

Применение технологии и системы виброизображения для анализа двигательной активности и исследования функционального состояния организма

Статья опубликована в журнале Медицинская Техника, Т.42, N4, 2008 год, стр 30-34.

В.А. Минкин, Н.Н. Николаенко

Многопрофильное предприятие «Элсис», г. Санкт-Петербург, minkin@elsys.ru

Введение

Дискуссии об информативности движения ведутся, начиная от Аристотеля, который декларировал неразрывную связь между движением и жизнью биологических объектов, в том числе связь между двигательной активностью и психофизиологическим состоянием. Тезис Ивана Михайловича Сеченова, сформулированный им в 1863 году в классической работе «Рефлексы головного мозга», что: «Все внешние проявления мозговой деятельности могут быть сведены на мышечное движение», наиболее наглядно устанавливает связь между процессом мышления и движением. Великий Чарльз Дарвин на основе теории эволюции в книге «О выражении эмоций у человека и животных» (1872 год) утверждал, что «рефлекторные действия характеризуют выражение эмоций». Выдающийся биолог и психолог 20 века, нобелевский лауреат Конрад Лоренц в книге «Агрессия» (1966 год) заявил, что тот, кто сумеет измерить амплитуду и интенсивность рефлекторных движений, тот сможет определить уровень агрессивности.

Несмотря на эти прямые рекомендации по определению эмоционального и функционального состояния через параметры рефлекторных движений, до недавнего времени не удавалось количественно и информативно характеризовать движения человека. Прежде всего потому, что большинство исследователей физиологии движения (Н.А. Бернштейн [1], Мира-И-Лопес [2]) пытались анализировать макро перемещения человека, что является чрезвычайно сложной математической задачей.

В ходе исследований [3] было установлено, что поддержание вертикального равновесия головы человека, осуществляемое вестибулярной системой, может быть рассмотрено как функция, характеризующая вестибулярный рефлекс и, одновременно, как частный случай двигательной активности, характеризующийся микродвижениями головы. Анализ микро перемещений головы имеет целый ряд преимуществ по сравнению с анализом других рефлексных движений человека. Прежде всего, движения головы являются одним из самых часто повторяющихся движений, которые совершает человек в течение жизни. Ребенок начинает держать голову, начиная со второго месяца жизни, далее вестибулярная система постоянно поддерживает вертикальное состояние головы, перемещая ее в пространстве на сотни микрон несколько раз в секунду, отдыхая, только когда человек спит, или его голова прислонена к какому-то предмету.

С физической точки зрения, механические колебания головы представляют собой вибрационный процесс, параметры которого количественно характеризуют взаимосвязь энергии и движения объекта. Для получения интегральной информации о параметрах движения головы используется технология виброизображения [4], которая позволяет количественно определять параметры периодических перемещений каждой точки объекта. Виброизображение представляет собой первичный вид изображения, каждая точка которого отражает параметры движения объекта. Виброизображение аналогично другим биомедицинским видам изображений человека (УЗИ, ЯМР, ИК или рентгеновское изображение), каждое из которых отражает определенные физические свойства. При этом виброизображение позволяет получать также информативные сигналы, аналогичные точечным методам считывания биомедицинской информации – ЭЭГ, КГР, ЭКГ сигналам. Физическая модель анализа микродвижений головы с помощью технологии

виброизображения, полученная на основе законов термодинамики, предложена в работе [5]. Предложенная модель вводит новый термин вестибулярно-эмоциональный рефлекс или вестибулярно-энергетический рефлекс (ВЭР) для описания данного явления.

Методика

Для анализа и диагностики вестибулярных функций традиционно используют различные активные тесты и телевизионные системы [6]. В большинстве случаев под тестом понимаются вынужденные движения человека или головы, которые необходимо совершить пациенту для проведения анализа. Технической задачей, которую решает система виброизображения для исследования вестибулярных функций, является определение перемещения каждой точки головы человека, находящейся в состоянии естественного равновесия, с максимальной точностью и в режиме реального времени. Известно, что практически любое движение человека корректируется его сенсорной системой, и вестибулярная коррекция не является исключением. В работах Бернштейна [1, 7] была установлена временная составляющая таких процессов - 0,1 секунда, что определяет целесообразность применения относительно низкочастотных телевизионных камер (частота кадров 10-20 Гц) для повышения точности определения микродвижений.

