

МОДЕЛИ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ РАЗВИТИЯ ДЕТЕЙ В РАННЕМ ПЕРИОДЕ И МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ИХ СОСТОЯНИЯ

В. А. Кочегуров, О. М. Гергет, Л. И. Константинова

Институт кибернетики Национального исследовательского
Томского политехнического университета, 634050, Томск, Россия

УДК 004.75

Обсуждается проблема использования энергетических и информационных показателей для оценки состояния здоровья биообъекта. Изучена динамическая система, характеризующаяся выходом, входом и вектором состояния, изменение которого обеспечивается обменными энергетическими процессами, происходящими внутри и поддерживаемыми за счет поступления энергии извне. Рассмотрены индивидуализированные методы принятия решения в практической медицине.

Ключевые слова: математические методы, доказательная медицина, энергетические показатели, энтропия, здравоохранение.

The problem of highway technology of observation results presentation has been discussed. The possibility of individualized approach to decision making in practical medicine problems is used in it. The substantiated choice of vector of indices characterizing properties of highways and methods of observation results reflection based on bionic models were discussed.

Key words: mathematical methods, evidence-based medicine, entropy, energy indicators, health service.

Введение. В настоящее время большое внимание уделяется разработке моделей выявления закономерностей в развитии сложных систем. Сложные системы могут качественно различаться (физические, экономические, физиологические, социальные и др.), однако все они подчиняются общесистемным законам естествознания и представляют собой целостный объект со взаимосвязанной структурой, взаимодействующей с окружающей средой. Представляет интерес исследование суточных колебаний, происходящих в организме детей в раннем возрасте. В организме наблюдается широкий спектр колебаний (осцилляции), контроль которых осуществляется информационной средой, включающей генетические, нейронные и иммунные системы, поддерживающие качество обменных процессов. Применение моделей закономерностей развития в медицине позволяет решать важные задачи оценки адаптационных возможностей организма ребенка в раннем периоде развития и выделения магистральных траекторий в условиях нормального функционирования.

Структурное представление объекта исследования. В настоящей работе рассматривается организм ребенка в раннем неонатальном периоде как некоторая сложная динамическая биосистема. Для того чтобы биосистема существовала, она должна обмениваться с внешней средой информацией, энергией и веществом. Обменные процессы в организме ребенка подчиняются

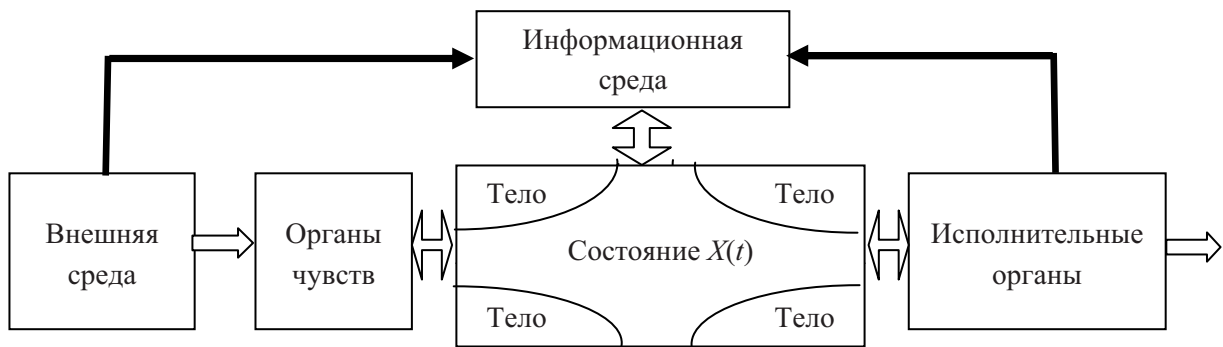


Рис. 1. Обобщенная структурная схема взаимодействия элементов организма

фундаментальным законам естествознания, и его функционирование можно рассматривать как изменение внутреннего состояния под действием внутренних и внешних сил. На рис. 1 представлена динамическая система, характеризуемая вектором состояния $X(t)$, выходом, входом. Изменение состояния $X(t)$ обеспечивается обменными энергетическими процессами, происходящими внутри организма и поддерживаемыми за счет поступления энергии извне.

Деградация динамических систем при равновесном функционировании обусловлена нарушением обменных энергоинформационных процессов, поддерживающих изменение переменных состояния в допустимых пределах. Это означает, что обобщенные критерии оценки функционирования динамической биосистемы целесообразно формировать на основе либо энергетических, либо информационных критериев.

