

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ПСИХОФИЗИОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЧЕЛОВЕКА ОТ ВЕЛИЧИНЫ ТОРМОЖЕНИЯ ВЕСТИБУЛЯРНОЙ СИСТЕМЫ МЕТОДОМ ВИБРОИЗОБРАЖЕНИЯ

Минкин В.А., Николаенко Н.Н.

Многопрофильное предприятие «Элсис», г. Санкт-Петербург

Введение

Великие ученые прошлого (Ч.Дарвин, И.М. Сеченов, К.Лоренц) декларировали неразрывную связь между движением и жизнью биологических объектов, в том числе связь между двигательной активностью и психофизиологическим состоянием. Тезис И. М. Сеченова: «каждая мысль имеет мускульное проявление» [4], наиболее наглядно устанавливает связь между процессом мышления и движением. Поддержание вертикального равновесия человека осуществляется вестибулярной системой и может быть рассмотрено как частный случай двигательной активности, причем динамика мускульного движения определяется процессами сенсорного торможения вестибулярной системы [5].

Метод виброизображения регистрирует микродвижения и пространственные колебания объекта путем определения параметров вибрации (частоты и амплитуды) для каждого элемента (пикселя) исследуемого объекта [2]. С помощью этого метода удалось установить, что параметры виброизображения отражают количество движения, а значит характеризуют эмоции и физиологическое состояние организма человека [3].

Движения и микроколебания головы человека в пространстве, классически определяемые вестибулярной системой и сенсорной физиологией, изучаются и обсуждаются в сопоставлении с проявлением вестибулярных рефлексов (в том числе вестибулярно-окулярного и шейно-окулярного рефлекса) [6, 7, 8].

В данной статье предпринята попытка рассмотрения движения головы с точки зрения биохимических превращений и законов термодинамики при помощи технологии виброизображения. Мы предположили, что голова человека, находящаяся в равновесии и не совершающая «осознанных движений», может рассматриваться как квазиравновесная термодинамическая система, и определенная часть внутренней энергии, изменяющая равновесие этой квазизакрытой системы, расходуется на совершение движения в виде механических колебаний (вибрации). Каждое эмоциональное состояние характеризуется неким расходом энергии, и работа, осуществляемая системой, преобразуется в микровибрации, если человек стоит или сидит без движения. Параметры вибрации головы (частота в диапазоне 0,1-10,0 Гц и амплитуда в пределах 10-1000 мкм [1]) для стабильного эмоционального состояния человека стабильны во времени. Параметры вибрации изменяются только после изменения эмоционального состояния. Известно, что оценка работы вестибулярной системы эффективно применяется для функциональной диагностики психофизиологических параметров и работоспособности человека. В ходе НИР «Создание системы дистанционного бесконтактного сканирования и идентификации психофизиологического состояния человека», проводимой в рамках федеральной целевой научно-технической программы по приоритетному направлению «Безопасность и противодействие терроризму», исследовалась возможность бесконтактной диагностики состояния вестибулярной системы с целью определения интегральных психофизиологических параметров человека и количественной оценки эмоционального состояния, прежде всего уровня агрессивности.

Методика исследования

Оборудование для получения виброизображения

Для регистрации виброизображения использовались стандартные видео системы, такие как веб - камера или цифровой камкодер, или аналоговая

камера с оцифровщиком. Установленная разрешающая способность камеры составляла 640×480 , причем качество виброизображения значительно зависело от шумовых характеристик камеры. Лучшие результаты по качеству виброизображения были получены с простой веб - камерой AVerCam и датчиком изображения 1/3 дюйма КМОП с разрядностью 8 бит (256 градаций серого). Аналогичные по качеству результаты были также получены с более современной веб камерой 1/4 дюйма Genius Eye 311Q.

В качестве компьютера был использован стандартный ноутбук Samsung P40 TV001 с процессором Pentium M2000 и программным обеспечением VibraImage 6.1 от компании Элсис (www.elsys.ru). Веб - камера устанавливалась на расстоянии около 0,5 метра напротив исследуемого лица (головы) человека так, чтобы голова была видна на мониторе компьютера достаточно крупно и занимала не менее 30% от площади экрана.

