

Е. М. АНОДИНА-АНДРИЕВСКАЯ, С. В. БОЖОКИН, М. Я. МАРУСИНА
Ю. З. ПОЛОНСКИЙ, Н. Б. СУВОРОВ

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ПОДХОДЫ К АНАЛИЗУ ИНФОРМАТИВНОСТИ ФИЗИОЛОГИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ И МЕДИЦИНСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ЧЕЛОВЕКА ПРИ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

Представлены современные подходы к оценке физиологических сигналов и томографических изображений человека при напряженной интеллектуальной деятельности. Сигналы регистрировались у профессиональных шахматистов во время игры вслепую с компьютерной программой, а также во время сеансов кардиореспираторного тренинга. Приведены материалы исследования информативности вейвлет-анализа многоканальной электроэнцефалограммы шахматистов, позволившего с высоким разрешением получить ее динамические спектральные характеристики во время обдумывания хода шахматной партии. Другая модификация вейвлет-анализа успешно применена для шумоподавления и обработки томограмм головного мозга.

Ключевые слова: интеллектуальная деятельность, психофизиологические показатели, вейвлетный анализ, томографические изображения.

Анализ комплекса психофизиологических показателей и формулирование научно-практических выводов — трудоемкий, ответственный процесс при диагностике текущего и прогнозе последующего состояний человека.

В задачах комплексной оценки функционального состояния человека при минимальной физической нагрузке и значительном умственном напряжении (например, операторов в системах управления) широко применяются биотехнические системы (БТС), позволяющие регистрировать и анализировать физиологические (*динамичные*) процессы. Качественные характеристики БТС зависят, в частности, от их состава и аналитических возможностей, которые должны обеспечивать быструю и достоверную переработку больших массивов информации.

Использование разработанных методов анализа, реализуемых аппаратно-программными средствами биотехнических систем, позволяет существенно расширить возможности медицинского и психофизиологического обследования и заметно снизить вероятность ошибок при оценке состояния оператора в реальном масштабе времени.

Интеллектуальная деятельность человека является одной из специфических и наиболее сложно организованных психических функций, и поэтому чрезвычайно сложна для инструментальных исследований. Как правило, изучаются электрофизиологические корреляты смоделированной умственной нагрузки. Практически идеальной формой творческого процесса представляется игра в шахматы, когда шахматист пребывает в состоянии реального (не имеющего аналогов) интеллектуального напряжения. Авторами создана уникальная БТС, при разработке которой было решено несколько принципиальных задач [1].

В качестве испытуемых выступали молодые шахматисты Санкт-Петербурга высокой квалификации — гроссмейстеры, мастера FIDE с рейтингом Эло до 2711. „Соперником“ шахматистов была выбрана компьютерная шахматная программа Deep Fritz 11 (рейтинг Эло программы 900—3000). Высокий профессионализм участников позволил проводить шахматные партии вслепую (с закрытыми глазами), что дало возможность минимизировать помехи при регистрации электроэнцефалограммы (21 канал), электрокардиограммы (ЭКГ с предплечий),

кардиоритмограммы (КРГ). Подобную регистрацию комплекса электрофизиологических параметров обеспечивал электроэнцефалограф „Мицар — ЭЭГ–202 (24+8)“, имеющий полосу пропускания от нуля до 150 Гц и диапазон измерений до 300 мВ (разработчик и производитель ООО „Мицар“, Санкт-Петербург, сертификат соответствия № РОСС RU.ИМ17.В00017). Помимо этого фиксировались функция дыхания и голос шахматиста, объявляющего свой ход, и „транслятора“, сообщающего о ходе, сделанном шахматной программой.

