

Медицинская и биологическая кибернетика

УДК 681.3.06.14

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ФАЗАГРАФИИ — ИНФОРМАЦИОННОЙ ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ

Л.С. Файнзильберг

Международный научно-учебный центр информационных технологий и систем НАН Украины и МОН Украины (г. Киев)

Сформулированы основные свойства интеллектуальных информационных технологий обработки сигналов сложной формы. Показано, что основные функции метода фазаграфии соответствуют этим свойствам. Приведены новые научно-практические результаты использования программно-технического комплекса ФАЗАГРАФ® в детской кардиологии. Намечены перспективные пути развития технологии для решения актуальных прикладных задач.

Ключевые слова: фазаграфия, информационная технология, сигналы сложной формы, электрокардиограмма.

Сформульовано основні властивості інтелектуальних інформаційних технологій обробки сигналів складної форми. Показано, що основні функції методу фазаграфії відповідають цим властивостям. Наведено нові науково-практичні результати використання програмно-технічного комплексу ФАЗАГРАФ® в дитячій кардіології. Окреслено перспективні шляхи розвитку технології для вирішення актуальних прикладних задач.

Ключові слова: фазаграфія, інформаційна технологія, сигнали складної форми, електрокардіограма

ВВЕДЕНИЕ

Одно из перспективных направлений применения современных информационных технологий (ИТ) — диагностика состояния технических и биологических объектов. Обычно такие технологии основаны на компьютерной обработке сигналов, порождаемых объектом в процессе своего функционирования, которые несут информацию о его текущем состоянии.

Если такая информация равномерно «распределена» на интервале наблюдения, то для ее извлечения могут быть привлечены классические методы, в частности, ортогональные разложения сигнала по системе базисных функций [1], когда коэффициенты функционального ряда выступают в качестве диагностических признаков состояния объекта.

Компьютерная обработка существенно усложняется если диагностическая информация *сосредоточена* на небольших фрагментах

© Л.С. Файнзильберг, 2016

области определения сигнала. Примерами таких сигналов являются электрокардиограммы (ЭКГ) [2], магнитокардиограммы [3], реограммы [4] и другие физиологические сигналы, характерные участки которых несут информацию о состоянии сердечно-сосудистой системы организма. К таким сигналам относятся также термические кривые, по информативным фрагментам которых определяют свойства многокомпонентных материалов методом термического анализа [5]. Список подобных примеров можно было бы продолжить.

Ортогональные разложения по системе базисных функций малоприспособлены для обработки сигналов с локально-сосредоточенными признаками, поскольку коэффициенты функционального ряда, построенного на *всей* области определения, почти нечувствительны к *локальным* изменениям формы сигнала. Но именно такие изменения имеют диагностическую ценность.

Поэтому для анализа и интерпретации сигналов с локально-сосредоточенными признаками привлекаются специальные ИТ, которые в той или иной мере обладают свойствами интеллекта. Одна из таких технологий разработана в Международном научно-учебном центре информационных технологий и систем НАН Украины и МОН Украины и реализована в отечественном программно-техническом комплексе ФАЗАГРАФ® [6], который выпускается серийно.

Отличительная особенность технологии состоит в обработке сигнала в фазовом пространстве [7]. С легкой руки профессора И.П. Катеринчука, который один из первых применил комплекс ФАЗАГРАФ® в своих исследованиях [8], метод получил название *фазаграфия* и такой термин теперь уже находит отражение в публикациях других исследователей [9].

Цель статьи — сформулировать основные свойства интеллектуальных ИТ обработки сигналов сложной формы, продемонстрировать возможность практической реализации этих свойств на примере фазаграфии и наметить перспективы дальнейшего развития этой технологии.

ОСНОВЫ МЕТОДА ФАЗАГРАФИИ

Прежде чем переходить к дальнейшему изложению, оттолкнемся от изначального толкования термина «технология» [10] и введем такое определение.

Фазаграфия — это наукоемкая ИТ обработки сигналов разной физической природы, имеющих *сложную форму*, которая на основе цепочки интеллектуальных вычислительных процедур обеспечивает *переход* от наблюдаемого сигнала с *локально-сосредоточенными диагностическими признаками* (сырье технологии) к информации, ориентированной на конкретного пользователя (продукт технологии).

Отсюда следует, что главная *научная* задача метода фазаграфии направлена на выявление общих закономерностей указанных сигналов с целью определения и использования на практике наиболее эффективных вычислительных процедур, обеспечивающих такой переход [11].

В последнее время при решении прикладных задач все большее распространение получает новый класс ИТ — интеллектуальные ИТ, концепция построения которых была разработана в Украине еще в 90-х годах прошлого века [12]. В отличие от традиционных, интеллектуальные ИТ оперируют обобщенными понятиями — образами, которые дают более полную информацию о внешней среде, а анализ таких образов порождает целостную картину изучаемых явлений.

Для того, чтобы продемонстрировать интеллектуальные возможности фазаграфии, проанализируем размышления об естественном интеллекте, представленные в монографии [13].

На основе этого анализа и собственных представлений можно заключить, что интеллектуальная ИТ должна обладать, *по крайней мере*, такими свойствами:

- **адаптация** — способность *приспосабливаться* к изменяющимся ситуациям внешней среды;
- **обучаемость** — способность *улучшать* свои потребительские свойства по мере эксплуатации;
- **обобщение** — способность *распознавать* классы ситуаций внешней среды;
- **инвариантность** — *нечувствительность* к возмущениям внешней среды;
- **прогнозирование** — возможность восстанавливать общую картину и предсказывать *будущие* ситуации по наблюдению только частей (фрагментов) внешней среды;
- **понимание** — способность *осмысливать* действительность на основе сравнения текущих характеристик внешней среды с их прошлыми значениями;
- **гибкость** — *устойчивость* к возможным неудачам и способность коррекции принимаемых решений;
- **взаимозаменяемость** — использование *альтернативных* методов анализа внешней среды;
- **доступность** — способность предоставлять информацию в форме, *понятной* для восприятия *конкретным* пользователем с учетом его квалификации;

Разумеется, здесь идет речь об элементах так называемого «слабого» искусственного интеллекта, который, в отличие от «сильного», не претендует на такие фундаментальные понятия как самосознание и целеполагание [14].

Покажем, что фазаграфия обладает сформулированными выше свойствами, а значит может быть отнесена к интеллектуальной ИТ.

Следуя приведенному выше определению, главное назначение фазаграфии — извлечение диагностической информации из сигналов сложной формы. В основе технологии лежит обобщенная модель, предполагающая, что обрабатываемый сигнал $y(t)$ представляет собой

результат искажения *ненаблюдаемого* полезного сигнала $y_0(t)$ внешними аддитивными $h(t)$ и внутренними неаддитивными $\xi(t)$ возмущениями, т.е.

$$y(t) = \Phi[y_0(t), \xi(t)] + h(t), \quad (1)$$

где $\Phi[\cdot]$ — некоторая в общем случае неизвестная функция.

В свою очередь полезный сигнал $y_0(t)$ представляет собой последовательность фрагментов, заданных на интервалах $\Delta t_i \ll T_0$, где T_0 — область определения $y_0(t)$, причем только некоторые из этих фрагментов несут диагностическую ценность.

Не умаляя общности, рассмотрим детали такой модели на примере ЭКГ. В этом случае полезный сигнал $y_0(t)$ порождает электрическая активность сердца, внутреннее неаддитивное возмущение $\xi(t)$ создает система органов дыхания и вегетативная нервная система, а внешнее аддитивное возмущение $h(t)$ — сетевые электрические помехи, мышечный тремор тела пациента в местах наложения электродов и другие возмущения.