Амплитудное и частотное виброизображение

Значения амплитуды и частоты вибраций головы человека различаются в каждой точке пространства и выводятся на экран в виде псевдо цветового изображения. Интегральная обработка значений параметров вибрации в каждой точке может предоставить общую информацию о параметрах движения человека. Виброизображения головы человека приведены на рисунках, отображающих амплитудное (рис.1а) и частотное (рис.1б) распределения вибраций, модулированные цветовой шкалой (рис. 1в).

Каждая точка (пиксель) амплитудного виброизображения (рис.1а) отражает накопленное за определенное время относительное перемещение элемента изображения, так как известно, что при незначительных перемещениях межкадровая разность пропорциональна движению объекта [9]. Для превращения этого относительного перемещения в абсолютное необходимо иметь точную информацию о расстоянии до объекта и рабочем угле объектива камеры, тогда цветовая шкала (рис.1в) может быть

отградуирована в миллиметрах или микронах. Однако, при примерно одинаковом расположении лиц на экране монитора, автоматически выполняется условие единой относительной шкалы амплитудного виброизображения. Это позволяет сравнивать полученную информацию о перемещении изображения для различных людей.

В отличие от амплитудного, каждая точка частотного виброизображения имеет физическую размерность частоты (Гц), так как реально отображает частоту изменения сигнала в каждом элементе изображения. Поэтому приведенная цветовая шкала (рис.1в) отградуирована в Гц, т.е. фиолетовый цвет частотного виброизображения отображает диапазон вибраций (0-1) Гц, синий отображает диапазон вибраций (1-4) Гц, зеленый отображает диапазон вибраций (4-8) Гц, красный отображает диапазон вибраций (8-10) Гц.

На основе данных двух первичных изображений определялось более 20 интегральных параметров виброизображения, отражающих различные виды движения, и разделенных на 4 основные группы параметров виброизображения (амплитуды, частоты, симметрии и обработки вибраций).

Полное описание этих параметров приведено в Техническом описании системы VibraImage (<http://www.elsys.ru/news.php#05052701>). В ходе указанной НИР были проведены исследования методом виброизображения 110 человек, находящихся в различных психоэмоциональных состояниях, при сравнительном контроле у групп испытуемых параметров ЭЭГ, КГР, периферического пульса, проведении дерматоглифического анализа и психологических тестов Люшера, хэнд теста, теста Басса-Дарки [1].

Результаты исследований

Внешнее виброизображение

Установлено, что внешнее (вокруг головы) построчное отображение максимальной частоты и средней амплитуды виброизображения более наглядно отображает состояние человека, чем внутреннее виброизображение. Цвет внешнего виброизображения кодируется той же цветовой шкалой, что и

внутреннее виброизображение, и отображает максимальную частоту вибрации в каждой строке. Размер внешнего виброизображения определяется средней амплитудой для данной строки. Любая неравномерность в цвете и размере внешнего виброизображения наглядно характеризует отклонения работы вестибулярной системы и отражает психофизиологическое состояние. Примеры внешних виброизображений человека в нормальном состоянии и состоянии стресса приведены на рис. 2. Нормальное состояние человека характеризуется более равномерным внешним виброизображением, а для стрессового состояния человека характерны большая пространственная и цветовая неравномерность внешнего виброизображения.

Явные различия между изображениями на рис. 2а и рис. 2б иллюстрируют преимущества визуального анализа состояния человека по внешнему виброизображению относительно визуального анализа исходного виброизображения.

Частотная гистограмма

Частотная гистограмма показывает распределение частоты движения головы для всех точек изображения за определенный временной период (по умолчанию этот период равен 20 секундам). Примеры реальных гистограмм для соответствующих эмоциональных состояний приведены в данном разделе.

На рис. 3а показана гистограмма (программное окно) распределения частоты вибраций для человека в нормальном психофизиологическом состоянии, оба графика приблизительно выглядят как нормальное (Гауссовское) распределение. На рис.3б мы наблюдаем экстремальные психофизиологические состояния, верхний график отражает очень уставшего человека с минимальным уровнем расходуемой энергии, а нижний график показывает высокоэнергетическое состояние человека (ярость).