Шахматные партии протоколировались программой Deep Fritz. Каждый ход партии был синхронизирован с электрофизиологической „картиной“ — позиция на доске была „наложена“ на монитор с вышеуказанными показателями, создавался комплексный файл данных. После завершения партии анализировались записи ЭЭГ (частота квантования 500 Гц): функции когерентности в графическом и топографическом отображении, авто- и кросскорреляционные функции, диаграммы пространственно-временного взаимодействия 21 структуры головного мозга, координаты максимальной плотности распределения мозговых источников токов, взаимодействие кардиоритмограмм и кривых дыхания, индивидуальные особенности творчества испытуемых. На рис. 1 приведены спектры мощности ЭЭГ мастера ФИДЕ О. до партии — расслабленное бодрствование, глаза закрыты (*a*), непосредственно перед 35-м ходом — принятие решения (*b*). На графиках по оси абсцисс — частота колебаний ЭЭГ (Гц), по оси ординат — мощность (мкВ^2); на топограммах: слева — распределение двух гармоник по поверхности мозга, справа — шкала спектральной мощности.

Различия между фоном и одним из „критических“ моментов игры очевидны. Спектральная мощность системообразующего альфа-ритма частотой 8,3 Гц на фрагментах (исходный фон) в среднем по всем отведениям в несколько раз выше, чем при обдумывании хода и принятии решения, его частота на этих фрагментах превышает 10 Гц. И то, и другое — свидетельство умственного напряжения. Спектры мощности являются статической оценкой свойств ЭЭГ, полученной на ограниченном промежутке времени, и не позволяют оценить динамику гармонических компонентов биоэлектрического процесса. Значительно больший интерес представляет сопоставление умственного напряжения человека в ходе шахматной борьбы с внутренней динамикой психофизиологических феноменов.

Нестационарность большинства биологических сигналов ограничивает возможности их математического анализа и использования для целей управления состоянием человека (оператора) и, при необходимости, его психофизиологической коррекции. Обусловлено это не только особенностями происхождения и генерации биоэлектрических сигналов, но и внутренними переходными процессами, происходящими на разных уровнях интеграции и проявляющимися для „наблюдателя“ случайным образом. Один из самых непредсказуемых нестационарных биологических процессов нелинейного генеза — медленная электрическая активность головного мозга, отражением которой является электроэнцефалограмма.

Анализ ЭЭГ во время функциональных проб (фотостимуляция, гипервентиляция, психоэмоциональные тесты) показывает, что ее нестационарность в этих режимах носит вызванный характер, поэтому наряду с традиционными методами анализа стационарных процессов (спектральный, когерентный анализ и др.) необходимо развивать новые подходы [2—4].

Для исследования нестационарной ЭЭГ испытуемого во время проведения шахматной партии нами был разработан новый математический аппарат, адекватно описывающий детали перестроен пространственно-временных структур сигнала ЭЭГ [5, 6]. Этот аппарат использует теорию вейвлетов, включает анализ интегрального вейлет-преобразования и его скелетона, локальные плотности спектра энергии сигнала, спектральные интегралы и другие параметры, позволяющие вычислять большое число количественных параметров, описывающих переходные процессы в таких сигналах.

Вейвлет-преобразование является одним из перспективных способов анализа, очистки и сжатия различных видов сигналов. В работах [7—9] рассмотрены различные виды вейвлетов и проанализированы возможности их применения для вейвлетной очистки и сжатия сигнала.

