

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Айфичер Э.С., Джервис Б.У. Цифровая обработка сигналов: практический подход. 2-е изд. – М.: Вильямс, 2008. – 992 с.
2. Тихонов В.И. Статистическая радиотехника. – М.: Советское радио, 1966. – 680 с.
3. Lee Y.W. Statistical Theory of Communication. – New-York: John Wiley & Sons, Inc., 1960. – 288 p.
4. Способ частотно-временного корреляционного анализа цифровых сигналов: пат. 2405163 Рос. Федерация. № 2009118627/28; заявл. 18.05.09; опубл. 27.11.09, Бюл. № 33. – 10 с.
5. Аврамчук В.С., Чан Вьет Тъяу. Частотно-временной корреляционный анализ цифровых сигналов // Известия Томского политехнического университета. – 2009. –Т. 315. – № 5. – С. 112–115.
6. Аврамчук В.С., Яковлева Е.М. Применение решетчатых периодических функций в спектральном анализе узкополосных периодических сигналов // Известия Томского политехнического университета. – 2006. – Т. 309. – № 7. – С. 40–44.
7. Способ спектрального анализа многочастотных периодических сигналов, представленных цифровыми отсчетами: пат. 2229140 Рос. Федерация. № 2003108753/28; заявл. 28.03.03; опубл. 20.05.04, Бюл. № 14. – 6 с.
8. Способ спектрального анализа сложных несинусоидальных периодических сигналов представленных цифровыми отсчетами: пат. 2229139 Рос. Федерация. № 2002133542/28; заявл. 10.12.02; опубл. 20.05.04, Бюл. № 14. – 9 с.

Поступила 17.09.2012 г.

УДК 519.87

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ И ИНФОРМАЦИОННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ В ОЦЕНКЕ СОСТОЯНИЯ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ МЕДИЦИНСКИХ СИСТЕМ

О.М. Геррет, В.А. Кочегуров

Томский политехнический университет

E-mail: Olgagerget@mail.ru

*Обсуждается проблема использования энергетических и информационных показателей для оценки состояния здоровья биообъекта. Изучена динамическая биосистема, которая характеризуется входом, выходом и вектором состояния, изменение которого обеспечивается обменными энергетическими процессами, происходящими внутри и поддерживаемыми поступлением энергии извне. Рассмотрены методы, позволяющие осуществить индивидуализированный подход к принятию решения в задачах практической медицины.*

### Ключевые слова:

*Математические методы, доказательная медицина, энергетические показатели, энтропия, здравоохранение.*

### Key words:

*Mathematical methods, evidence-based medicine, energy indicators, entropy, health service.*

### Введение

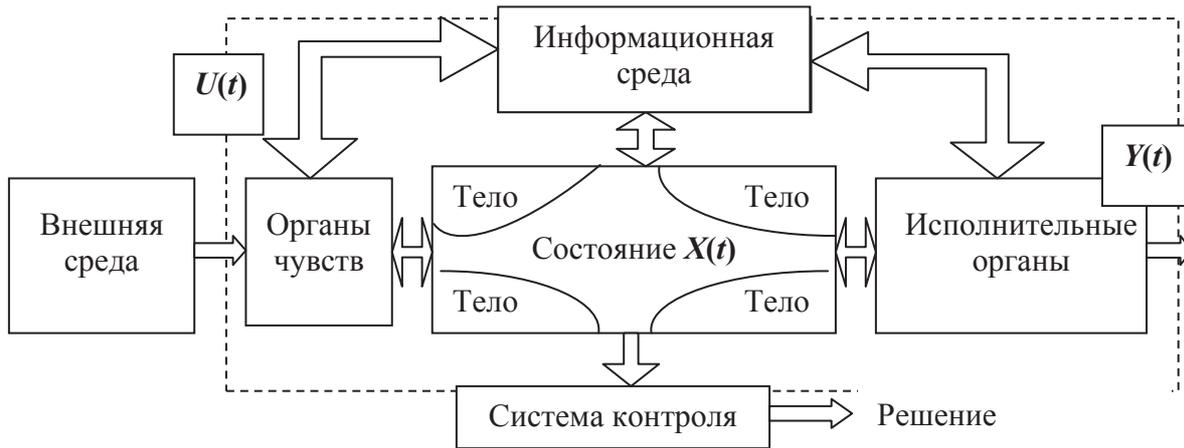
В настоящее время широко обсуждаемыми в научной общественности проблемами в области медицины являются: доказательная медицина и медицина будущего.