Для перехода к энергетическим показателям используем общесистемный формализм представления переменных состояния через обобщенные векторы: $q\{q_1, \dots, q_n\}, \dot{q}\{\dot{q}_1, \dots, \dot{q}_n\}$.

В обобщенных координатах состояние системы определяется уровнем кинетической $W_k\{q, \dot{q}\}$ и потенциальной $W_n\{q, \dot{q}\}$ энергии. При этом частные производные

$$\frac{\partial W_k(q, \dot{q})}{\partial \dot{q}} = P(q, \dot{q}), \quad \frac{\partial W_n(q, \dot{q})}{\partial q} = F(q, \dot{q})$$

соответственно равны обобщенному импульсу и обобщенной силе, определяющим временные (обменные) процессы в динамической системе. Связь между $x(t)$ и $q(t)$ определяется некоторым нелинейным преобразованием

$$x(t) = x(q(t)), \quad \dot{x}(t) = \frac{\partial x(t)}{\partial q} \frac{dq(t)}{dt}.$$

Обменные процессы сопровождаются расходом кинетической энергии $W_k\{q, \dot{q}\}$ на совершение работы и частично на восстановление потенциальной энергии $W_n\{q, \dot{q}\}$.

Введем разность $\Delta W(q, \dot{q}) = W_k(q, \dot{q}) - W_n(q, \dot{q})$. Тогда справедливо равенство

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial \Delta W(\dot{x}(q, \dot{q}))}{\partial \dot{q}_i} - \frac{\partial \Delta W(\dot{x}(q, \dot{q}))}{\partial q_i} = \Phi_i(\dot{x}(q, \dot{q})),$$

где $\Phi_i(\dot{x}(q, \dot{q}))$ – силовая функция, учитывающая внутренние потери и внешнее воздействие:

$$\Phi_i(\dot{x}(q, \dot{q})) = \frac{\partial W_{\Pi}(\dot{x}(q, \dot{q}))}{\partial q_i} + \frac{\partial x^T(t)}{\partial q_i} \frac{dP(\dot{x}(q, \dot{q}))}{dt}.$$

Режим $\sum_{i=1}^n \Phi_i(\dot{x}(q, \dot{q})) = 0$ характеризует динамическое равновесие, при этом переменные состояния $x(t)$ совершают циклические колебания в допустимом диапазоне $\Delta x_{\min} \leq x \leq \Delta x_{\max}$ вблизи устойчивого равновесного состояния $x_0(t)$, зависящего от времени и определяющего закономерность развития системы.

Из приведенных выше выражений следует, что для оценки функционирования динамической системы (организма) необходимо контролировать не только уровни состояния $x(t)$, но и их динамическую взаимосвязь. При разных наблюдениях возможны различные методы обработки наблюдаемых величин. Ниже рассматриваются два метода: применение среднегеометрических показателей и использование энтропийных критериев.

Определение закономерностей развития детей в раннем периоде на основе среднегеометрических показателей. Развитие динамических процессов происходит по некоторой траектории, обеспечивающей равновесное сбалансированное изменение переменных состояния во времени. Такие траектории можно назвать магистралями. Для наблюдения за состоянием магистрали (оценки свойств системы, связанной с закономерностью изменения переменных состояния биообъекта) целесообразно использовать среднегеометрический показатель [1]

$$\Gamma_x(t) = \sqrt[n]{\prod_{i=1}^n x_i(t)}.$$

Для равновесного состояния (функционирование в пределах нормы) среднегеометрическое значение равно

$$\Gamma_{x_0}(t) = \sqrt[n]{\prod_{i=1}^n x_{i_0}(t)}.$$

Относительное отклонение среднегеометрического значения биообъекта от равновесных значений определяется по формуле

$$\frac{\Delta \Gamma_x(t)}{\Gamma_{x_0}(t)} = \frac{1}{n} \frac{\sum_{i=1}^n \Delta x_i(t)}{x_{i_0}(t)}.$$

При известных значениях $\Gamma_{x_0}(t)$ для интервалов времени, в которых значение $\Gamma_{x_0}(t)$ остается неизменным, оценкой принадлежности наблюдений к траектории $\Gamma_{x_0}(t)$ является условие

$$\frac{\sum_{i=1}^n \Delta x_i(t)}{x_{i_0}(t)} = 0.$$

При известных допустимых отклонениях $\pm\Delta x_m$ характер напряженности состояния системы может быть определен на основе относительного изменения среднегеометрических показателей [2]:

$$\gamma = \frac{\alpha^2}{1 - \alpha^2}, \quad 0 \leq \alpha \leq 1, \quad 0 \leq \gamma \leq \infty,$$

где

$$\alpha^2 = \frac{\Delta x^T(t) \Delta x(t)}{\Delta x_m^T \Delta x_m}.$$

Ниже приведены результаты обработки данных для выявления закономерности реакции организма ребенка на условия жизнедеятельности по показателям крови. Для проведения исследования экспертами было сформировано три группы детей: здоровые дети; дети с риском возникновения отклонений в состоянии здоровья; больные дети (диагностировано перинатальное поражение центральной нервной системы (ППЦНС)).