Согласно [2] полезный сигнал $y_0(t)$ представляет собой последовательность зубцов и сегментов изоэлектрической линии, которые отображают прохождение волны возбуждения по отдельным участкам сердечной мышцы (рис. 1).

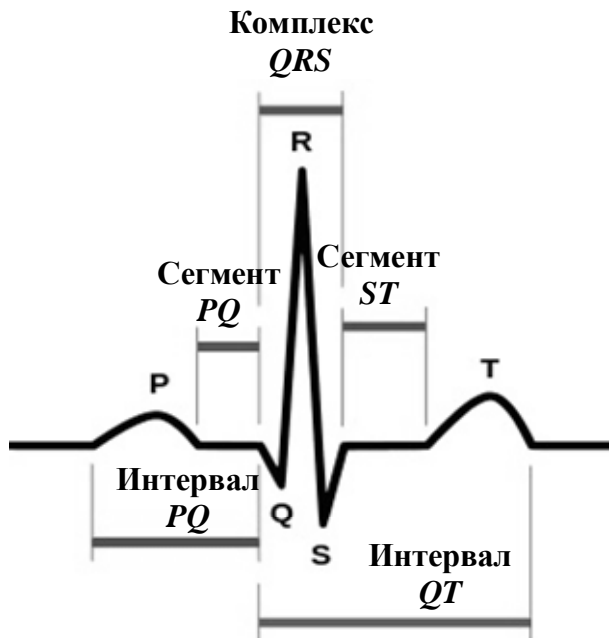


Рис. 1. Идеализированная форма цикла ЭКГ здорового человека

Зубец P образуется вследствие возбуждения предсердий. Сегмент PQ соответствует времени прохождения возбуждения по предсердно-желудочковому соединению. Комплекс QRS отражает сложный процесс

возбуждения (деполяризации) желудочков. Начальный зубец Q регистрируется во время возбуждения левой части межжелудочковой перегородки. Зубец R (чаще всего наиболее выраженный зубец ЭКГ) обусловлен возбуждением основной массы миокарда левого и правого желудочков. Зубец S в основном обусловлен возбуждением основания левого желудочка. Интервал ST называется конечной частью желудочкового комплекса и отражает реполяризацию желудочков. Он разделяется на сегмент ST , отражающий период угасания возбуждения желудочков, и зубец T , форма которого отражает процесс быстрой реполяризации желудочков.

Органические поражения и функциональные нарушения миокарда порождают характерные изменения формы указанных фрагментов ЭКГ. Например, основным электрокардиологическим признаком ишемии миокарда считается смещение сегмента ST вниз (депрессия) или вверх (элевация) относительно изоэлектрической линии. Поэтому главной целью ИТ обработки ЭКГ является распознавание и определение амплитудно-временных параметров указанных информативных фрагментов по сигналу, искаженному возмущениями.

Будем полагать, что математическая модель *ненаблюдаемого* полезного сигнала $y_0(t)$ представляет собой сумму несимметричных гауссовых функций

$$y_0(t) = \sum_i A_i \exp\left[-\frac{(t - \mu_i)^2}{2[b_i(t)]^2}\right], \quad (2)$$

в которых параметры A_i и μ_i определяют значения амплитуд и моментов времени, когда i -й фрагмент ($i \in \{P, Q, R, S, ST, T\}$) принимает экстремальные значения, а функция $b_i(t)$, определяемая выражением

$$b_i(t) = \begin{cases} b_i^{(1)} & \forall t \leq \mu_i, \\ b_i^{(2)} & \forall t > \mu_i, \end{cases} \quad (3)$$

позволяет описать несимметричные фрагменты при $b_i^{(1)} \neq b_i^{(2)}$, в частности, несимметричный зубец T при $b_T^{(1)} \neq b_T^{(2)}$.

В этом случае адекватную модель порождения последовательности *искаженных* ЭКГ-циклов, которые наблюдаются в реальных условиях, можно представить [15] в виде

$$y_m(t) = \sum_{i \in \{P, Q, R, S, ST, T\}} \tilde{A}_{im} \exp\left[-\frac{(t - \tilde{\mu}_{im})^2}{2[\tilde{b}_{im}(t)]^2}\right] + h(t), \quad m = 1, 2, \dots, M, \quad (4)$$

где M — общее число циклов,

$$\tilde{A}_{im} = A_i(1 + \alpha_{im}), \quad (5)$$

$$\tilde{\mu}_{im} = \mu_i(1 + \delta_{im}), \quad (6)$$

$$\tilde{b}_{im}(t) = \begin{cases} b_i^{(1)}(1 + \varepsilon_{im}^{(1)}) & \forall t \leq \mu_{im}, \\ b_i^{(2)}(1 + \varepsilon_{im}^{(2)}) & \forall t > \mu_{im}, \end{cases} \quad (7)$$

а

$$\alpha_{im} \in [-\alpha_i^0, \alpha_i^0], \delta_{im} \in [\delta_i^0, -\delta_i^0], \varepsilon_{im}^{(1)} \in [-\varepsilon_i^0, \varepsilon_i^0], \varepsilon_{im}^{(2)} \in [-\varepsilon_i^0, \varepsilon_i^0] \quad (8)$$

— реализации независимых случайных величин, которые с нулевыми математическими ожиданиями распределены на интервалах, ограниченных числами $\alpha_i^0, \delta_i^0, \varepsilon_i^0$.

Незначительные модификации позволяют обобщить стохастическую модель (4)–(8) для описания ЭКГ с нетипичными циклами (экстрасистолами и артефактами), а также другими особенностями, которые встречаются в реальных ситуациях [15].

Фазаграфия предусматривает решение обратной задачи, вытекающей из обобщенной модели (1), и реализует двухэтапный метод восстановления полезного сигнала (рис. 2). На первом этапе подавляются внешние аддитивные помехи $h(t)$, а на втором этапе по отфильтрованному сигналу проводится оценка $y_0(t)$.

Наши исследования показали, что при построении ИТ обработки сигналов с локально-сосредоточенными признаками для эффективного решения даже первой, казалось бы сравнительно простой задачи фильтрации аддитивных помех, потребовалось усовершенствовать известные алгоритмы частотно-избирательной фильтрации [16] и сглаживания случайных шумов [17].

Интеллектуальные свойства этих новых алгоритмов обеспечивают дополнительные поисковые процедуры, которые направлены на *автоматическое* определение по самому обрабатываемому сигналу оптимальных параметров настройки фильтров. Тем самым обеспечивается **адаптация** ИТ к конкретному сигналу, что повышает качество его обработки, а сами фильтры обладают определенной **гибкостью** и **взаимозаменяемостью**.

Инновационные методы пришлось привлечь и для решения второй задачи — восстановление полезного сигнала $y_0(t)$ по последовательности циклов, искаженных внутренними неаддитивными возмущениями $\xi(t)$. Для решения этой задачи традиционно применяют процедуру усреднения последовательности циклов во временной области [18].