Основные технические параметры используемых телевизионных камер, следующие:

Разрешающая способность, элементы,	640 x 480
Частота, кадр/с,	15,0
Динамический диапазон, дБ, не менее,	80
Рабочая освещенность на объекте, лк, не менее,	100
Угол объектива, град,	10
Расстояние до объекта, м,	3
Расстояние до компьютера, м, не более,	5
Интерфейс цифрового сигнала, USB,	1.0-2.0
Климатическое исполнение	УХЛ2
Напряжение питания, (USB), В,	5

Преобразование живого видео в виброизображение позволяет в режиме реального времени определять интегральные и локальные параметры движения головы человека, связанные с его функциональным состоянием. Исходные матрицы для расчета интегральных параметров движения объекта представляют собой амплитудное и частотное виброизображения, определяемые по следующим формулам [4]:

Амплитудная составляющая каждой точки виброизображения определяется по формуле:

$$A_{x,y} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |U_{x,y,i} - U_{x,y,(i+1)}|, \quad (1)$$

где x, y - координаты точки;

$U_{x,y,i}$ - величина сигнала в точке x, y в i -ом кадре;

$U_{x,y,(i+1)}$ - величина сигнала в точке x, y в $(i+1)$ кадре;

N - число кадров, по которым идет накопление амплитудной составляющей виброизображения.

Частотная составляющая каждой точки виброизображения определяется по формуле:

$$F_{x,y} = \frac{F_{in}}{N} \sum_{i=1}^N \left\{ \begin{array}{l} |U_{x,y,i} - U_{x,y,(i+1)}| > 0 : 1 \\ \text{иначе} : 0 \end{array} \right\} \quad (2)$$

где F_{in} – частота обработки телевизионного сигнала

Для получения четкого виброизображения лицо пациента должно быть равномерно освещено и расположено фронтально перед телевизионной камерой [4], расстояние пациента до считывающей камеры может различаться в зависимости от параметров объектива. Предпочтительным является наиболее полное вписание головы пациента в телевизионный растр, в этом случае наиболее полно используется разрешающая способность телевизионной камеры для определения минимальных вибраций и перемещений.

Таким образом, при соблюдении перечисленных рекомендаций, современная цифровая телевизионная камера представляет собой высокоточный измерительный прибор, позволяющий с помощью программного обеспечения определять параметры микродвижений человека.

Результаты исследований

Проведенные исследования функционального состояния человека были направлены на выявление эмоционального состояния человека [3]. Разработанные алгоритмы измерения эмоционального состояния человека [8] опираются на стандартный аппарат математической статистики, основные принципы координации движений, логику поведенческой психологии и результаты сравнительных испытаний. Примеры получаемого частотного виброизображения человека приведены на рис.1а. Наиболее близким физическим аналогом виброизображения является термоизображение или тепловое изображение. Тепловое изображение человека, отображенное соответствующей псевдоцветовой температурной шкалой, приведено на рис. 1б.