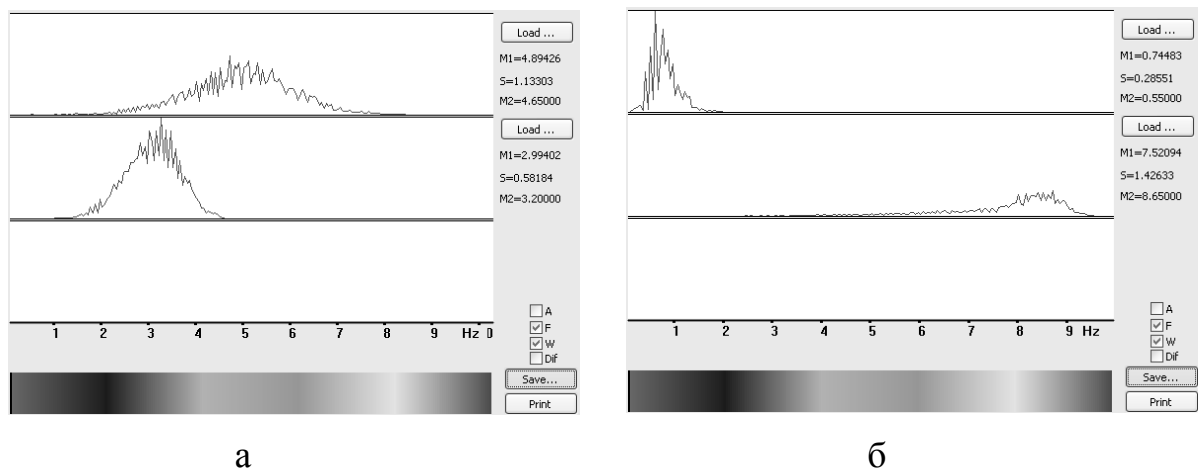


Рис. 3. Гистограмма (программное окно) распределения частоты вибраций для человека в нормальном психофизиологическом состоянии (а) и в экстремальном психофизиологическом состоянии (б), верхний график характеризует усталость, нижний график характеризует ярость.

Каждое распределение (частотная гистограмма) характеризуется следующими основными математическими характеристиками, M1-математическое ожидание (среднее арифметическое значение по распределению), S - среднеквадратическое отклонение (СКО характеризует ширину распределения), M2 - значение частоты, соответствующее максимуму распределения. Из приведенных рисунков следует, что предложенные математические характеристики частотного распределения значительно зависят от состояния человека, что, однако, не исключает возможность введения новых информативных математических характеристик для отображения частотного распределения.

Спектральный анализ

Спектральный анализ временной зависимости высокоскоростных сигналов виброизображения (анализ межкадровой разности по двум соседним кадрам) также может информативно отображать эмоции человека.

Человек в нормальном состоянии имеет в несколько раз больше низкочастотную составляющую в спектре вибраций, чем человек в тревожном или агрессивном состоянии. На рисунке 4 (программное окно) представлен пример спектра сигнала виброизображения для человека в нормальном состоянии на верхнем графике и в тревожном состоянии на нижнем графике.

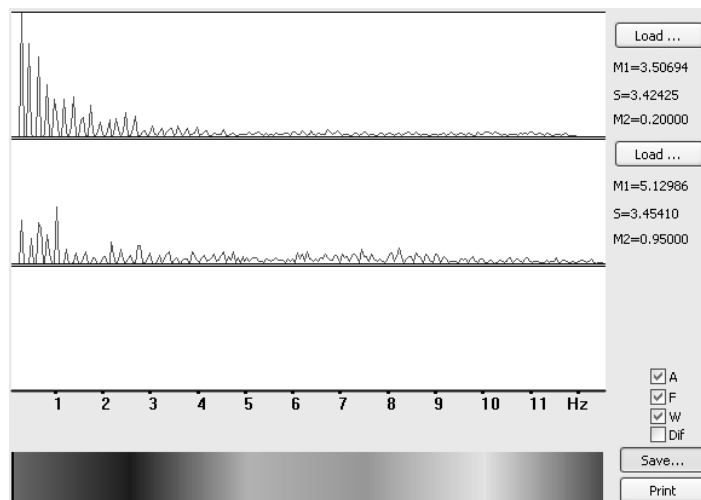


Рис. 4. Спектр сигнала виброизображения (программное окно) человека в нормальном состоянии на верхнем графике и в тревожном состоянии на нижнем графике.

Из приведенных на рис.4 графиков следует, что спектр частоты вибрации человека в спокойном состоянии может быть аппроксимирован экспонентой, в то время как спектр частоты вибрации человека в возбужденном состоянии представляет собой более сложную комбинацию из нескольких различных распределений.

