФС (SCE)	137,489	41,333	44,401	7,669	78,680	35,585
4ПФС (SOE)	87,174	56,437	31,103	4,438	30,260	25,217

Таблица 3

Изменение параметров ПМА при исследовании 4 ПФС

VI	Avg(max)	$\sigma(\max)$	Avg(fft)	$\sigma(\text{fft})$	Min(max)	Min(fft)
Synchro	28,100	4,293	35,981	1,832	28,100	35,981
2ПФС (Active)	49,726	5,114	41,401	2,608	43,739	39,104
3ПФС (SCE)	63,593	18,055	50,875	3,522	39,325	46,974
4ПФС (SOE)	62,596	11,937	51,950	5,209	39,325	45,764

Обсуждение результатов

На рисунках 4 и 5 приведены результаты измерения параметров сердечной и мозговой активности в виде графиков средних значений параметров сигналов из таблиц 1–3.

Из рисунков 4 и 5 следует, что при проведении тестирования без внешних синхронизированных стимулов зависимости ЧСС и ВИ от различных состояний ПФС достаточно близки и изменяются однонаправленно. Однако предъявление периодических внешних стимулов нарушает эту тенденцию, период ЧСС возрастает, а период сигнала виброизображения уменьшается. В то время как изменение периода сигнала ВСР в диапазоне VLF оказывается полностью противоположным изменению периода ЧСС. То есть, в проведенном исследовании отсутствует зависимость между вариабельностью пульса и его средним значением. Таким образом при свободном функционировании организма человека ЧСС оказывается пропорционален ПМА. Это позволяет предположить, что увеличение частоты работы мозга в диапазоне VLF навязывает более активную работу сердцу. Причем мозг человека распознает навязанный ему внешний ритм предъявления информации и подстраивается под него самостоятельно, но в этом случае не требует активизации сердечной активности, так как эти искусственно навязанные ритмы не требуют большей энергии для работы мозга.

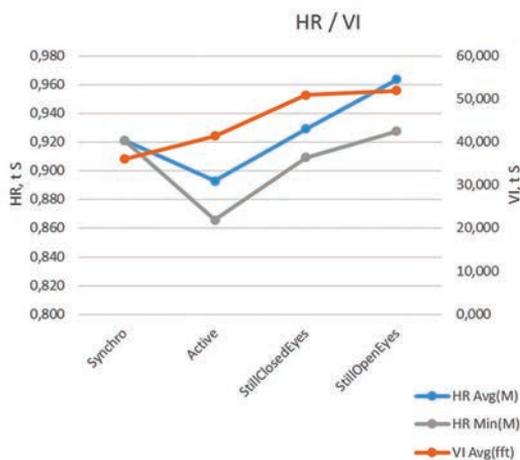


Рис. 4. Сравнительный анализ периода мозговой активности, определенного технологией ВИ и ЧСС для 4-х ПФС

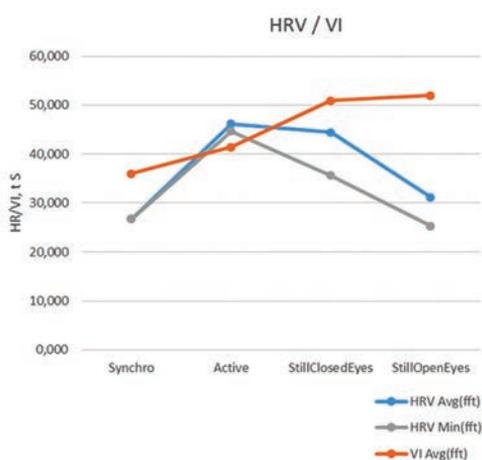


Рис. 5. Сравнительный анализ периода мозговой активности, определенного технологией ВИ и ВСР для 4-х ПФС

Полученный результат является новым и достаточно интересным. По крайней мере ранее исследователи, занимавшиеся сравнительным анализом мозговой активности путем сравнения сигналов ЭЭГ и ЭКГ, не могли получить четкой корреляции между исследуемыми физиологическими сигналами предположительно характеризующими мозговую активность (ЭЭГ) и сердечную (ЭКГ) активность

(Billones et al., 2018). Мы полагаем, что период активности мозга является одним из наиболее информативных биологических ритмов человека. Частота и период мозговой активности в VLF диапазоне зависят от мозговой нагрузки, сознательных и бессознательных процессов в организме человека. Адаптация ритма активности мозга к вызванному стимулу требует более тщательного изучения. Установленная зависимость между сердечной и мозговой активностью открывает новые возможности исследования физиологии и психофизиологии человека.