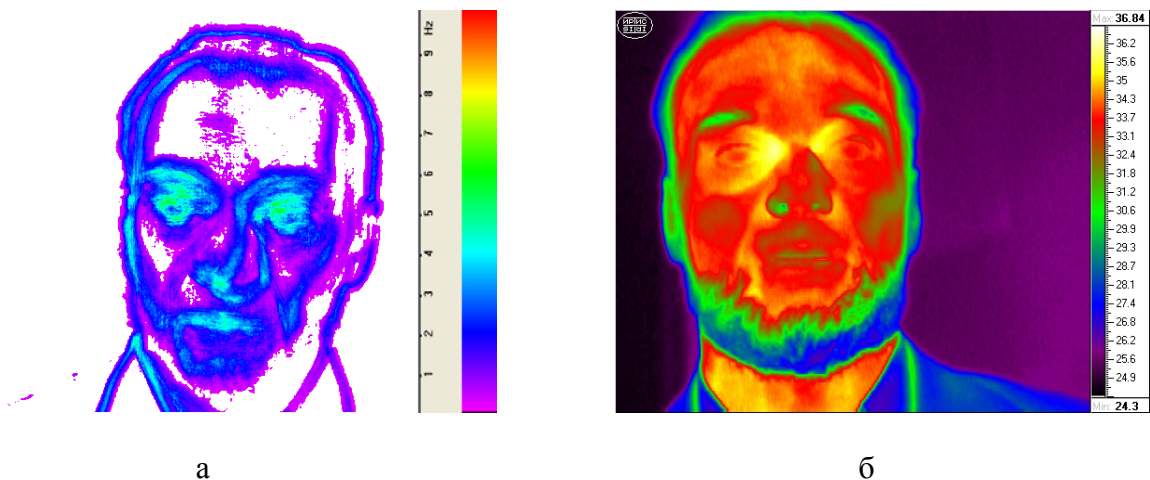


Рис.1. Виброизображение с частотной шкалой (а); тепловое изображение с температурной шкалой (б).

Амплитудное и частотное виброизображение

Значения амплитуды и частоты вибраций головы человека определяются в каждой точке пространства и выводятся на экран в виде псевдоцветового изображения. Интегральная обработка значений параметров вибрации в каждой точке может предоставить общую информацию о параметрах движения человека. Виброизображения головы человека, определенные по формулам (1) и (2) соответственно, приведены на

рисунках, отображающих амплитудное (рис. 2а) и частотное (рис. 2б) распределения вибраций.

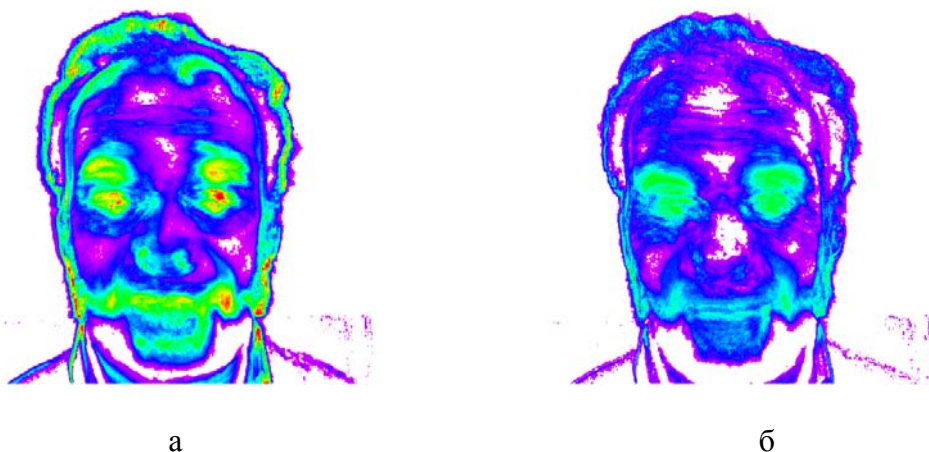


Рис. 2. Виброизображения головы человека, отображающие амплитудное (а) и частотное (б) распределения вибраций.

Каждая точка (пиксель) амплитудного виброизображения (рис. 2а) 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 амплитудного виброизображения 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. 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, достаточно похожих, первичных изображений, представляющих матрицы формата не менее 640x480x8, определяется более 20 интегральных параметров виброизображения, обладающих минимальной корреляцией между собой и разделенных на 4 основные группы параметров виброизображения (амплитуды, частоты, симметрии и обработки вибраций) [3].