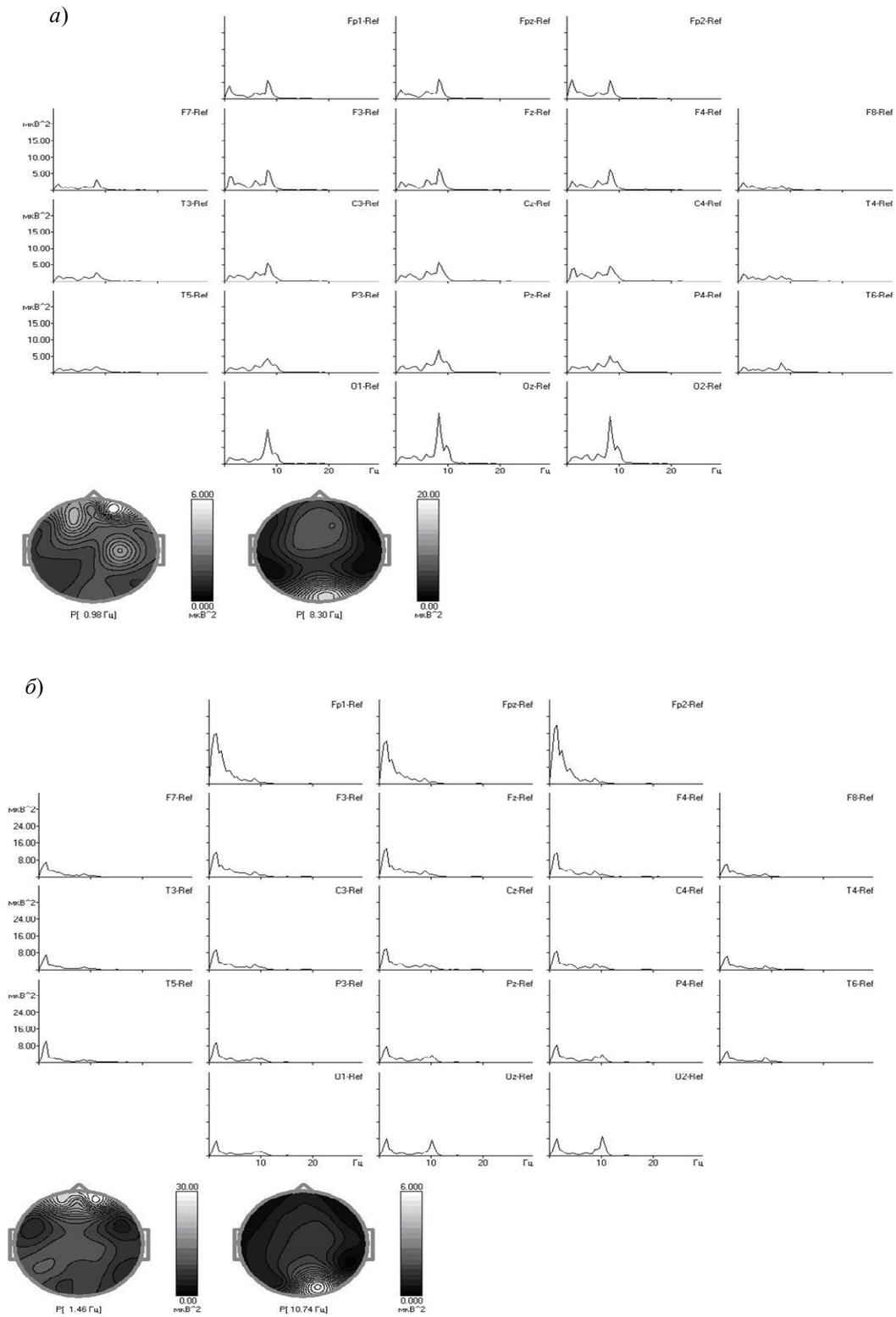


Рис. 1

Результаты очистки и сжатия были проанализированы по различным критериям с целью определения лучших (для решения данных задач) вейвлетов. В качестве этих

критериев выступают: отношение сигнал/шум между очищенным сигналом и наложенным шумом, коэффициент ковариации между очищенным и исходным сигналами, коэффициент корреляции между очищенным и исходным сигналами, уровень сжатия сигнала. В результате анализа были определены наиболее подходящие для очистки и сжатия сигнала вейвлеты (для вейвлетной очистки — это вейвлет Добеши, а для сжатия — обратный биортогональный вейвлет).

Представленные методы оценки могут быть использованы при решении задачи конструирования вейвлетных фильтров для очистки и сжатия сигнала.