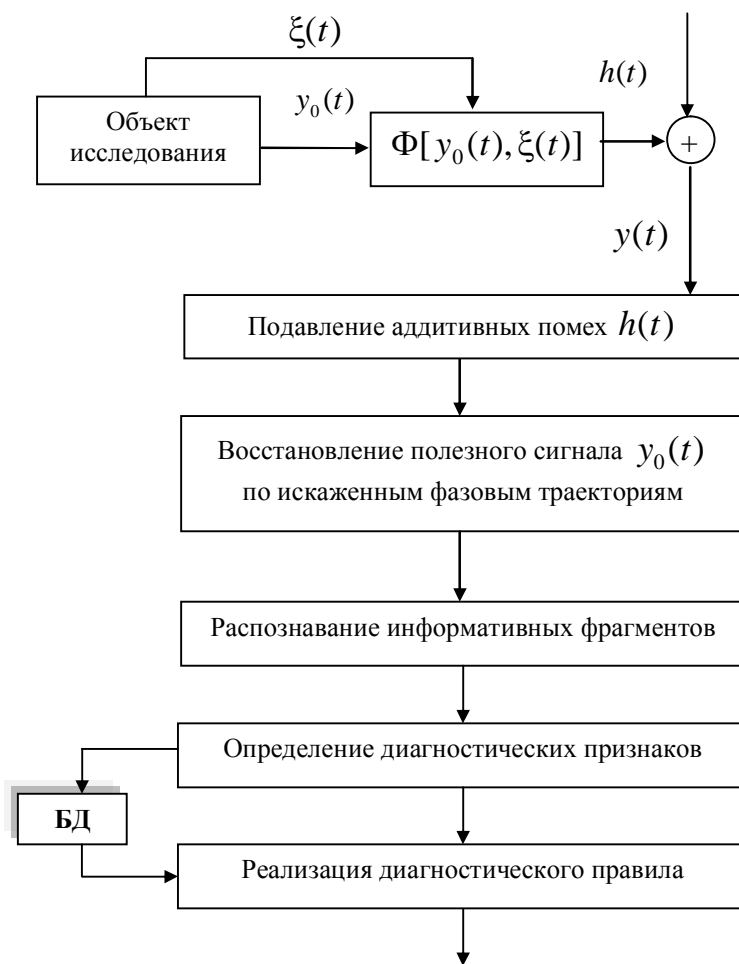


Рис. 2. Основные этапы метода фазографии

Однако, как следует из (6), случайные искажения δ_{im} приводят к несинхронности относительных моментов $\tilde{\mu}_{im}$ появления однотипных фрагментов на усредняемых циклах. Поэтому тривиальный метод усреднения во временной области неизбежно приводит к известной проблеме — размыванию формы информативных фрагментов, и, как следствие, к ошибкам в вычислении значений диагностических признаков.

Фазаграфия основана на более эффективном методе [19] — усреднении циклов на фазовой плоскости с координатами $y(t), \dot{y}(t)$, где $\dot{y}(t)$ — скорость изменения электрической активности сердца. Перед усреднением проводится автоматическое *распознавание* типичных и атипичных циклов с помощью оригинального метода анализа матрицы хаусдорфовых расстояний

$$R_H(Q_k, Q_m) = \max \left\{ \max_{q_k \in Q_k} \min_{q_m \in Q_m} \rho(q_k, q_m), \max_{q_m \in Q_m} \min_{q_k \in Q_k} \rho(q_k, q_m) \right\}, \quad (9)$$

между всеми парами фазовых траекторий Q_k и Q_m отдельных циклов ЭКГ, где $\rho(q_k, q_m) = \|q_k - q_m\|$ — евклидово расстояние между точками (нормированными векторами) $q_k = (y_k, \dot{y}_k) \in Q_k$ и $q_m = (y_m, \dot{y}_m) \in Q_m$, принадлежащими k -й и m -й траекториям на фазовой плоскости $y(t), \dot{y}(t)$.

Теоретические и экспериментальные исследования показали, что предложенный метод усреднения, предусматривающий автоматическое распознавание типичных и атипичных циклов (реализацию сформулированного выше свойства **обобщения**), существенно повышает точность вычисления локально-сосредоточенных диагностических признаков и открывает новые возможности для оценки *тонких* изменений сигнала, которые недоучитываются кардиологами при традиционной ЭКГ-диагностике.

Заметим, что отображение ЭКГ на фазовой плоскости $y(t), \dot{y}(t)$ *принципиально* отличает фазаграфию от других известных подходов [20], предусматривающих отображение ЭКГ на плоскости с координатах $y(t), y(t-\tau)$, где τ — задержка во времени. Именно такое отличие позволило расширить систему диагностических признаков, основанных на оценке скоростных характеристик процесса, в частности, *впервые* реализовать процедуру надежного определения показателя β_T , характеризующего симметрию фрагмента реполяризации усредненной фазовой траектории.

Поскольку дифференцирование зашумленных функций относится к числу некорректно поставленных математических задач, то для практической реализации метода фазаграфии привлекаются специальные вычислительные процедуры [11].

Клинические испытания подтвердили, что оценка дополнительного диагностического признака (показателя β_T) повышает чувствительность и специфичность ЭКГ-диагностики даже в тех случаях, когда анализ ЭКГ в 12-ти традиционных отведениях оказывается неинформативным [6].

Заметим, что ЭКГ с нормальными и патологическими значениями β_T практически неразличимы во временной области, но при переходе на фазовую плоскость их распознавание становится возможным (рис. 3).

Фазаграфия использует оригинальный подход к реализации свойства **понимания** обрабатываемой ЭКГ: диагностические решения опираются *не только* на сравнения текущих значений показателей с популяционными нормами, но и с учетом *персонафицированной* нормы конкретного пациента [21]. С этой целью в технологии реализована функция постоянной коррекции (**обучения**) и сохранения в базе данных (БД) персональных норм всех зарегистрированных пользователей.

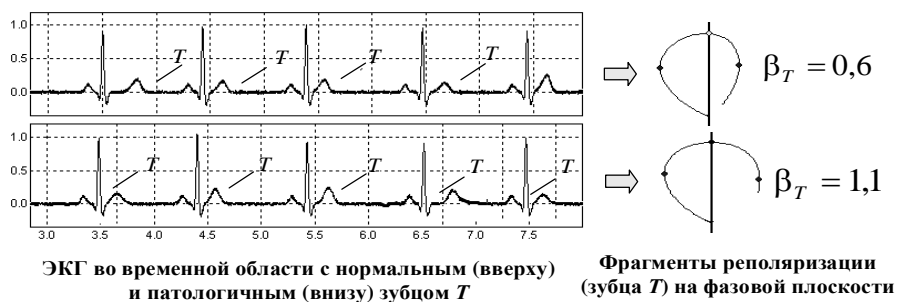


Рис. 3. Анализ показателя β_T во временной области и на фазовой плоскости

И, в итоге, в фазаграфии реализован **доступный** язык общения: результат интерпретации одной и той же ЭКГ по-разному предоставляется пользователям разной квалификации (рис. 4). Так врач-кардиолог получает подробную информацию с отображением обнаруженных отклонений (рис. 4, а), а пациенту, не имеющему специального медицинского образования, результат предоставляется в упрощенном виде на индикаторе (рис. 4, б), который понятными графическими образами и голосовыми сообщениями сигнализирует о текущем функциональном состоянии по отношению к его *персональной* норме.