Для повышения визуальной информативности первичных виброизображений разработанное программное обеспечение Vibraimage [10] в режиме реального времени преобразует амплитудное и частотное изображение во внешнее виброизображение, расположенное вокруг лица наблюдаемого пациента. Цвет данного внешнего виброизображения отражает максимальную частоту сигнала в строке, а размер внешнего виброизображения отражает среднюю амплитуду сигнала в строке. Получаемое внешнее виброизображение позволяет оператору одновременно получать информацию о частотной и амплитудной составляющих виброизображения, которые дополняют друг друга и повышают вероятность правильной идентификации функционального состояния человека.

Наряду с визуальной оценкой виброизображения программное обеспечение Vibraimage в режиме реального времени визуализирует гистограммы распределения частоты и амплитуды виброизображения, а также спектры быстродействующих сигналов виброизображения.

Частотная гистограмма

Частотная гистограмма показывает распределение частоты движения для всех точек изображения за определенный временной период (по умолчанию этот период равен 10 секундам). Примеры реальных гистограмм для различных психофизиологических состояний приведены на рис. 3а и 3б.

На нижних рисунках приведены гистограммы близкие к нормальному (Гауссовскому) распределению, они соответствуют нормальному психофизиологическому состоянию человека. На верхних графиках приведены частотные распределения (двумодальное и экспоненциальное), соответствующие определенной психофизиологической патологии. Было установлено, что в зависимости от эмоционального состояния и степени усталости, середина (математическое ожидание) распределения может значительно перемещаться по горизонтальной шкале частоты. Минимальным значениям распределения соответствуют состояния усталости и покоя, в возбужденном состоянии человека, при болевых ощущениях гистограмма распределения смещается в область высоких частот. Однако, если математическое ожидание гистограммы определяется психологическими характеристиками человека, то сама форма распределения более постоянна и зависит от физиологических факторов.

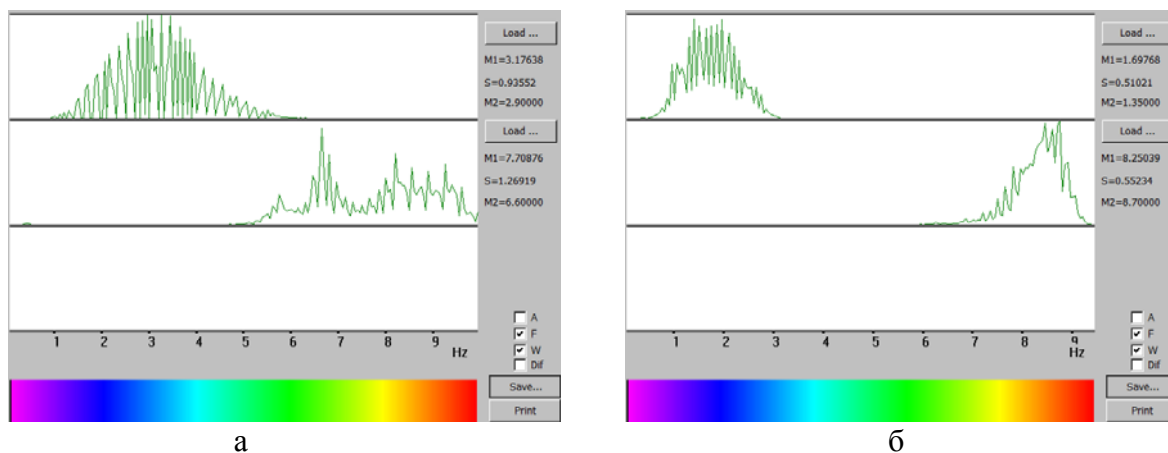


Рис. 3. Гистограмма (программное окно) распределения частоты вибраций для человека в нормальном психофизиологическом состоянии (верхний график 3а) и в патологическом психофизиологическом состоянии (нижний график 3а) получен у человека с сильной зубной болью.

Нижний график 3б получен у человека с повышенной температурой 38,5°C и явными признаками гриппа, верхний график 3б получен у человека с пониженной температурой 35,5°C после перенесенного гриппа.