Предлагаемый метод расчета корреляций различных каналов (отведений) ЭЭГ базируется на вычислении спектральных интегралов с помощью вейвлет-преобразования сигналов. Данный подход позволяет выполнить пространственно-временной анализ нарастания и угасания всплесков активности, возникающих в различных структурах коры головного мозга. Представляют интерес количественная оценка моментов резких перестроек частотных диапазонов для различных каналов ЭЭГ и их корреляционные взаимосвязи. Для расчета корреляций различных каналов нестационарной ЭЭГ во время шахматной партии рассмотрим спектральные интегралы $E_\mu(i, t)$ [5, 6], представляющие собой локальную плотность спектра энергии сигнала, проинтегрированную на интервале частот $[v_{\mu-1}, v_\mu]$, где величины v_μ ($\mu = 0, 1, 2, \dots$) характеризуют границы соответствующего частотного интервала μ , а индекс i соответствует номеру канала ЭЭГ.

С помощью спектральных интегралов $E_\mu(i, t)$ возможно осуществлять сжатие информации, хранящейся в сигнале, и анализировать динамику развития по времени t активности всплесков нестационарной ЭЭГ в данном спектральном диапазоне μ для данного канала i . Полагая v_0, v_1, \dots, v_4 равными 0,5; 4; 7,5; 14; 30 Гц и нормировав каждый спектральный интеграл на его максимальное значение, получаем значения спектральных интегралов $e_\mu(i, t)$, равные $e_\delta(i, t)$, $e_\theta(i, t)$, $e_\alpha(i, t)$, $e_\beta(i, t)$ соответственно в дельта- (δ), тета- (θ), альфа- (α) и бета-диапазонах (β) ЭЭГ, причем величина $e_\mu(i, t)$ изменяется в пределах $0 \leq e_\mu(i, t) \leq 1$.

Коэффициент корреляции Пирсона $\langle i | R_\mu | k \rangle$ между каналами i и k ЭЭГ, вычисленный в спектральном диапазоне $\mu = \delta, \theta, \alpha, \beta$, определяется следующим образом:

$$\langle i | R_\mu | k \rangle = \frac{\langle e_\mu(i, t) e_\mu(k, t) \rangle - \langle e_\mu(i, t) \rangle \langle e_\mu(k, t) \rangle}{\sqrt{(\langle e_\mu^2(i, t) \rangle - \langle e_\mu(i, t) \rangle^2)(\langle e_\mu^2(k, t) \rangle - \langle e_\mu(k, t) \rangle^2)}}$$

символы $\langle e_\mu(i, t) \rangle$ и $\langle e_\mu(i, t) e_\mu(k, t) \rangle$ означают усреднение соответствующих величин по всему промежутку времени наблюдения t .

Предлагаемые в настоящей статье коэффициенты корреляции Пирсона позволяют корректно решить задачу вычисления пространственной синхронизации переходных процессов ЭЭГ во всех спектральных диапазонах для всех каналов, а также получить принципиально новую информацию о динамике нестационарной ЭЭГ человека во время игры в шахматы с компьютерной программой.

На рис. 2 приведены нормированные на единицу спектральные интегралы, вычисленные в диапазоне альфа-ритма $e_\alpha(\text{Fr}2, t)$ (тонкая кривая) и $e_\alpha(\text{C}4, t)$ (жирная кривая) в отведениях Fr2 и C4, в зависимости от времени t в состоянии расслабленного бодрствования гроссмейстера перед началом шахматной партии (а), в конце обдумывания 17-го хода и принятия решения гроссмейстером В. (б). Рис. 2, а — коэффициент корреляции Пирсона для этих кривых $\langle \text{Fr}2 | R_\alpha | \text{C}4 \rangle = 0,173$, что указывает на слабую корреляцию сигналов ЭЭГ этих отведений в диапазоне альфа-ритма после процедуры сжатия инфор-

мации; $\bar{b} = \langle \text{Fr2} | R_\alpha | C4 \rangle = 0,905$ свидетельствует о высоком уровне синхронизации ЭЭГ этих отведений.