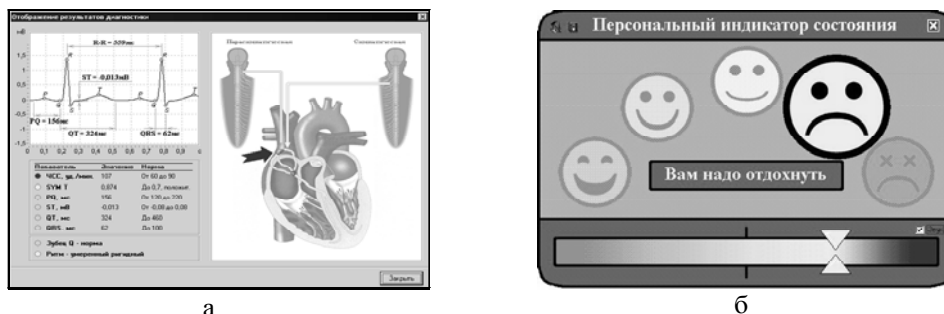


Рис. 4. Интеллектуальные интерфейсы ИТ:

а — врача-кардиолога, б — пациента, не имеющего медицинского образования

В фазаграфию включен также целый ряд других интеллектуальных процедур, которые подробно описаны в монографии [7]. Одна из таких процедур обеспечивает **прогнозирование** будущих состояний конкретного пациента на основе мониторинга и определения тенденций изменения его показателей.

Интересно, что именно эта процедура позволила автору статьи обнаружить *закономерные* изменения индекса напряжения (ИН) по Баевскому после резкой отмены курения (рис. 5): средние значения ИН, вычисленные за годовые периоды (по 300 измерений) до и после отмены курения, составили $ИН = 273 \pm 180$ у.е. и $ИН = 104 \pm 62$ у.е. соответственно, т.е. *уменьшились почти в три раза!*

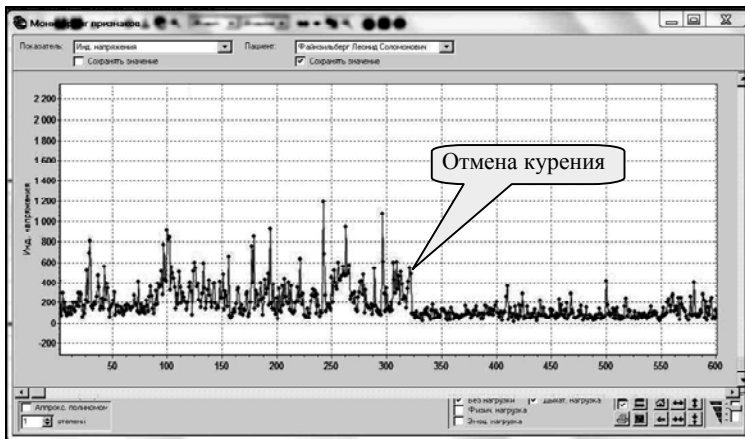


Рис. 5. Мониторинг индекса напряжения (ИН) до и после отмены курения

РЕЗУЛЬТАТЫ ПРИМЕНЕНИЯ ФАЗАГРАФИИ В ДЕТСКОЙ КАРДИОЛОГИИ

Поскольку обобщенные результаты апробации метода фазаграфии, предшествовавшие организации серийного производства комплекса ФАЗАГРАФ[®], подробно описаны в монографии [7], а опыт его использования независимыми исследователями представлен в статье [22], ограничимся здесь лишь краткой информацией о применении метода фазаграфии в новой области — *детской кардиологии*.

Актуальность таких исследований несомненна. В последнее время наблюдается рост сердечной патологии и даже внезапная сердечная смерть детей и подростков, которые ранее считались практически здоровыми. Одна из причин сердечно-сосудистой патологии — метаболические нарушения, которые приводят к избыточной массе тела ребенка.

Для изучения возможности применения фазаграфии при оценке поражения миокарда у детей с кардиометаболическим синдромом проводились клинические исследования в трех группах:

- 129 учащихся гимназии № 178 г. Киева (54 девочек и 75 мальчиков, средний возраст — $11,51 \pm 2,85$ г.);
- 92 школьника гимназии № 59 г. Киева (44 девочек и 48 мальчиков, средний возраст — $13,91 \pm 0,88$ г.);
- 16 подростков, которые находились на стационарном лечении в Городской клинической больнице № 6 г. Киева по поводу избыточной массы тела (ИМТ).

С помощью комплекса ФАЗАГРАФ[®] определялись частота сердечных сокращений (ЧСС), интервалы PQ и QT , ширина и глубина зубца Q , продолжительность комплекса QRS , смещение сегмента ST , амплитуда и симметрия зубца T (показатель β_T), стандартные показатели variability сердечного ритма (BCP).

Обработка клинических данных показала [23]: у детей с избыточной массой тела патологические значения показателя β_T встречаются чаще

($p < 0,05$), чем у их ровесников, что может использоваться при скрининговых обследованиях школьников в качестве дополнительного маркера кардиометаболического риска.

Вторая причина нарушений сердечно-сосудистой системы у детей — сахарный диабет, который характеризуется быстрым развитием осложнений, приводит к ранней инвалидизации и становится одной из причин смертности пациентов во взрослом возрасте. Для изучения возможностей фазографии в задаче ранней диагностики сердечно-сосудистых осложнений у детей с сахарным диабетом проводились клинические обследования на двух группах:

- 83 ребенка с сахарным диабетом 1 типа (средний возраст — $11 \pm 3,6$ лет), которые находились на стационарном лечении в Городском эндокринологическом отделении Детской клинической больницы № 6 Шевченковского района г. Киева;

- 95 практически здоровых школьников гимназии № 59 г. Киева (45 девочек и 50 мальчиков, средний возраст — $13,84 \pm 0,53$ лет). Условиями отбора детей в контрольную группу были: благополучный семейный анамнез, отсутствие острых и хронических заболеваний, а также каких-либо жалоб на момент проведения обследования.

На основании этих обследований установлены статистически достоверные ($p < 0,05$) отличия ряда показателей ЭКГ и ВСР, в том числе среднеквадратические отклонения (СКО) показателя β_T и продолжительностей RR -интервалов (показателя $SDNN$) на последовательности из 100 ЭКГ-циклов [24].

Предложено пороговое решающее правило, позволяющее при скрининговых обследованиях методом фазографии по совокупности показателей СКО β_T и $SDNN$ выявлять группы риска детей и подростков с диабетической кардиопатией (ДКП), которые требуют дальнейших углубленных обследований (табл. 1).

Таблица 1.

Схема принятия решений при скрининге диабетической кардиопатии

Значения диагностических показателей		Решение
СКО β_T , у.е	$SDNN$, у.е	
$\leq 0,062$	$\geq 46,5$	Норма
$> 0,062$	$\geq 46,5$	Низкий риск ДКП
$\leq 0,062$	$< 46,5$	Низкий риск ДКП
$> 0,062$	$< 46,5$	Высокий риск ДКП

Метод фазографии позволил также подтвердить положительное влияние постоянных уроков плавания в бассейне при организации учебного процесса в начальной школе. Было обследовано 82 ученика трех начальных школ г.Киева, которые были разбиты на две группы:

- 38 детей (средний возраст $8,16 \pm 0,2$ лет), которые посещали один обязательный урок плавания в неделю и два традиционных урока физического воспитания;

- 44 ребенка (средний возраст $8,79 \pm 0,12$ лет), которые трижды в неделю посещали уроки физического воспитания, но не посещали бассейн (контрольная группа).

В обеих группах с помощью комплекса ФАЗАГРАФ® до и после уроков физического воспитания и плавания оценивали показатели ЭКГ и вариабельности сердечного ритма (ВСР) по 5-минутным записям ЭКГ.