Можно обсуждать различные варианты, почему технология виброизображения более информативна в индикации активности мозга, чем другие технологии нейровизуализации. Мы полагаем, что виброизображение позволяет лучше выявлять мозговую активность в диапазоне VLF, благодаря механической фильтрации высокой частоты от вибрации головы и высокой физиологической информативности вестибулярных сигналов, поэтому высокочастотные процессы оказывают меньшее шумовое влияние на диапазон VLF для виброизображения по сравнению с другими технологиями исследования физиологических сигналов.

Проведенные исследования показали расширенные возможности технологии виброизображения по исследованию не только физиологических процессов, но и работы сознания человека. Полученные результаты, конечно, нуждаются в подтверждении, но вероятно позволяют опровергнуть известное высказывание Пенроуза, (Penrose, 1994), что для понимания процессов сознания необходимо разработка новой физики. Скорее всего, для этого достаточно продолжения работ по исследованию сознания и мозговой активности технологией виброизображения.

Выводы

1. Технология виброизображения информативно выявляет биоритмологические процессы мозговой активности и изменение ПФС в диапазоне VLF.
2. Предъявление вызванного стимула в диапазоне VLF формирует частоту мозговой активности, близкую к частоте вызванного стимула.
3. Корреляция между периодом мозговой активности и ЧСС позволяет рассмотреть известные структурные схемы регуляции сердечной деятельности.
4. Исследование мозговой активности с помощью анализа вестибулярных сигналов технологией виброизображения имеет преимущества перед известными технологиями анализа физиологических сигналов ЭЭГ и ЭКГ.
5. Технология виброизображения еще только начинает свой путь в биомедицинских применениях. Необходимо расширять проведение исследований и подтвердить полученные данные независимыми исследователями.

Литература:

1. Баевский Р. М. и др. Анализ variability сердечного ритма при использовании различных электрокардиографических систем // Вестник аритмологии. 2001. № 24.
2. Бернштейн Н. А. Физиология движений и активность. М.: Наука, 1990.
3. Минкин В. А. Виброизображение. СПб.: Реноме, 2007. 108 с.

4. Минкин В. А., Николаенко Я. Н. Виброизображение и множественный интеллект. СПб.: Реноме, 2017. 156 с. DOI: 10.25696/ELSYS.V.RU.VIMI.2017
5. Минкин В. А. Виброизображение, кибернетика и эмоции. СПб.: Реноме, 2020. 164 с. DOI: 10.25696/ELSYS.V.RU.VCE.2020
6. Мурик С. Э. Оценка функционального состояния организма. Учебное пособие. Иркутск: Изд. ИГУ, 2013.
7. Сеченов И. М. Избранные произведения. М.: Академия наук СССР, 1952.
8. Ako, et al. (2003). Correlation between electroencephalography and heart rate variability during sleep, *Psychiatry and Clinical Neurosciences*, pp. 57, 59–65.
9. Billones, R. K. et al. (2018). Cardiac and Brain Activity Correlation Analysis Using Electrocardiogram and Electroencephalogram Signals, Conference: IEEE 10th International Conference on Humanoid, Nanotechnology, Information Technology, Communication and Control, Environment and Management (HNICEM).
10. Bunge, S. A. and Kahn, I. (2009). Cognition: An Overview of Neuroimaging Techniques, *Encyclopedia of Neuroscience*, Vol. 2, pp. 1063–1067.
11. ECG Dongle [Electronic resource]. Available at: <https://cardio-cloud.ru/> (Access: 06 March 2020).
12. Farah, et al. (2014). Functional MRI-based lie detection: Scientific and societal challenges, *Nature reviews, Neuroscience*, Vol. 15, February.
13. Halberg, F. (1987). Perspectives of chronobiologic engineering, *NATO ASI Series*, Vol. 120, pp. 1–46.
14. Messik, et al. (1987). Correlation of regional cerebral blood flow (rCBF) with EEG changes during isoflurane anesthesia for carotid endarterectomy: critical rCBF, *Anesthesiology*. Mar. 66 (3):344–9.
15. Millett, D. E. (2001). Hans Berger: From Psychic Energy to the EEG, *Medicine Published in Perspectives in biology and medicine*.
16. Minkin, V. A. and Nikolaenko, N. N. (2008). Application of Vibraimage Technology and System for Analysis of Motor Activity and Study of Functional State of the Human Body, *Biomedical Engineering*, Vol. 42, No. 4, pp. 196–200. DOI: 10.1007/s10527-008-9045-9
17. Penrose, R. (1994). *Shadows of the Mind*, Oxford University Press.
18. VibraMI (2020). Psychophysiological Profiling System. Version 10. [Electronic resource]. Available at: <http://www.psymaker.com/downloads/VibraMIEng10.pdf> (Access: 22 March 2020).
19. VibraImage PRO10 (2020). Behavior Detection System (Vibraimage). [Electronic resource]. Available at: <http://www.psymaker.com/downloads/VI10ManualEng.pdf> (Access: 23 March 2020).