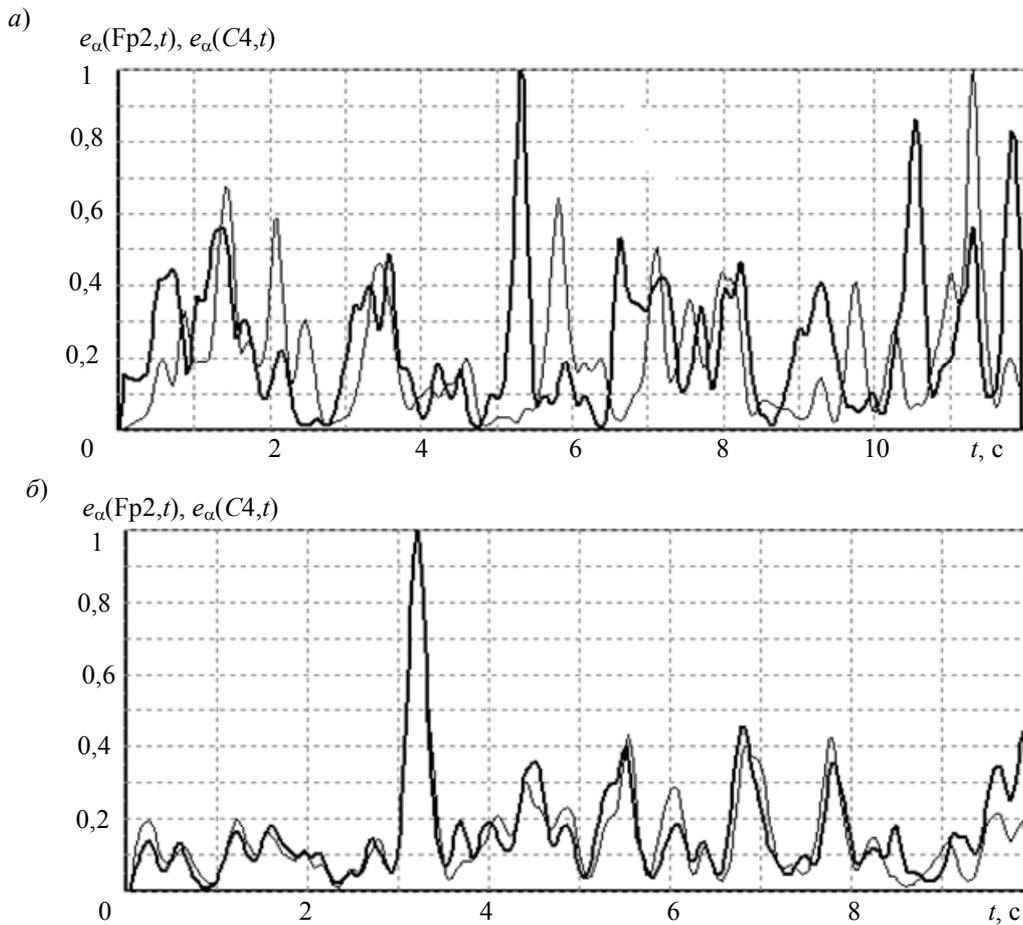


Рис. 2

Анализ рис. 2 показывает, что при переходе от состояния расслабленного бодрствования (перед началом партии) в состояние сильного умственного напряжения скоррелированность отведений Fr2 и $C4$ в диапазоне альфа-ритма сильно возрастает. Необходимо также отметить, что во время обдумывания шахматной позиции происходит активация взаимодействия лобно-центрально-височных структур коры головного мозга в диапазонах дельта-, тета- и альфа-ритмов.

Одним из перспективных направлений инструментальных исследований, в том числе интеллектуальной деятельности человека, в настоящее время является томография. Применение вейвлет-фильтров для анализа, очистки и сжатия томографических изображений является достаточно эффективным. В работах [7—10] систематизированы методы шумоподавления при обработке томографических изображений на основе вейвлетного анализа.

Для обработки томографических изображений (формат DICOM) с помощью методов вейвлетного анализа разработаны алгоритм шумоподавления и его программная реализация. Апробация методов была проведена на магнитно-резонансном томографе General Electric Signa Infinity в СПб ГУЗ „Городская Покровская больница“.