В каждой из перечисленных выше проблем можно выделить по два направления. В первой – выявление закономерностей развития в исследуемых объектах и индивидуализированная оценка состояния каждого объекта [1]. Решения задач доказательной медицины могут быть получены только с использованием математических методов. Для выявления закономерностей развития, как правило, широко используются статистические методы, позволяющие определить траекторию функционирования однородных объектов. Однако в большинстве случаев они не дают возможности выявить причинно-следственные связи, которые очень важны в доказательном подходе. Во второй – создание современного инструментария для профилактики здоровья и соответствующих средств лечебно-восстановительной терапии [2].

Обе проблемы и их направления важны и требуют дополнительного исследования. В данной статье более подробно остановимся на направлении создания современного инструментария для профилактики здоровья и оценке состояния здоровья детей в раннем неонатальном периоде с использованием энергетических и информационных показателей.

### Энергетические показатели в оценке состояния функционирования биосистемы

В настоящей работе будем рассматривать организм ребенка как некоторую сложную динамическую биосистему. Сложные системы могут качественно отличаться друг от друга – быть физической, экономической, физиологической, социальной и др. природы, однако все они подчиняются законам термодинамики и представляют собой целостный объект с взаимосвязанной структурой, который взаимодействует с окружающей средой. Для того чтобы биосистема существовала, она должна обмениваться с внешней средой информаци-



**Рисунок.** Обобщенная структурная схема, отображающая взаимодействующие элементы организма

ей, энергией и веществом. Обменные процессы в динамической биосистеме подчиняются фундаментальным законам сохранения энергии и непрерывности, а сама жизнь рассматривается с точки зрения действия второго закона термодинамики.

На рисунке представлена динамическая система, которая характеризуется вектором состояния  $X(t)$ , выходом  $Y(t)$ , входом  $U(t)$ .

Динамическая система характеризуется вектором состояния  $X(t)$ , выходом  $Y(t)$ , входом  $U(t)$ .

Изменение состояния  $X(t)$  обеспечивается обменными энергетическими процессами, происходящими внутри и поддерживаемыми поступлением энергии извне. В теории управления такие системы, как правило, описываются системными уравнениями [3]:

$$Y(t) = G(X(t), U(t)) \text{ — наблюдение;}$$

$$X(t) = F(\dot{X}(t), U(t)) \text{ — состояние.}$$

Для описания динамических систем воспользуемся энергетическими характеристиками:

$$\Delta W_{\Pi}(t) = \dot{X}^T(t) q_{\Pi} \dot{X}(t) \Delta t \text{ — изменение потенциальной энергии;}$$

$$\Delta W_{K}(t) = \dot{X}^T(t) q_{K} \dot{X}(t) \Delta t \text{ — прирост кинетической энергии;}$$

$$\Delta W_{A}(t) = \dot{X}^T(t) q_{A} \dot{X}(t) \Delta t \text{ — расход энергии на совершение активной работы.}$$

Учитывая баланс энергии, можно записать уравнение следующего вида:

$$\Delta W(t) - \dot{X}^T(t) q_{A} \dot{X}(t) \Delta t =$$

$$= \dot{X}^T(t) [q_{K} \dot{X}(t) + q_{\Pi} \dot{X}(t)] \Delta t,$$

где  $q_k^{-1} \mathcal{Q}(t) = \dot{X}(t) + q_k^{-1} q_{\Pi} X(t)$  — многомерный гармонический осциллятор, свойства которого определяются начальными условиями  $X(t)$ ,  $\dot{X}(t)$  и собственными числами матрицы  $q_k^{-1} q_{\Pi}$ .