В ходе работы моделировались осредненные значения для указанных выше групп, на основе которых формировались индивидуальные модельные траектории. На рис. 2 приведены модельные траектории закономерностей для различных групп детей.

Моделирование адаптационных возможностей детей на основе энтропийных подходов.

Ниже приведены результаты оценки адаптационных возможностей детей в раннем неонатальном периоде на основе энтропийного критерия. Эффективность данного критерия была проверена на клиническом материале. При этом в качестве измеряемых параметров рассматривалось распределение R-R кардиоинтервалов при проведении клиноортостатической пробы (КОП). Клиноортостатическая проба – это экспериментальное выявление реакции организма на переход из горизонтального в вертикальное положение и поддержание этого положения. Показано, что реакция на КОП есть переходная характеристика, позволяющая судить о резервах адаптации и потенциальных возможностях жизненно важных систем организма. В этом случае значения энтропии в исходном (фоновом) состоянии и после воздействия определяются по формулам

$$H_i = - \sum_{i=1}^n P_{b(i)} \log_2 P_{b(i)}, \quad P_{b(i)} = \frac{P_i p_i}{\sum_{r=1}^n P_r p_r},$$

где P_i – вероятность попадания интервала R-R в соответствующие дискретные отрезки гистограммы до осуществления воздействия; p_i – вероятность попадания интервала R-R в соответствующие дискретные отрезки гистограммы после осуществления воздействия.

Полученные с использованием энтропийного подхода адаптационные кривые с помощью кластерного анализа по координатам центроидов были разделены на пять групп, что позволило выделить пять универсальных типов реакции: субкомпенсированный, компенсированный, гиперкомпенсированный, декомпенсированный и нестабильный [3].

Субкомпенсированному типу реакции соответствуют колебания значений показателя, не выходящие за пределы варьирования признака (рис. 3).

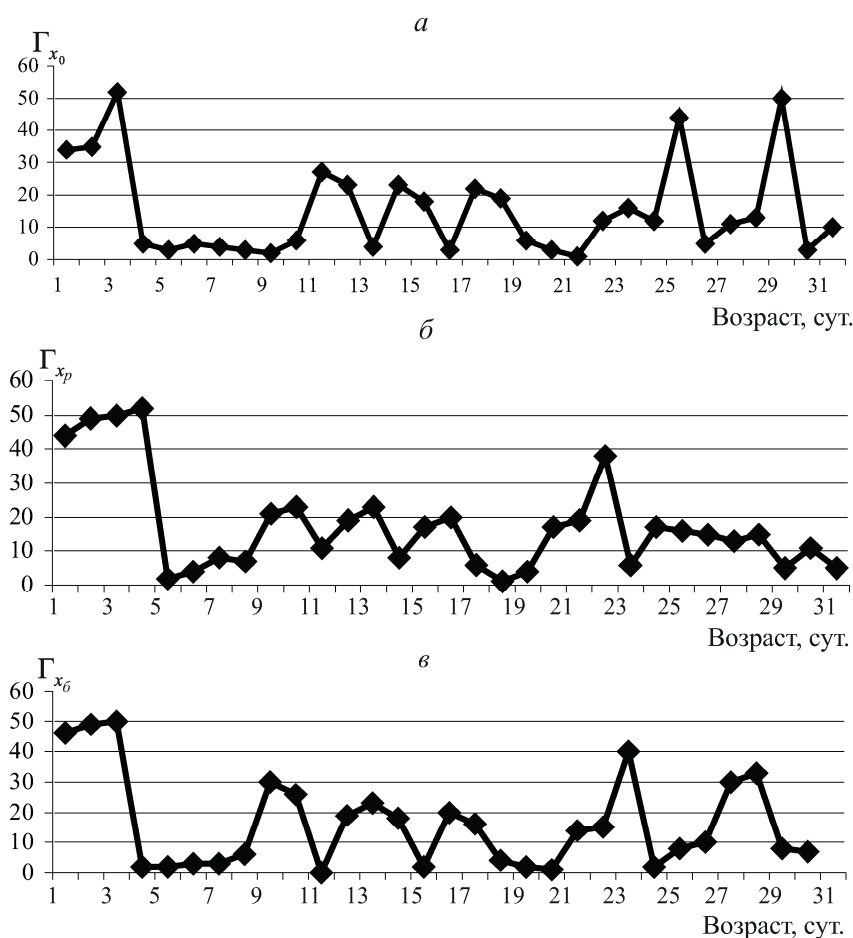


Рис. 2. Модельные траектории закономерностей:

a – здоровые дети; *б* – дети с риском возникновения отклонений в состоянии здоровья (Γ_{x_p} – среднегеометрический показатель для детей с риском возникновения отклонений в состоянии здоровья); *в* – больные дети (Γ_{x_b} – среднегеометрический показатель для детей с перинатальным поражением центральной нервной системы)

Существует два вида компенсированного типа реакции: 1) значение показателя сначала монотонно убывает до некоторого значения, а затем постепенно возрастает или приближается к исходному уровню (классифицируется как гиперболический (тип IIa)); 2) значение показателя сначала монотонно возрастает до некоторого значения, а затем постепенно уменьшается или приближается к исходному уровню (тип IIb) (рис. 4).

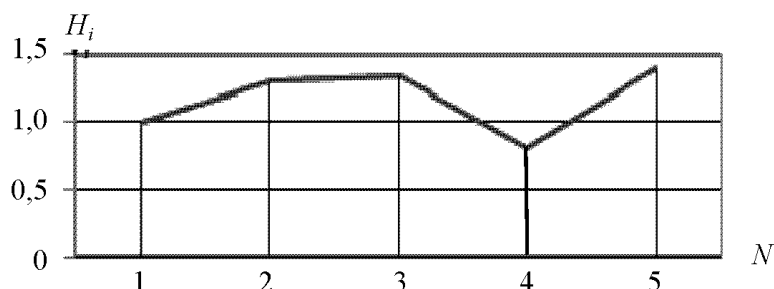


Рис. 3. Субкомпенсированный тип адаптивной кардиоинтервалометрической кривой (N – номер пробы)

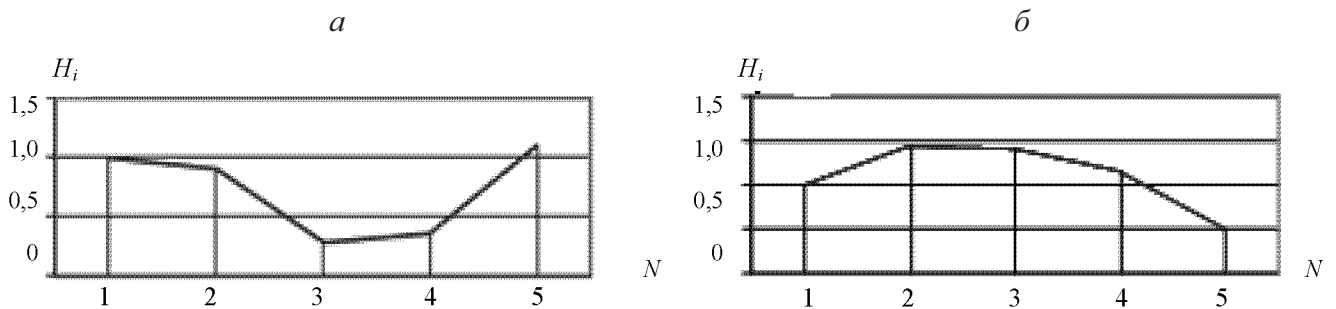


Рис. 4. Компенсированный тип адаптационной кардиоинтервалометрической кривой:

а – неполная компенсация; *б* – компенсаторный тип

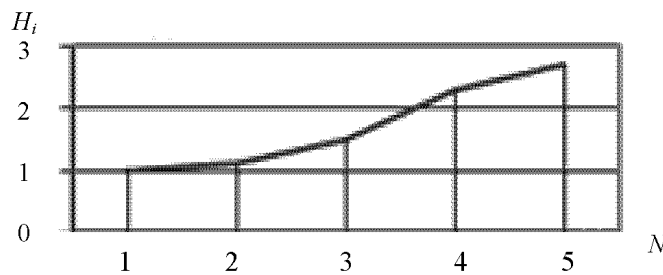


Рис. 5. Гиперкомпенсированный тип адаптационной кардиоинтервалометрической кривой

При гиперкомпенсированном типе реакции наблюдается постепенное увеличение значений показателя на пробах, которые после окончания воздействия к исходному уровню не возвращаются (рис. 5). Декомпенсированный тип реакции характеризуется монотонным спадом в течение всей пробы и после ее окончания (рис. 6).