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 психофизиологическое состояние человека. Спектр высокочастотных сигналов виброизображения (амплитуды и частоты) определяется с помощью быстрого Фурье преобразования (FFT) в режиме реального времени.

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

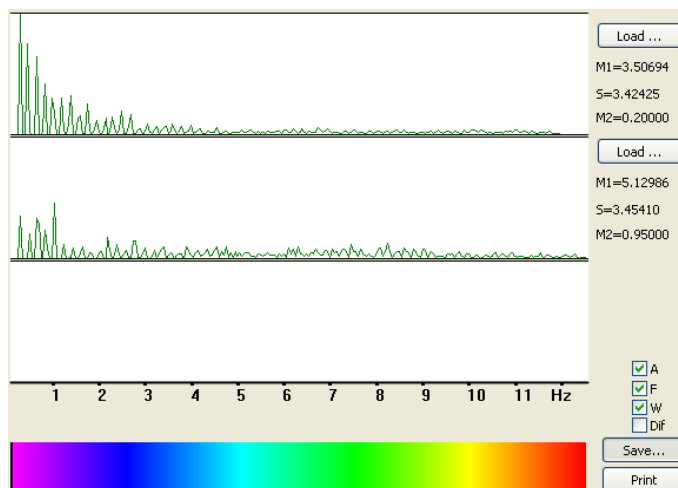


Рис. 4. Спектр сигнала виброизображения (программное окно) человека в нормальном состоянии (верхний график) и в тревожном состоянии (нижний график).

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 патологическом психофизиологическом состоянии представляет собой более сложную комбинацию из нескольких различных распределений.

Обсуждение

В настоящее время система виброизображения используется для выявления потенциально опасных пассажиров и обеспечения авиационной безопасности при контроле пассажиропотока в аэропортах. Система в автоматическом режиме определяет уровни агрессии, стресса и тревожности при наблюдении за человеком в течение не более 10 секунд и передает сигнал специалисту службы безопасности (профайлеру) в случае обнаружения агрессивного или потенциально опасного человека. По результатам предварительных испытаний, проведенных в аэропорту Пулково 2 (Санкт-Петербург) в соответствии с методикой, подготовленной ВИПК МВД России [11], вероятность ошибки выявления потенциально опасных пассажиров не превышает 8%.

Принципы кинесики (науки о движениях) [12] утверждают, что на координацию движений наряду с эмоциональным состоянием оказывает влияние и физиологическое состояние, причем выявить реальную причину патологии не так просто. При этом для решения большинства первичных задач в системах безопасности это и не требуется, достаточно выявить людей, находящихся в аномальном состоянии, далее с этими людьми можно проводить более тщательную работу. Аналогичные принципы применимы и в медицине, для лечения большинства заболеваний крайне важна ранняя диагностика, которая может сделать лечение заболевания более эффективным. Общеизвестно, что

одним из наиболее популярных показателей здоровья является температура тела, которая повышается при протекании большинства заболеваний. При этом, в некоторых случаях организм реагирует на заболевание повышением температуры тела слишком поздно для эффективного лечения. Вестибулярная система человека получает сенсорную информацию практически от всех частей тела человека, преобразует ее в движение, обеспечивающее поддержание равновесия, причем любой значимый сигнал приводит к моментальной реакции и нарушению равновесия. Таким образом, параметры микродвижения головы человека (прежде всего частота движения) могут считаться одним из основных индикаторов здоровья человека, наравне с температурой тела или ЧСС. Процесс терморегуляции и поддержания температуры носит интегральный характер и необходимо существенное изменение состояния организма для незначительного изменения температуры тела. Функционирование сердца определяется многими факторами, и изменение ритма сердца и ЧСС на начальной стадии заболевания маловероятно. Однако реакция вестибулярной системы на любые воздействия отличается высокой чувствительностью, что делает ее незаменимой для выявления слабых воздействий.