Корреляция ЭЭГ и виброизображения

Метод электроэнцефалографии (ЭЭГ) является одним из наиболее информативных для психофизиологического тестирования. ЭЭГ была выбрана как базовая технология для сравнительного тестирования виброизображения. Разработанная система VibraEEG осуществляет совместную синхронную регистрацию и обработку сигналов электрической

активности мозга (ЭЭГ) и двигательной активности (виброизображения). Следует сразу отметить, что регистрируемые сигналы виброизображения из-за механической инерционности являются более низкочастотными, чем ЭЭГ сигналы, поэтому корректное определение корреляции между сигналами следует осуществлять в частотном диапазоне до 10 Гц.

Ниже приведен пример расчета корреляция (в виде программного окна) между ЭЭГ сигналами и сигналами виброизображения в частотном диапазоне θ (тета) (4–8) Гц для человека, находящегося в спокойном состоянии (рис. 5а) и агрессивном состоянии (рис. 5б).

Приведенные на рисунках 5а и 5б связи между электродами ЭЭГ (EEG1-EEG16) условно (цвет связи кодирует коэффициент корреляции) отображают корреляцию между сигналами электрической активности для стандартно расположенных на голове человека электродов ЭЭГ. Нижняя точка EEG22 отображает корреляцию сигналов с кожно-гальванической реакцией человека (электрод на руке). Верхние точки (A1, F1) отображают корреляционные связи с быстрыми сигналами виброизображения (A1- межкадровая разность по двум кадрам, F1- характеристика изменения частоты по двум кадрам). Таблица в правой части рисунков 5а и 5б отражает максимальный коэффициент корреляции для каждого регистрируемого сигнала.

Из приведенных рисунков следует, что сигналы виброизображения имеют существенную корреляцию с сигналами ЭЭГ для агрессивного состояния и не имеют корреляции с ЭЭГ, когда человек спокоен. Это, по-видимому, значит, что движения головы зависят от мышления, когда человек активен и энергичен, но движения головы не зависят от активности мозга, когда человек спокоен, отдыхает и ни о чем не думает. Так же вывод о более сложном характере движений головы для человека, находящегося в тревожном состоянии, был получен при спектральном анализе сигнала виброизображения (рис. 4).

Обсуждение

Первый закон термодинамики определяет преобразование энергии. Изменение внутренней энергии закрытой термодинамической системы равно сумме количества теплоты, переданной системе, и работе, совершенной системой. Математически первый закон можно сформулировать в виде:

$$dU = \delta Q - \delta W,$$

где dU представляет изменение внутренней энергии системы, δQ представляет количество теплоты, полученное системой, и δW представляет количество работы, совершенной системой относительно окружающей среды. В соответствии с законами термодинамики можно утверждать, что человек, находящийся в состоянии механического равновесия, одновременно находится и в состоянии биохимического квазиравновесия, и δW представляет собой количество работы, осуществляемой системой, в виде микровибраций. Система терморегулирования человека поддерживает стабильной температуру человеческого тела, следовательно, можно считать, что эмоциональная энергия должна быть пропорциональна движениям и микровибрациям головы.

Психология различает более 200 типов эмоций, что соответствует различному временному и пространственному распределению энергии, потому что каждый тип эмоции характеризуется собственными особенностями и энергетикой. Таким образом, можно предложить следующую общую функциональную зависимость для определения любого эмоционального состояния:

$$E_i = f_i \left(\frac{\delta W}{dt}; \frac{\delta W}{d(x, y, z)} \right), \text{ где}$$

E_i – i -ая эмоция (агрессия, стресс, тревожность и т.д.);

$\frac{\delta W}{dt}$ – временное изменение количества работы, совершенной головой человека, в виде микродвижений и микровибраций;

$$\frac{\delta W}{d(x, y, z)}$$

– пространственное распределение количества работы, совершенной головой человека, в виде микродвижений и микровибраций.

Предложенная функциональная зависимость определения эмоций носит общий характер и может быть конкретизирована в дальнейшем. При этом, большой интерес представляют формулы для определения конкретных эмоциональных состояний по пространственному и временному распределению вибраций головы человека. Для примера и обсуждения ниже приводится формула для определения уровня агрессивности человека:

$$Agr = \frac{F_m + 4 * \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (F_i - \bar{F})^2}}{512}, \quad \text{где}$$

Agr – уровень агрессивности;

F_m – частота максимума в частотной гистограмме плотности распределения (M2 на рис. 3);

F_i – количество отсчетов с i -той частотой в гистограмме плотности распределения частоты, полученное за время N кадров;

n – число отсчетов с межкадровой разностью выше пороговой в N кадрах.