Установлено [25], что школьники, которые регулярно посещают бассейн, находились в состоянии вегетативного равновесия и удовлетворительной адаптации к нагрузке: симпато-вагусный баланс LF/HF был в пределах 0,5–1,0 у.е., а значения показателя β_T не превышал порог 0,72. У школьников же контрольной группы, которые не посещали бассейн, статистически достоверно ($p < 0,05$) преобладал тонус симпатического звена вегетативной нервной системы ($LF/HF > 1,0$) с одновременным повышением показателя β_T ($\beta_T > 0,72$).

Приведенные примеры еще раз подтверждают, что комплекс ФАЗАГРАФ® является удобным и надежным средством для выполнения скрининговых обследований и может быть успешно использован не только для взрослого населения, но и в детской кардиологии.

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ФАЗАГРАФИИ

Принимая во внимание положительный опыт применения метода фазаграфии, наметим некоторые возможные пути развития этого метода для решения новых прикладных задач. Можно выделить два направления такого развития:

- в «глубину» — повышение достоверности диагностических решений в кардиологии за счет разработки и реализации новых функций ИТ;
- в «ширину» — реализация задач интеллектуальной обработки других сигналов с локально-сосредоточенными признаками.

Важную дополнительную информацию о состоянии сердечно-сосудистой системы можно получить, используя метод фазаграфии при анализе динамики изменения показателей ЭКГ и ВСР при различных внешних воздействиях (рис. 6).

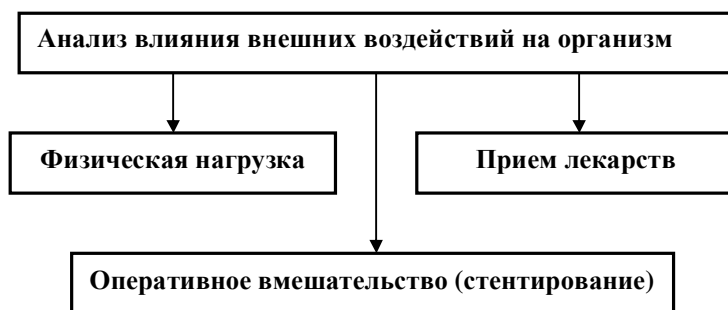


Рис. 6. Перспективные исследования фазаграфии в кардиологии

Такие исследования запланировано провести совместно с Научно-практическим центром профилактической и клинической медицины Государственного управления делами. Для повышения качества исследований предполагается включить в состав ИТ *дополнительные* программные модули, которые реализуют

- новый подход к анализу динамики изменения хаотичности временных рядов на основе различных энтропийных оценок;
- оригинальный метод формирования когнитивных графических образов, отражающих адекватную и неадекватную реакцию организма на внешнее воздействие.

Интересно, что основная идея метода фазографии — переход от временного сигнала к его отображению на фазовой плоскости оказывается полезной и для анализа динамики изменения хаотичности временных рядов. В самом деле, последовательность показателей, наблюдаемых в процессе исследования, можно «просканировать» скользящим окном шириной K_0 точек и в каждом l -м окне ($l=1, \dots, L$) вычислить относительное приращение шенноновской энтропии

$$H_l = \frac{-\sum_{j=1}^n p_{jl} \log p_{jl}}{H_1} \cdot 100 \% , \quad (10)$$

где p_{jl} — частота попадания значений временного ряда, наблюдаемых в l -м окне, в j -й интервал значений ($j=1, \dots, n$), определяемых заданным порогом δ , а

$$H_1 = -\sum_{j=1}^n p_{j1} \log p_{j1} \quad (11)$$

— энтропия, вычисленная в первом (опорном) окне.

При оптимальной настройке ширины окна K_0 и порога δ нечувствительности к локальным изменениям сигнала процедура (10) обеспечивает формирование плавной последовательности $H(l)$ из L точек, которую можно анализировать не только во временной области, но и на фазовой плоскости $H(l), \dot{H}(l)$, где $\dot{H}(l)$ — оценка первой производной $H(l)$ в l -ой точке (рис. 7).

Аналогичным образом могут быть построены и фазовые портреты аппроксимационной и перестановочной энтропий, индекса Херста и других оценок хаотичности временных рядов [26].

Предварительные исследования показали, что фазовые портреты энтропии имеют ряд характерных признаков, по которым можно различать

здоровых и больных пациентов, а также оценивать уровень тренированности испытуемого¹.

Важный инструмент интеллектуальных ИТ — когнитивная компьютерная графика, которая позволяет либо сразу увидеть решение задачи, либо получить подсказку для его нахождения. Такие возможности когнитивной графики прежде всего обусловлены тем, что человеческий мозг (в отличие от компьютера) гораздо легче воспринимает и интерпретирует графический образ, чем породившие его числовые данные. Поэтому, если удачно представить данные исследований в виде когнитивного графического образа, то при анализе такого образа решение может быть принято без сложных вычислений.

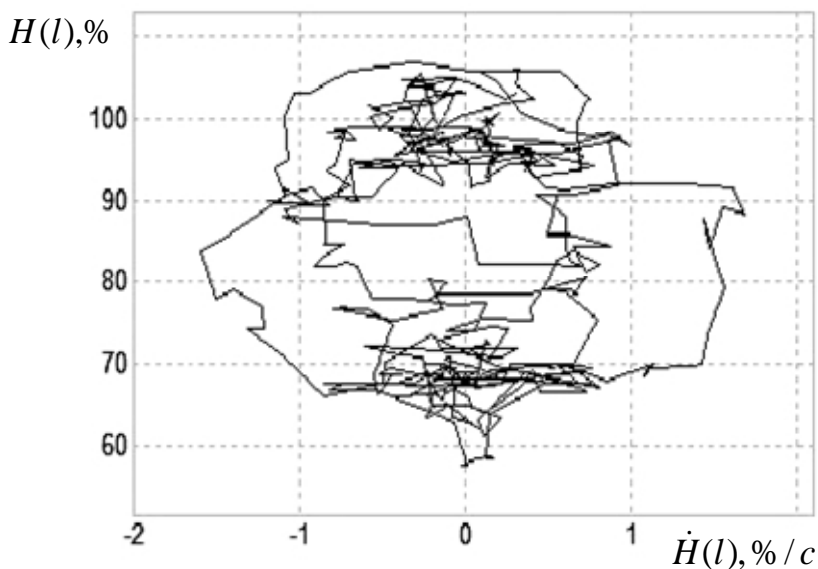


Рис. 7. Фазовый портрет последовательности энтропий $H(l)$, $l=1, \dots, L$

Принимая во внимание эту особенность когнитивных графических образов, разработан оригинальный метод оперативной оценки адекватности реакции организма на нагрузку, основанный на *качественном* анализе формы графических паттернов, которые отражают динамику показателей ЭКГ и ВСП в трех состояниях — покой, нагрузка и отдых.

На основании предварительных исследований, проведенных в группах практически здоровых лиц, определены формы эталонных паттернов показателей ЭКГ и ВСП здорового человека. В результате, решения о толерантности сердечно-сосудистой системы к нагрузке можно принимать на основе сопоставления текущих паттернов и эталонных [27].

Несложная процедура модификации данных обеспечивает совместимость форм эталонных паттернов для построения когнитивного графического образа, который *интегрально* несет информацию об

¹ Идею проведения таких исследований предложила Е.Н.Минина

адекватности реакции на нагрузку: достаточно определить число паттернов, имеющих выпуклость вверх (рис. 8).