Простота применения системы виброизображения может сделать ее своеобразным техническим монитором здоровья, доступным для каждого компьютерного пользователя. Ведь для ее применения пользователю необходимо иметь (кроме компьютера с установленным программным обеспечением) обычную дешевую веб камеру. Конечно, простота применения системы виброизображения не исключает возможность ее применения и в профессиональной медицине для первичного мониторинга и ранней диагностики заболеваний. Предположительно, система виброизображения может применяться для выявления вестибулярных дисфункций, выявления психических заболеваний и различной функциональной патологии, прежде всего связанной с нарушением функционирования ЦНС. Предварительные исследования показали хорошие результаты по ранней диагностике болезни Альцгеймера, болезни Паркинсона и рассеянного склероза.

Выводы

Исследование возможности функциональной и физиологической диагностики состояния человека с помощью технологии и системы виброизображения представляется чрезвычайно актуальным и перспективным. Простота применения системы виброизображения создает предпосылки для проведения расширенных клинических испытаний системы и исследования вестибулярно-эмоционального рефлекса в различных медицинских направлениях без привлечения чрезмерных материальных затрат. Несмотря на многообещающие теоретические предположения, окончательные выводы о медицинских диагностических возможностях системы виброизображения предстоит сделать после проведения стандартных клинических испытаний.

Дискуссия по вопросу информативности движений человека представляется нам достаточно важной, так как выдающиеся ученые прошлого неоднократно обращались к этой теме. Нам представляется, что современное техническое развитие на данный момент позволяет преобразовать количественную информацию о рефлексных движениях человека в адекватную диагностику его здоровья.

Данная работа систематизирует результаты, полученные в ходе выполнения Государственного Контракта № 02.522.11.2010 по теме «Разработка технологии и создание средств обнаружения скрытно переносимых человеком опасных предметов и контроля его психоэмоционального состояния».

Литература:

1. Н.А.Бернштейн. Физиология движений и активность. М.: Наука, 1990. С. 373-392.
2. Е. Мира-и-Лопес. Графическая методика исследования личности. СПб.: Речь, 2002, 151с.
3. 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. СПб: Элсис, 2006.
4. В. А. Минкин. Виброизображение. СПб.: Реноме, 2007.
5. V. Minkin, L. Tims. Vibraimage. Encyclopedia of Human Thermodynamics, 2008, <http://humanthermodynamics.wetpaint.com/page/Vibraimage>
6. В.Т. Пальчун, С.Н.Деревянко. Тест высокочастотных активных колебаний головы в исследовании вестибулоокулярного рефлекса у здоровых лиц.// Вестник оториноларингологии. N 2-2000, стр. 4-8.
7. Н. А. Бернштейн. Биомеханика и физиология движений. МПСИ, 2004, 688 с.
8. Аттестат методов измерения параметров системы контроля психоэмоционального состояния человека (Шифр: VibraImage 6.1) ТКСФ.460329.003. СПб: Элсис, 2007.
9. US 5579045 Apparatus for detecting using a difference between first and second image signals. Sekine, et al.
10. В.А.Минкин, В.А.Акимов. Программное обеспечение по контролю психофизиологического состояния человека.
11. Н.Н. Анисимова. Инновационные технологии в сфере транспортной безопасности. Экспресс-информация, выпуск 2. РИО ВИПК МВД России, декабрь 2007.
12. Н.Н. Анисимова. Особенности визуальной диагностики личности террориста. Обнаружение криминального искажения информации. Учебно-методическое пособие. ВИПК МВД России, Домодедово, 2006.

Авторы:

1. Минкин Виктор Альбертович - Заместитель директора ООО МП «Элсис».
194223 Санкт-Петербург, пр. Гореза, 68.
Тел/факс: (812) 552 67 19.
E-mail: minkin@elsys.ru
2. Николаенко Николай Николаевич – д.м.н., профессор кафедры клинико-физиологических дисциплин Института специальной педагогики и психологии.
194356, г. Санкт-Петербург, ул. Озерная, 92.
Тел/факс: (812) 596 24 42.
E-mail: nikolaenko@nnick.mail.iephb.ru