Анализ экспериментальных данных показал, что из рассмотренных в настоящей работе вейвлет-функций для решения задачи шумоподавления в томографии наиболее подходят вейвлет Мейера (dmeu) и модифицированный вейвлет Добеши. Наилучшие показатели шумоподавления достигаются при глубине разложения $N=2$. Результаты обработки данными вейвлетами при глубине разложения $N=2$ представлены на рис. 3 и 4.

Методы обработки изображений могут быть использованы для изучения работы вейвлетов при решении задачи обработки томографических изображений в технике. Результаты настоящей работы могут быть использованы также при конструировании фильтров, основанных на вейвлет-функциях.

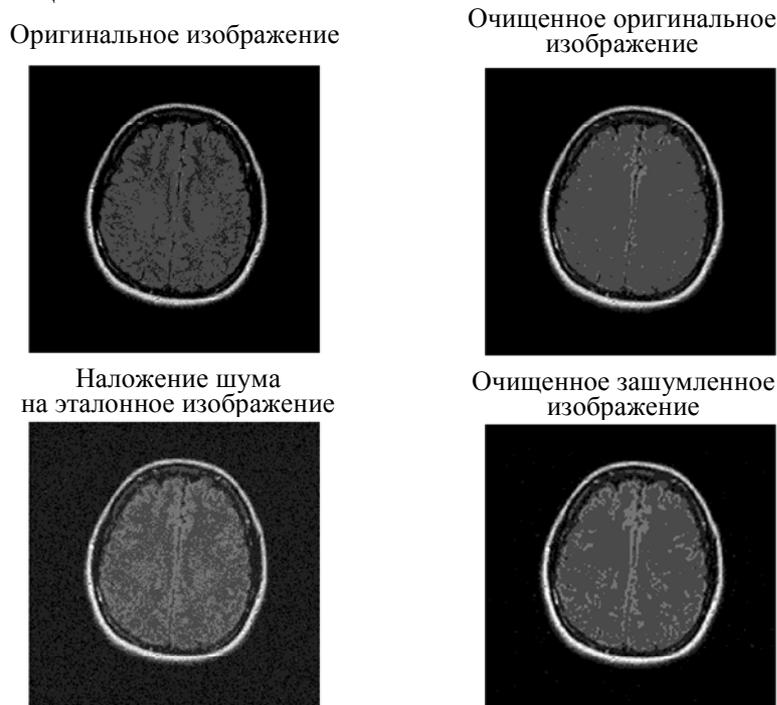


Рис. 3

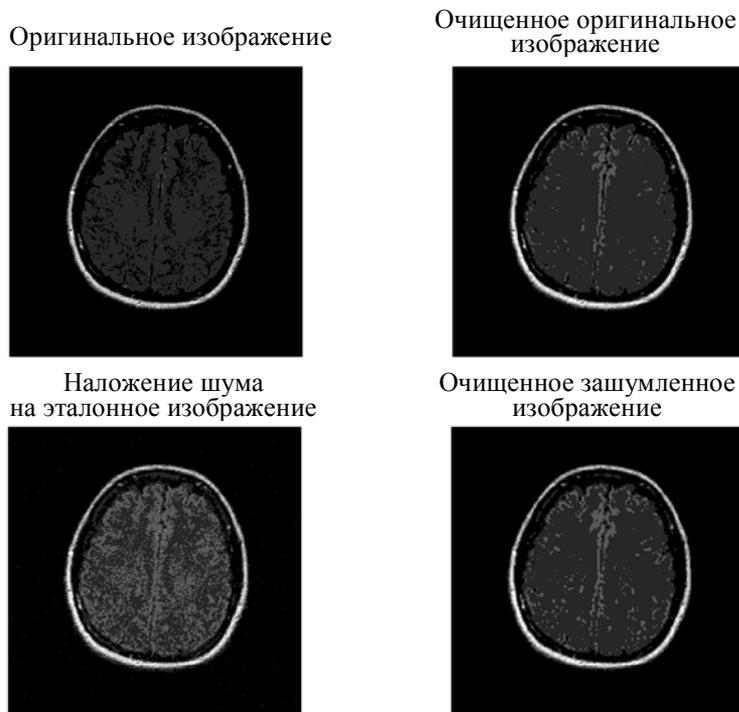


Рис. 4

В последние десятилетия активно разрабатываются и применяются методы нефармакологического воздействия на функциональное состояние человека, к которым относятся психотерапия, аутогенная тренировка, биоуправление с обратной связью (БОС). Последнее хорошо зарекомендовало себя как совокупность методов, направленных на мобилизацию

резервных возможностей организма за счет тренировки и повышения лабильности регуляторных механизмов. Основой тренировок в системах БОС являются биологические ритмы, играющие важную роль в их регулировании на молекулярном и клеточном уровнях, в функционировании механизмов памяти, в сфере энергетических и информационных процессов. В настоящее время под управлением с биологической обратной связью понимают комплекс исследовательских и лечебных процедур, в ходе которых испытуемому посредством внешней цепи обратной связи, организованной с помощью компьютерной или микропроцессорной техники, предъявляется информация о динамике тех или иных регулируемых физиологических процессов [11]. Процедуры позволяют в течение 10—15 сеансов при активном участии испытуемого (в интерактивном режиме) развить навыки саморегуляции и самоконтроля, произвести коррекцию собственного состояния.

Все обследованные шахматисты прошли курс респираторного кардиотренинга с колебательной обратной связью по кардиоритму с помощью дыхания [11, 12]. Цель — восстановление/приобретение навыка индивидуального для каждого человека стереотипа дыхания. Известно, что „гармонизация“ сердечного ритма, выражающаяся в респираторной синусовой аритмии (кардиореспираторная синхронизация в форме собственной гармоник), является благоприятным диагностическим и прогностическим признаком, одним из свидетельств вегетативного баланса. Обратная связь в ходе