Очевидно, что для повышения эффективности профилактической медицины необходимы надежные и доступные средства, которыми пациент может пользоваться при обычном способе жизни, *самостоятельно* оценивать свое функциональное состояние и *накапливать* данные для последующих консультаций с врачом. Поэтому актуальная задача — реализация метода фазаграфии на *мобильных* средствах (смартфон, планшет), которые способны не только надежно регистрировать ЭКГ в *любых* условиях, но и обеспечивать виртуальную связь пациента и врача через Интернет. Общая идея реализации такой перспективной технологии представлена в статье [28].

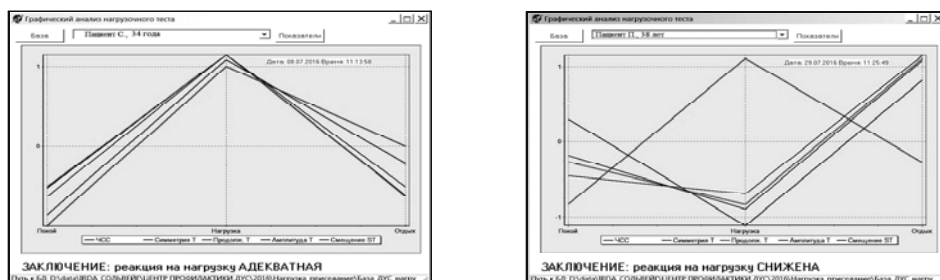


Рис. 8. Когнитивные графические образы при адекватной (слева) и неадекватной (справа) реакции на нагрузку

Очевидно также, что метод фазаграфии разумно привлечь для интеллектуальной обработки не только ЭКГ, но и других сигналов с локально-сосредоточенными признаками. Краткое описание некоторых примеров таких сигналов представлено в таблице 2.

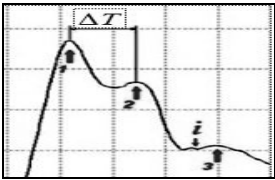
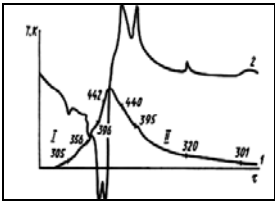
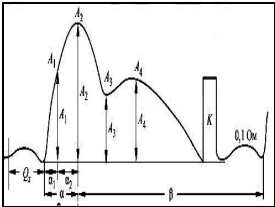
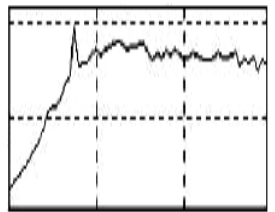

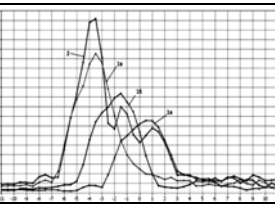
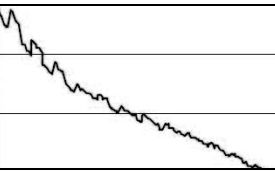
Применение фазаграфии при анализе и интерпретации этих и других подобных сигналов откроет путь к построению новых интеллектуальных ИТ для получения дополнительной информации не только в медицинской практике, но и в других областях.

Еще одно перспективное направление — применение фазаграфии для *биометрической идентификации личности* [29]. Наши многолетние наблюдения позволили установить, что

- фазовые портреты ЭКГ, подобно отпечаткам пальцев, имеют характерные особенности, присущие конкретным лицам, в том числе угол ориентации внешней петли, относительный размер внутренней петли и некоторые другие интегральные характеристики (рис. 9);
- эти особенности практически не изменяются на протяжении длительного периода (более 10-ти лет наблюдений), если, конечно, в этот период не произошли грубые органические поражения миокарда.

Таблица 2.

Примеры сигналов с локально-сосредоточенными признаками

Название	Вид сигнала	Информативные фрагменты	Информация
Пульсовая волна		Всплески отраженной волны	Диагностика атеросклероза и эластичности сосудов
Термическая кривая		Термические эффекты фазовых превращений	Определение свойств материала
Реограмма		Амплитуды систолической и диастолических волн	Исследование кровоснабжения различных органов
Кривая биогемилюминисценции		Участки изменения интенсивности свечения	Дифференциальная диагностика злокачественных и воспалительных процессов
Спирограмма		Амплитудно-временные параметры дыхательной кривой	Диагностика легочных патологий
Эхо-сигнал дефектоскопа		Амплитудно-временные параметры локальных экстремумов	Обнаружение внутренних дефектов в изделиях
Сигнал электрического сопротивления кожи		Всплески, отражающие кожно-гальванические реакции	Оценка психофизиологического состояния человека

Как видно из рис. 9, у одних людей эти признаки существенно разнятся, у других — лишь незначительно. Разумеется, не исключены ситуации, когда фазовые портреты различных людей будут практически неразличимы. Следовательно, не так уж просто разработать систему или обучить эксперта безошибочной идентификации конкретного человека на основе сопоставления его фазового портрета с эталоном, хранимым в базе данных. По крайней мере, решение такой задачи можно отнести лишь к *дальней* цели.

В то же время в качестве *ближней* цели можно попытаться решить более простую задачу. На основе некоторой системы признаков относить фазовый портрет к определенному классу (число таких классов можно задать не очень большим) и проводить лишь *верификацию* личности, т.е. сопоставлять *класс* текущего фазового портрета, с тем, который, подобно группе крови, соответствует этому лицу. При несовпадении этих классов можно с высокой вероятностью утверждать об отрицательном результате верификации и принимать соответствующие решения.

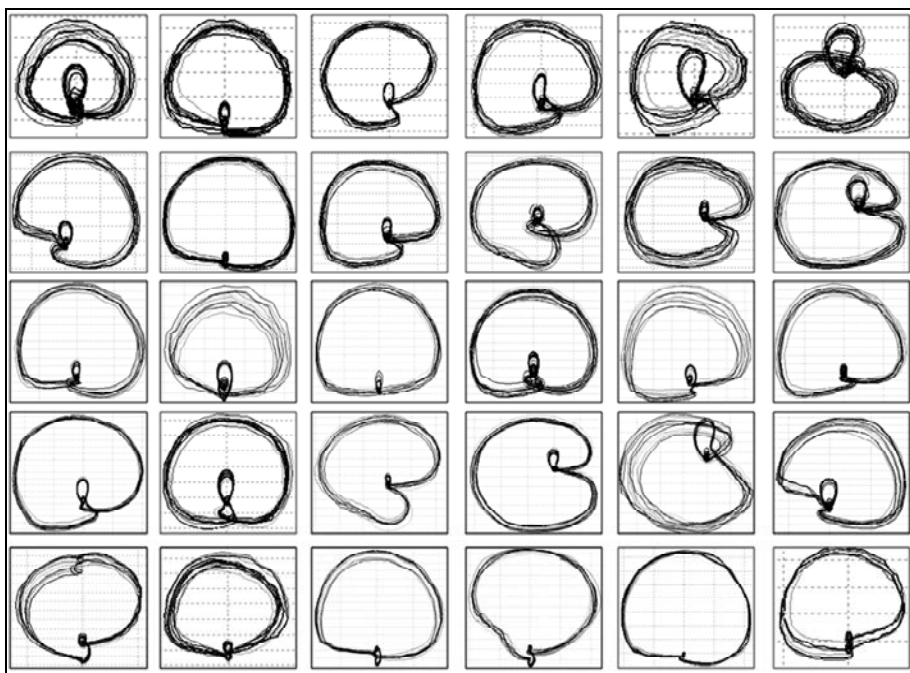


Рис. 9. Фазовые портреты ЭКГ 30 разных людей

Таким образом, возможности фазографии как интеллектуального метода обработки сигналов далеко еще не исчерпаны и могут быть использованы для решения актуальных научных и прикладных задач не только в медицине, но и в других областях приложения.