Большой интерес для оценки функционирования состояния здоровья детей в раннем неонатальном периоде представляют суточные и сезонные колебания. В организме ребенка наблюдается широкий спектр колебаний (осцилляций), и их контроль обеспечивается информационной средой,

включающей генетические, нейронные и иммунные системы (биоинформационные системы), которые контролируют качество обменных процессов. Интерес представляет вопрос создания искусственных аналогов таких систем, которые бы адекватно отражали свойства биологической информационной среды. В настоящее время разработаны генетические модели, модели нейронных сетей и иммуно-гуморальных систем [4, 5].

Однако на пути создания аналогов биоинформационных систем возникает ряд проблем. Приведем лишь часть из них:

1. Нормирование сигналов.
2. Оценка принципов взаимодействия структурных элементов информационной среды и использование их в бионических аналогах.
3. Выбор «существенных» переменных состояния, с помощью которых можно осуществить контроль суточных и сезонных колебаний.
4. Ввод понятия напряженности системы через понятие упругости, т. к. колебания определяют упругость (остаточную деформацию) системы.
5. Оценка уровня функционирования системы. Ввод такого понятия позволит делать обоснованные выводы в профилактических исследованиях.

#### Энтропийные методы для оценки свойств биосистемы

Деградация динамических систем при равновесном функционировании связана с нарушением обменных энергоинформационных процессов, поддерживающих изменение переменных состояния в допустимых пределах. Поэтому обобщенные критерии оценки функционирования динамической биосистемы можно формировать на основе как энергетических, так и информационно-энтропийных показателей.

Энтропия живых систем, являясь мерой неопределенности, позволяет для разных состояний организма человека сделать сравнение их упорядоченности (разупорядоченности) и определенности. При равных вероятностях всех возможных состояний си-

стема полностью дезорганизована, так как во всякий момент времени она может перейти в любое состояние. Такие системы обладают максимальной энергией. Повышение упорядоченности (уменьшение энтропии) означает увеличение зависимости между факторами, определяющими поведение системы, что приводит к предсказуемости поведения системы.

Рассмотрим энтропийный подход для оценки свойств системы. Имеем набор случайных чисел, описывающих состояние биосистемы:  $x_1, x_2, \dots, x_n, \dot{x}_1, \dot{x}_2, \dots, \dot{x}_n = \xi_{2n}$ . Рассмотрим два случая, когда указанные числа являются независимыми и попарно зависимыми величинами.

Пусть имеем независимые случайные числа, тогда  $\rho(\xi_{2n}) = \rho(\xi_1)\rho(\xi_2)\dots(\xi_{2n})$ . Тогда среднее значение энтропии биосистемы равно:

$$\begin{aligned} H_{\xi_{2n}} &= - \int_{\xi} \rho(\xi_{2n}) \ln \rho(\xi_{2n}) d\xi_{2n} = \\ &= - \prod_{\xi}^{2n} \rho_{\xi_i}(\xi_i) \sum_i^{2n} \rho(\xi_i) d\xi_i \dots d\xi_{2n} = \sum_i^{2n} H_{\xi_i}. \end{aligned}$$

Пусть имеем попарно зависимые случайные числа  $\dot{x}_1 = f(x_1), \dot{x}_2 = f(x_2), \dots, \dot{x}_n = f(x_n)$ . Введем вектора  $\vec{y}_1 = (x_1, \dot{x}_1), \vec{y}_2 = (x_2, \dot{x}_2), \dots, \vec{y}_n = (x_n, \dot{x}_n)$ , тогда плотность распределения переменной наблюдения запишем в следующем виде:

$$\rho(y) = \rho(\vec{y}_1)\rho(\vec{y}_2)\dots\rho(\vec{y}_n).$$

В данном случае энтропия будет определяться по формуле:

$$\begin{aligned} H_y &= - \int_{\xi} \rho(y) \ln \rho(y) dy = \\ &= - \int_{\xi} \rho(y_1)\rho(y_2)\dots\rho(y_n) \ln(\rho(y_1)\rho(y_2)\dots\rho(y_n)) dy_1 dy_2 \dots dy_n = \\ &= \sum_{i=1}^n H_{\xi_{y_i}}. \end{aligned}$$