Первая составляющая числителя формулы расчета уровня агрессивности ($F_m=M2$) определяет смещение распределения по оси частоты, причем, более высокая частота колебаний соответствует увеличению уровня агрессивности. Вторая составляющая числителя определяется СКО (S на рис. 3) и характеризует ширину частотного распределения. Более широкое распределение соответствует повышению уровня агрессивности человека. При получении исходных отсчетов с помощью 8 битовой камеры коэффициент знаменателя 512 позволяет измерять коэффициент агрессивности в относительных единицах, изменяющийся от 0 (нулевая

агрессивность) до 1 (максимальная агрессивность). Уровень агрессии, полученной по различным группам испытуемых при $p < 0,05$, составил $(0,3 \pm 0,12)$ для спокойного состояния, $(0,41 \pm 0,18)$ для нормального состояния и $(0,7 \pm 0,11)$ для агрессивного состояния. Приведение остальных расчетных параметров эмоций к диапазону от 0 до 1 (или 0-100%) является предпочтительным и в дальнейшем.

Выводы

Проведенные исследования показали возможность определения психофизиологического состояния человека с помощью дистанционного и бесконтактного сканирования микродвижений головы человека, определяемых работой вестибулярной системы.

Разработанная методика виброизображения позволяет оценить и измерить распределение количества движения объекта во времени и в пространстве, и предположительно, провести количественные измерения психоэмоционального состояния объекта. Определение эмоций на основе количественного измерения микродвижений человека позволяет связать психологию и физиологию единой физической теорией.

ЛИТЕРАТУРА

1. Научно-технический отчет по НИР «Создание системы дистанционного бесконтактного сканирования и идентификации психофизиологического состояния человека». в рамках ФЦНТП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития науки и техники» на 2002-2006 годы», Государственный контракт от 23 июня 2005 г. № 02.435.11.6002. Элсис, Санкт-Петербург, 2006.
2. Патент РФ RU 2187904 приоритет 19.12.2000г. «Способ преобразования изображения», Минкин В.А., Штам А.И.
3. Патент РФ RU 2289310 приоритет 16.02.2004г. «Способ получения информации о психофизиологическом состоянии живого объекта», Минкин В.А., Штам А.И.
4. Сеченов И. М. Элементы мысли. СПб, 2001. 416 с.
5. Тамар Г., Основы сенсорной физиологии. М., 1976. 520 с.
6. Aw S. T., Todd M. J., McGarvie L. A., Migliaccio A. A., Halmagyi G. M.. Effects of Unilateral Vestibular Deafferentation on the Linear Vestibulo-Ocular Reflex Evoked by Impulsive Eccentric Roll Rotation. //J Neurophysiol. 2003. Feb. Vol. 89. p. 969-978.
7. Kathleen E. Cullen, Jefferson E. Roy. Signal Processing in the Vestibular System During Active Versus Passive Head Movements.// J Neurophysiol. 2004. Vol. 91. p. 1919-1933.
8. Medendorp W. P., Melis B.J.M., Gielen C.C.A.M., Van Gisbergen J.A.M. Off-Centric Rotation Axes in Natural Head Movements: Implications for Vestibular Reafference and Kinematic Redundancy.// J Neurophysiol. 1998. April. Vol. 79 No. 4, p. 2025-2039.
9. US 5579045 Apparatus for detecting using a difference between first and second image signals. Sekine, et al.