Выводы

Фазография представляет собой наукоемкую ИТ обработки сигналов разной физической природы, имеющих сложную форму, которая на основе

цепочки интеллектуальных вычислительных процедур обеспечивает переход от наблюдаемого сигнала с локально-сосредоточенными признаками (сырье технологии) к информации, ориентированной на конкретного пользователя (продукт технологии).

Сформулированы основные свойства интеллектуальной ИТ. Интеллектуальные свойства фазаграфии подтверждены тем, что технология реализует:

- оригинальные процедуры подавления аддитивных помех, которые обеспечивают **адаптацию** к обрабатываемому сигналу, **инвариантность** принимаемых решений к внешним возмущениям и обладают определенной **гибкостью** и **взаимозаменяемостью**;
- оригинальный подход к восстановлению полезного сигнала по последовательности искаженных траекторий в фазовом пространстве, который предусматривает классификации типичных и нетипичных циклов и тем самым реализует свойство **обобщения**;
- инновационный метод формирования диагностических решений (**понимания** анализируемой среды), основанный на оценке *персональной* нормы пациента за счет постоянного **обучения** по накопленным данным;
- **прогнозирование** состояния сердечно-сосудистой системы на основе мониторинга динамики изменения показателей ЭКГ и ВСР;
- **доступный** язык общения, который обеспечивает предоставление информации в форме, удобной для восприятия пользователями разной квалификации;

Возможности фазаграфии как интеллектуального метода обработки сигналов далеко еще не исчерпаны опытом применения в кардиологической практике (в том числе, в детской кардиологии) и могут быть использованы для решения других актуальных научных и прикладных задач.

1. Омельченко В.О. Ортогональні розклади випадкових сигналів і полів. К.: УМКВО. 1991. 142 с.
2. Мурашко В.В., Струтинский А.В. Электрокардиография. Москва, 1991. 288 с.
3. Примин М.А., Недайвода И.В. Васильев В.Е. Новые алгоритмы обработки магнитокардиосигнала. *УСiМ*. 1998. № 2. С.48–62.
4. Ронкин М.А., Иванов Л.Б. Реография в клинической практике. М.: НМФ МБН, 1997. 250 с.
5. Пилоян Г.О. Введение в теорию термического анализа. Москва, 1964. 231 с.
6. Гриценко В.И., Файнзильберг Л.С. Информационная технология ФАЗАГРАФ® для интегральной оценки состояния сердечно-сосудистой системы по фазовому портрету электрокардиограммы. *Врач и информ. технологии*. 2013. № 3. С.52–63.
7. Файнзильберг, Л.С. Компьютерная диагностика по фазовому портрету электрокардиограммы. Киев, 2013. 191 с.
8. Катеринчук И.П., Борисенко Н.В. Варіабельність ритму серця та вегетативна дисфункція у хворих з метаболічним синдромом. *Аритмологія*. 2012. № 3(3). С. 6–13.
9. Павличенко П.П. Влияние игровой нагрузки на функциональное состояние профессиональных футболистов. *Світ медицини та біології*. 2015. № 1(48). С. 49–54.
10. Словарь С.И.Ожегова. URL: <http://ozhegov-online.ru/slovar-ozhegova/tehnologiya/34888/>
11. Файнзильберг Л.С. Информационные технологии обработки сигналов сложной формы. Теория и практика. Киев, 2008. 333 с.

12. Гриценко В.І. Інтелектуалізація інформаційних технологій. *Наука і технології*. Київ: Ін-т кібернетики ім. В.М. Глушкова НАН України, 1992. С. 4–9.
13. Хокінс Д., Блейксли С. Об интеллекте. М., СПб, К.: Вильямс, 2007. 128 с.
14. Preston J., Bishop M. Views Into the Chinese Room: New Essays on Searle and Artificial Intelligence. Oxford, 2002. 410 p.
15. Файнзильберг Л.С. Имитационные модели порождения искусственных электрокардиограмм в условиях внутренних и внешних возмущений. *Journal of Qafqaz University. Mathematics and Computer Science*. 2012. № 34. С. 92–104.
16. Fainzilberg L.S., Glushauskene G.A. Narrow-band Rejection Filter for Suppression of Harmonic Concentrated Interference on the Basis of Discrete Fourier Transform. *Journal of Automation and Information Sciences*. 2009. Vol. 41. Issue 8. P. 55–70.
17. Файнзильберг Л.С. Адаптивное сглаживание шумов в информационных технологиях обработки физиологических сигналов. *Математичні машини і системи*. 2002. № 3. С. 96–104.
18. Zywiencz C., Borovsky D., Goettsch G. & others Methodology of ECG Interpretation in the Hanover Program. *Meth. Inf. Med*. 1990. N. 29. P. 375.
19. Гриценко В.І., Файнзильберг Л.С. Компьютерная диагностика по сигналам сложной формы в условиях внутренних и внешних возмущений. *Доповіді Національної академії наук України*. 2013. № 12. С. 36–44.
20. Фрумин Л.Л., Штарк М.Б. О фазовом портрете электрокардиограммы. *Автометрия*. 1993. № 2. С. 51–54.
21. Спосіб персоніфікованого оцінювання функціонального стану серцево-судинної системи людини: пат. 112325 Україна. Бюл. № 16, 2016 р.
22. Файнзильберг Л.С. Оценка эффективности применения информационной технологии ФАЗАГРАФ® по данным независимых исследований. *УСУМ*. 2014. № 2. С. 84–92.
23. Майданник В.Г., Хайтович Н.В., Файнзильберг Л.С. и др. Симметрия зубца Т на электрокардиограмме как маркер кардиометаболического риска у школьников. *Международный журнал педиатрии, акушерства и гинекологии*. 2013. Т. 4. № 3. С. 35–39.
24. Морозик А.А. Файнзильберг Л.С. Диагностическая значимость сочетанного анализа электрокардиосигнала на фазовой плоскости и variability ритма сердца у детей с диабетической кардиопатией. *Международный журнал педиатрии, акушерства и гинекологии*. 2015. Т. 7. № 1. С. 11–17.
25. Кондратюк О.С., Гаркавий С.І., Коршун М.М. и др. Оцінка функціонального стану учнів початкової школи в динаміці уроків фізичного виховання та плавання. *Гігієна населених місць*. 2014. Вип. 64. С. 302–308.
26. Файнзильберг Л.С., Ориховская К.Б., Ваховский И.В. Оценка хаотичности формы фрагментов одноканальной электрокардиограммы. *КВТ*. 2016. Вып. 183. С. 4–24.
27. Спосіб оцінювання адекватності реакції організму на навантаження: пат. 103229 Україна. Бюл. № 23, 2015 р.
28. Файнзильберг Л.С., Сорока Т.В. Разработка телемедицинской ситемы для дистанционного мониторингирования сердечной деятельности на основе метода фазаграфии. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2015. № 6/9(78). С. 37–46.
29. Спосіб ідентифікації особистості за електрокардіограмою: пат. 105273 Україна. Бюл. № 8, 2014 р.