тренировки носит мотивационно-информационный характер и неизбежно активизирует когнитивные процессы, которые влияют на деятельность кардиореспираторной системы человека. Оценка этого влияния осуществляется широко известными методами вариационной пульсометрии. Одним из перспективных методов анализа кардиоритмограмм во временной области является скаттерограмма — зависимость последующего $RR_{(n+1)}$ интервала от предыдущего $RR_{(n)}$. Она отображается в виде точек на фазовой плоскости, последовательно во времени соединенных между собой. По форме скаттерограммы косвенно судят о вариабельности ритма сердца. По точкам, отстоящим далеко от основной группы, определяют наличие аритмий (нарушений ритма сердца) и артефактов. В диагностике нарушений сердечного ритма, при оценке функционального состояния испытуемого большое значение придается форме скаттерограммы. Количественной оценкой формы скаттерограммы может являться предложенный нами [11] фрактальный коэффициент, определяемый как

$$F = KL / 2\sqrt{\pi S},$$

где L — периметр внешнего контура скаттерограммы, S — ее площадь, K — коэффициент, величина которого зависит от средней частоты сердечных сокращений. Очевидно, что скаттерограммы могут иметь близкие формы в случае средних частот пульса и при этом их коэффициенты формы (фрактальные коэффициенты) также будут мало различаться между собой. На основании многочисленных собственных исследований авторов, подкрепленных литературными данными, были определены значения коэффициента K для различных средних частот сердечного ритма [11]. При такой оценке диагностически благоприятными с точки зрения биоритмологической структуры сердечного ритма будут низкие значения F .

Во время игры в шахматы вслепую значения F повышаются по сравнению со значением исходного состояния. При этом уровень повышения отражает степень умственного напряжения. Во время кардиореспираторного тренинга повышение F имеет временный характер и наблюдается только на начальном этапе тренировок. В дальнейшем, по мере нормализации вегетативного баланса и появления собственной гармоник, значение F снижается, поскольку внешний контур скаттерограммы приобретает овалообразную форму. Целью кардиореспираторного тренинга (не только шахматистов) является выработка умения кратковременно (в нужный момент) расслабляться за счет восстановленного или приобретенного собственного стереотипа гармоничного

дыхания. Этот навык важен как при напряженной интеллектуальной деятельности, так и при других видах нагрузок, включая стрессогенные.