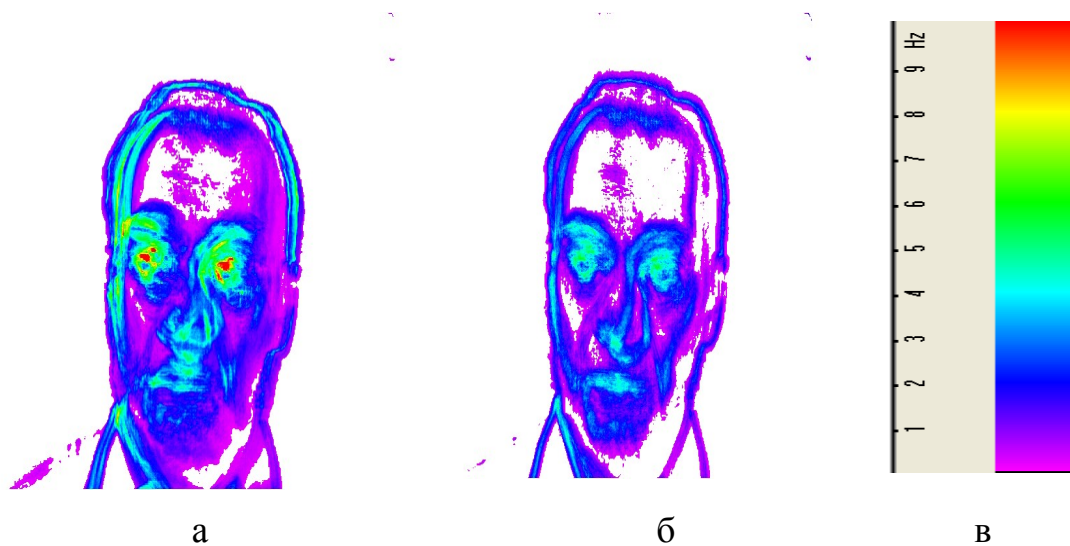


Рис.1. Амплитудное (а), частотное (б) виброизображение человека, псевдоцветовая шкала (в).

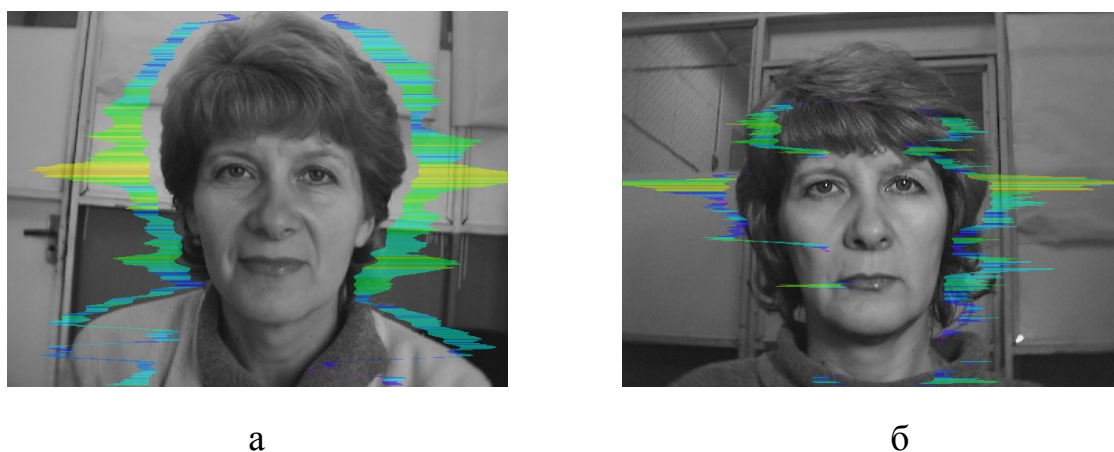
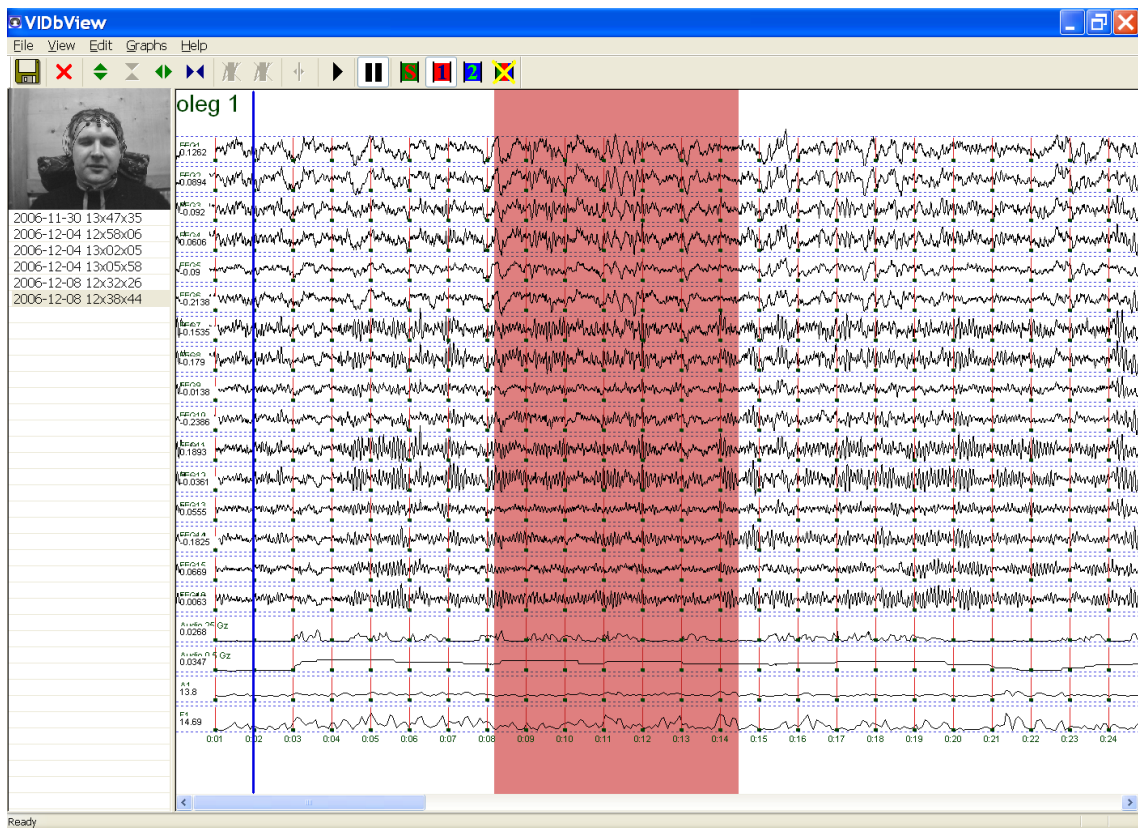