INTELLECTUAL CAPABILITIES AND PERSPECTIVES FASEGRAPHY DEVELOPMENT — INFORMATION TECHNOLOGY OF COMPLEX FORM SIGNAL PROCESSING

L.S. Fainzilberg

International Research and Training Center for Information Technologies and Systems of the National Academy of Sciences of Ukraine and Ministry of Education and Science of Ukraine

Introduction. Recently, a new class of information technologies (IT) — intelligent IT is widespread which, unlike traditional, operate generalized concepts — images, and provide more complete information about the external environment. One of the tasks requiring the involvement of intelligent IT — analysis and interpretation of complex form signals with a locally-focused information.

The purpose of the article is — to formulate the basic properties of intelligent IT complex form signal processing, demonstrate the ability to implement these features on the example of the innovative method fasegraphy and outline prospects for further development of this technology.

Methods. Fasegraphy is a high IT which is processing different complex form signals of physical nature, which, basing on a chain of intelligent computational procedures, enables the transition from the observed signal with a locally-focused features (raw material for technology) to information which is focused on a particular user (technology product). The main task of the scientific method fasegraphy aims to detect general laws of indicated signals to identify and use in practice the most effective computational procedures that can ensure this transition.

Results. Basic properties of intelligent IT — adaptation, learning, generalization, invariance, forecasting, understanding, flexibility, interoperability, accessibility have been formulated. Analysis of computational procedures chain in fasegraphy method, that provide a transition from the actually observed signals to technology product, shows that the method has all of the above properties, and therefore fasegraphy can be referred to intelligent ITs.

New results have been presented from fasegraphy usage in pediatric cardiology and outlined prospects for the development of this method in two ways — by increasing the reliability of decision making in single-channel ECG and realization of intelligent processing tasks of other signals with locally-focused features.

Conclusions. Fasegraphy intelligent capabilities are far from exhausted and can be used to solve actual scientific and applied problems not only in cardiology but also in other applications.

Keywords: fasegraphy, information technology, complex shape signals, electrocardiogram.

1. Omelchenko V.O. Orthogonal expansions of random signals and fields. Kiev: UMKVO. 1991. 142 p. (in Ukrainian).
2. Murashko V.V., Strutynsky A.V. Electrocardiography. Moscow, 1991. 288 p. (in Russian).

3. Primin M.A., Nedajjvoda I.V., Vasilev V.E. New algorithms for magnetokardiosignal processing. *Control systems and machines*. 1998. № 2. P.48–62. (in Russian).
4. Ronkin M.A., Ivanov L.B. Rheography in clinical practice. Moscow: SMC MBN, 1997. 250 p. (in Russian).
5. Piloian G.O. Introduction to Thermal Analysis. Moscow, 1964. 231 p. (in Russian).
6. Gritsenko V.I., Fainzilberg L.S. FASEGRAPH® — information technology for the integrated assessment of the cardiovascular system state of the electrocardiogram phase portrait. *Information technologies for the Physician*. 2013. № 3. P.52–63. (in Russian).
7. Fainzilberg L.S. Computer diagnostics by phase portrait of electrocardiogram. Kiev, 2013. 191 p. (in Russian).
8. Katerinchuk I.P., Borisenko N.B. Heart rate variability and autonomic dysfunction in patients with metabolic syndrome. *Arrhythmology*. 2012. № 3(3). P. 6–13. (in Ukrainian).
9. Pavlichenko P.P. The influence of the playing load on the functional status of professional football players. *World of medicine and biology*. 2015. № 1(48). P. 49–54. (in Russian).
10. Ozhegov vocabulary. URL: <http://ozhegov-online.ru/slovar-ozhegova/tehnologiya/34888/>
11. Fainzilberg L.S. Information technology for signal processing of complex shape. Theory and practice. Kiev, 2008. 333 p. (in Russian).
12. Gritsenko V.I. Intellectualization of Information Technologies. *Science & Technology*. Kiev: V.M. Glushkov Institute of Cybernetics of NAS of Ukraine, 1992. P. 4–9. (in Ukrainian).
13. Hawkins D., Blakeslee S. On intelligence. Moscow, St. Petersburg, Kiev, 2007. 128 p. (in Russian).
14. Preston J., Bishop M. Views Into the Chinese Room: New Essays on Searle and Artificial Intelligence. Oxford, 2002. 410 p.
15. Fainzilberg L.S. Simulation models of generating artificial cardiograms in terms of internal and external disturbances. *Journal of Qafqaz University — Mathematics and Computer Science*. 2012. № 34. P. 92–104. (in Russian).
16. Fainzilberg L.S., Glushauskene G.A. Narrow-band Rejection Filter for Suppression of Harmonic Concentrated Interference on the Basis of Discrete Fourier Transform. *Journal of Automation and Information Sciences*. 2009. Vol. 41. Issue 8. P. 55–70.
17. Fainzilberg L.S. Adaptive smoothing of noise in information technology processing of physiological signals. *Mathematical Machines and Systems*. 2002. № 3. P. 96–104. (in Russian).
18. Zywienc C., Borovsky D., Goetsch G.& others Methodology of ECG Interpretation in the Hanover Program. *Meth. Inf. Med*. 1990. N. 29. P. 375.
19. Gritsenko V.I., Fainzilberg L.S. Computer diagnostics using complex-form signals under conditions of internal and external disturbances. Reports of the National Academy of Sciences of Ukraine. 2013. № 12. P. 36–44. (in Russian).
20. Frumin L.L., Shtarck M.B. About ECG phase portrait. *Avtometriya*. 1993. № 2. P. 51–54. (in Russian).
21. Fainzilberg L.S. A method of personalized assessment of functional state of human cardiovascular system. UA Patent 112325. 2016. Bul. 16. (in Ukrainian).
22. Fainzilberg L.S. The Performance Evaluation of Information Technology FASEGRAPH® According to the Independent Studies. *Control systems and machines*. 2014. № 2. P. 84–92. (in Russian).
23. Maydannik V.G., Khaitovych N.V., Fainzilberg L.S. & others The symmetry of the T-wave on the electrocardiogram as a marker of cardiometabolic risk in schoolchildren. *International Journal of Pediatrics, Obstetrics and Gynecology*. 2013. T. 4. № 3. P. 35–39. (in Russian).
24. Morozik A.A., Fainzilberg L.S. Diagnostic value of electrocardiosignal combined analysis on phase plane and heart rate variability in children with diabetic cardiomyopathy. *International Journal of Pediatrics, Obstetrics and Gynecology*. 2015. B. 7. № 1. P. 11– 17. (in Russian).
25. Kondratiuk A.S., Garkaviy S.I., Korshun M.M. & others. Evaluation of primary school pupil's functional state in physical education classes and swimming lessons dynamics. *Hygiene of settlements*. 2014. № 64. P. 302–308. (in Ukrainian).

26. Fainzilberg L.S., Orikhovska K.B., Vakhovskyi I.V. Assessment of chaotic fragments shape of the single-channel electrocardiogram. *Cybernetics and computer engineering*. 2016. № 183. P. 4–24. (in Russian).
27. Fainzilberg L.S. Method of evaluating the adequacy of reaction to load // UA Patent 103229. 2015. Bul. 23. (in Ukrainian).
28. Fainzilberg L.S., Soroka T.V. Development of telemedicine system for remote monitoring of heart activity based on fasegraphy method. *East Europe Journal of Enterprise Technologies*. 2015. № 6/9(78). P. 37–46.
29. Fainzilberg L.S. Method for person identification by electrocardiogram // UA Patent 105273. 2014. Bul. 8. (in Ukrainian).

Получено 27.09.16