В этом случае средняя энтропия определяется по формуле:

$$\begin{aligned} H_{\xi_{y_i}} &= - \int_{\xi_{y_i}} \rho(x_i, \dot{x}_i) \ln \rho(x_i, \dot{x}_i) dx_i d\dot{x}_i = \\ &= - \int_{\xi_{y_i}} \rho(x_i, \dot{x}_i) [\ln \rho(x_i) + \ln \rho(\dot{x}_i)] dx_i d\dot{x}_i = \\ &= - \int_{\xi_{y_i}} \rho(x_i, \dot{x}_i) \ln \rho(x_i) dx_i - \\ &\quad - \int_{\xi_{y_i}} \rho(x_i, \dot{x}_i) \ln \rho(\dot{x}_i) d\dot{x}_i = \\ &= - \int_{\xi_{x_i}} \rho(x_i) \ln \rho(x_i) dx_i - \int_{\xi_{\dot{x}_i}} \rho(\dot{x}_i) \ln \rho(\dot{x}_i) d\dot{x}_i = \\ &= H_{\xi_{x_i}} + H_{\xi_{\dot{x}_i}}, \end{aligned}$$

где  $H_{\xi_{x_i}}$  и  $H_{\xi_{\dot{x}_i}}$  – средняя и условная средняя энтропия объекта.

Поскольку средняя условная энтропия не превосходит безусловную

$$H_{\xi_{\dot{x}_i}/\xi_{x_i}} \leq H_{\xi_{x_i}}, \text{ то } H_{\xi_y} \leq H_{\xi_{2n}} \text{ и } \Delta H_{\xi_y} = H_{\xi_{2n}} - H_{\xi_y}.$$

Из приведенных выражений следует, что для оценки функционирования биосистемы (организма) необходимо контролировать не только уровни состояния, но и их взаимосвязь. При разных наблюдениях возможны различные методы обработки наблюдаемых величин. Учитывая положительные стороны энтропийных методов, нами была исследована возможность формирования адапционных стратегий детей в раннем неонатальном периоде на основе энтропийного критерия. Работоспособность данного критерия была проверена на клиническом материале, полученном в роддоме № 1 г. Томска. При этом в качестве измеряемых параметров рассматривалось распределение  $R$ - $R$  интервалов при проведении клиноортостатической пробы. Клиноортостатическая проба – это экспериментальное выявление реакции организма на переход из горизонтального в вертикальное положение и поддержание этого положения. Показано, что, реакция на клиноортостатическую пробу есть переходная характеристика, позволяющая судить о резервах адаптации и потенциальных возможностях жизненно важных систем организма. В этом случае определяются значения энтропии для исходного (фоновое) состояния ( $H_0$ ) и после воздействия ( $H_1$ ) по следующим формулам:

$$\begin{aligned} H_0 &= - \sum_{i=1}^n P_i \log_2 P_i, \\ H_1 &= - \sum_{i=1}^n P_{b(i)} \log_2 P_{b(i)}, \quad P_{b(i)} = \frac{P_i \cdot p_i}{\sum_{r=1}^n P_r p_r}, \end{aligned}$$

где  $P_i$  и  $p_i$  – вероятность попадания интервала  $R$ - $R$  в соответствующий класс гистограммы до и после воздействия.

Анализ полученных с помощью энтропийного критерия типов кривых с использованием кластерного анализа, позволил выделить из 16 основных типов динамики данных энтропийных показателей сердечного ритма лишь 6 универсальных типов реакции: субкомпенсированный; неполная компенсация, компенсаторный; гиперкомпенсированный; декомпенсированный; нестабильный тип адаптации [6].

В таблице приведены результаты анализа распределения типа адапционных кардиоинтервалометрических кривых в зависимости от тяжести состояния.