Рис. 2. Внешнее виброизображение человека в спокойном состоянии (а) и в состоянии стресса (б).



a

б

в

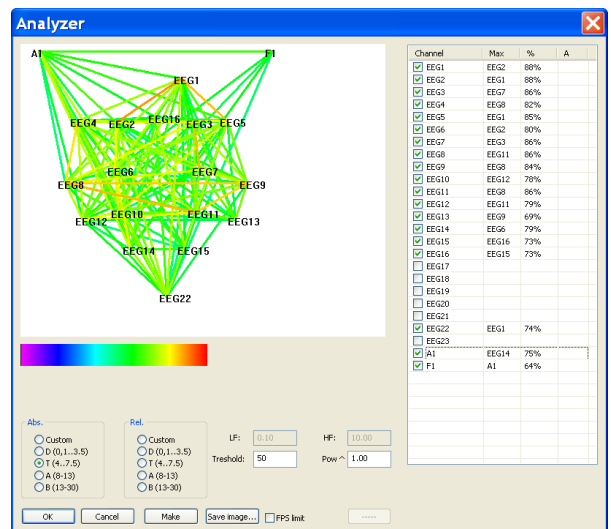
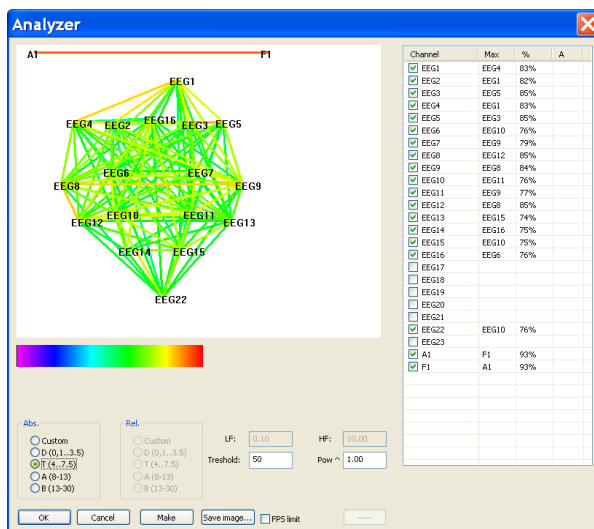


Рис. 5. Синхронная регистрация параметров виброизображения и ЭЭГ (а). Визуализация корреляционных связей (в виде программного окна) между ЭЭГ сигналами и сигналами виброизображения в частотном диапазоне θ (тета) (4–8) Гц для человека, находящегося в спокойном состоянии (б), и в агрессивном состоянии (в).