Таким образом, были рассмотрены некоторые оригинальные технические решения и аналитические приемы, которые предлагается использовать для выявления информативных признаков физиологических показателей человека при интеллектуальной деятельности. Предложенные подходы являются разработкой, модификацией или адаптацией известных зарекомендовавших себя методов. Показана эффективность применения вейвлет-фильтров для повышения качества сигналов и изображений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Суворов Н. Б., Абрамов В. А., Козаченко А. В., Полонский Ю. З. Биотехническая система для исследования интеллектуальной деятельности человека // Информационно-управляющие системы. 2010. № 5. С. 70—77.
2. Чуи К. Введение в вейвлеты. М.: Мир, 2001.
3. Малла С. Вейвлеты в обработке сигналов. М.: Мир, 2005.
4. Божокин С. В., Лыков С. Н. Дополнительные главы теоретической физики. Вейвлеты. СПб: Изд-во СПбГПУ, 2007.
5. Божокин С. В. Вейвлет-анализ динамики усвоения и забывания ритмов фотостимуляции для нестационарной электроэнцефалограммы // ЖТФ. 2010. Т. 80, вып. 9. С.16—24.
6. Божокин С. В., Суворов Н. Б. Вейвлет-анализ переходных процессов электроэнцефалограммы при фотостимуляции // Биомедицинская радиоэлектроника. 2008. № 3. С. 21—25.
7. Анодина-Андриевская Е. М., Марусина М. Я. Использование вейвлетного преобразования сигналов при выявлении диагностических признаков элементов приборов и механизмов // Изв. вузов. Приборостроение. 2010. Т. 53, № 12. С.31—33.
8. Марусина М. Я., Анодина-Андриевская Е. М. Вейвлетный анализ в обработке томографических изображений // Научное приборостроение. 2011. Т. 29, № 1. С. 120—124.
9. Марусина М. Я., Казначеева А. О. Шумоподавление в томографии с помощью вейвлет-фильтров // Изв. вузов. Приборостроение. 2006. Т. 49, № 10. С. 51—57.
10. Марусина М. Я., Казначеева А. О. Современные виды томографии: Учеб. пособие. СПб: СПбГУ ИТМО, 2006. 152 с.
11. Суворов Н. Б. Информационная составляющая в биоуправлении функциональным состоянием человека // Информационно-управляющие системы. 2002. № 1. С.57—64.
12. Патент РФ № 43143. Устройство для осуществления функциональной психофизиологической коррекции состояния человека / Н. Б. Суворов. 2005. Бюл. № 1.

Сведения об авторах

- Елена Михайловна Анодина-Андриевская** — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра измерительных технологий и компьютерной томографии
- Сергей Валентинович Божокин** — канд. физ.-мат. наук, доцент; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра теоретической физики;
E-mail: bsvjob@mail.ru
- Мария Яковлевна Марусина** — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра измерительных технологий и компьютерной томографии;
E-mail: marusina_m@mail.ru
- Юрий Зусьевич Полонский** — д-р биол. наук; Институт мозга человека им. Н. П. Бехтеревой РАН, лаборатория стереотаксических методов, Санкт-Петербург; ведущий научный сотрудник; E-mail: yzpol @qip.ru

Николай Борисович Суворов

—

д-р биол. наук, профессор; НИИ экспериментальной
медицины РАМН, Санкт-Петербургский государственный
электротехнический университет, кафедра биотех-
нических систем; E-mail: nbsuorov@yandex.ru

Рекомендована кафедрой
измерительных технологий
и компьютерной томографии

Поступила в редакцию
01.03.11 г.

УДК 620.178