Рассмотренные в статье подходы актуальны для детей раннего возраста и беременных женщин, так как их организм перестраивается на новые условия существования. Запаздывание в принятии решений, корректирующих состояние здоровья челове-

ка в данный период жизни, может привести к «неблагоприятному» исходу.

**Таблица.** Распределение типов адаптационных кривых (в %) для доношенных здоровых детей и детей с перинатальным поражением центральной нервной системы (ППЦНС)

Тип кривой \ Группа	Здоровые		ППЦНС без лечения		ППЦНС на фоне лечения	
	$H_0$	$H_1$	$H_0$	$H_1$	$H_0$	$H_1$
Субкомпенсированный	28	18	–	–	60	20
Неполная компенсация	18	18	26	4	–	–
Компенсаторный	36	55	14	23	40	47
Гиперкомпенсированный	–	–	19	19	–	13
Декомпенсированный	9	9	7	20	–	–
Нестабильный тип	9	–	34	34	–	20

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Власов В.В. Введение в доказательную медицину. – М.: Медиа Сфера, 2011. – 392 с.
2. Неймарк Ю.И., Ланда П.С. Стохастические и хаотические колебания. – М.: Наука, 1987. – 424 с.
3. Константинова Л.И., Кочегуров В.А. Параметрическая идентификация нелинейных дифференциальных уравнений на основе сплайн-схем, точных на многочленах // Автоматика и телемеханика. – 1997. – Вып. 5. – С. 53–63.
4. Ершов Ю.А., Кирков А.И., Костырин Е.В. Вектор состояния подсистем организма как основа автоматизации медицинской

### Выводы

Применение энергетических и энтропийных показателей целесообразно при решении задач оценки и прогнозирования состояния здоровья организма человека, поскольку изменение состояния обеспечивается обменными энергетическими и информационными процессами, происходящими внутри и поддерживаемыми поступлением извне. Приведен вывод аналитических выражений, позволяющих получать объективные оценки временных закономерностей. Рассмотренные модели и методы апробированы на реальных данных. Полученные результаты позволяют разработать универсальные типы оценки состояния здоровья детей в раннем периоде.

диагностики // Биомедицинские технологии и радиоэлектроника. – 2004. – Вып. 12. – С. 34–41.

5. Нарциссов Р.П., Степанова Е.И., Кочегуров В.А., Константинова Л.И. Прогнозирование здоровья детей раннего возраста. – Томск: Изд-во ТГУ, 1987. – 157 с.
6. Гергет О.М., Кочегуров А.И. Решение актуальных медицинских задач математическими методами. – Saarbrücken, Germany: LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH&Co, KG, 2012. – 145 с.

Поступила 13.09.2012 г.

УДК 519.72

## ИНТЕГРАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ

В.А. Фокин\*, Я.С. Пеккер\*, О.Г. Берестнева, О.М. Гергет

\*Сибирский государственный медицинский университет, г. Томск  
Томский политехнический университет  
E-mail: fokin@ssmu.ru

Предложена информационная технология интегральной оценки состояния сложных систем (на примере биосистем), обеспечивающая единство оценочного алгоритма на различных уровнях их структурно-функциональной организации. Описан энтропийный подход для оценки нестабильных состояний биосистем по показателям кардиоинтервалографии. Рассмотрены модели и алгоритмы апробированы на реальных данных. Приведен иллюстративный пример основных типов динамики информационных показателей сердечного ритма новорожденных детей.

### Ключевые слова:

Информационные технологии, интегральная оценка состояния биосистем, статистическое моделирование.

### Key words:

Information technologies, integral estimation of bio-systems state, statistical modeling.

### Введение

Решение проблемы оценки состояния сложных биосистем существенным образом зависит от возможностей количественного описания протекающих в них процессов в рамках ограниченной априорной информации в условиях многообразия внешних воздействий и индивидуальных особенностей исследуемого биообъекта. С этой точки зре-

ния важная роль при разработке информационных технологий оценки состояния биосистем отводится формированию, накоплению и использованию массивов многомерных медико-биологических данных [1, 2].

В целом в медико-биологических исследованиях складывается достаточно противоречивая ситуация. С одной стороны, накоплены разнообраз-