Нестабильному (динамическому) типу реакции соответствуют резкие колебания значений показателя, существенно отличающиеся от пределов варьирования признака (рис. 7).

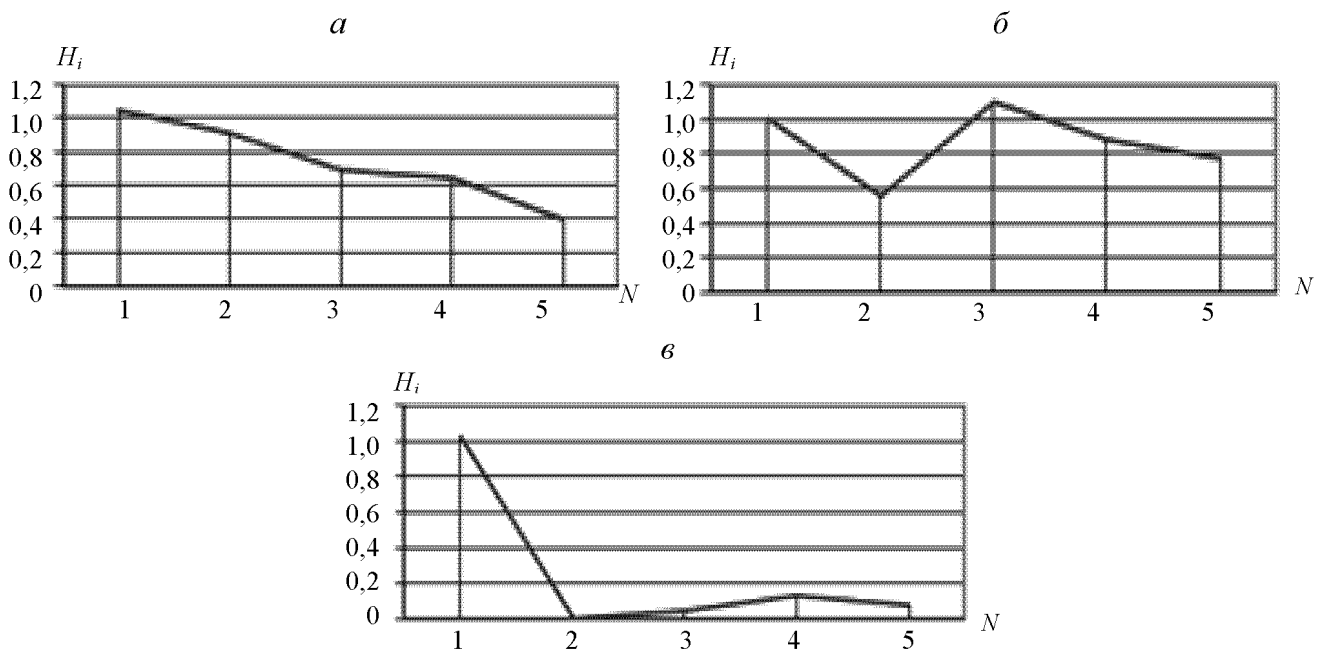


Рис. 6. Декомпенсированный тип адаптационной кардиоинтервалометрической кривой:

а – переходная декомпенсация (тип IV(a)); *б* – частичная декомпенсация (тип IV(b));

в – астенизация (тип IV(c))

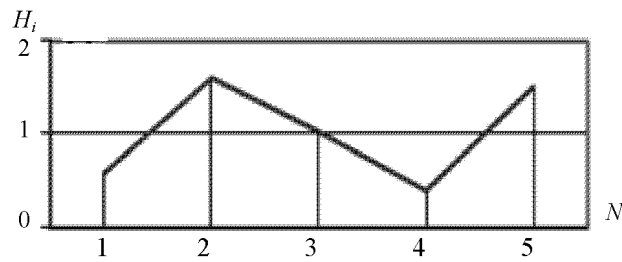


Рис. 7. Нестабильный тип адаптационной кардиоинтервалометрической кривой

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

Распределение типов адаптационных кривых для доношенных детей						
Тип кривой	Группа детей					
	Здоровые		ППЦНС		ППЦНС на фоне лечения	
	H_0	H_i	H_0	H_i	H_0	H_i
Субкомпенсированный	27	18	—	—	60	20
С неполной компенсацией	18	18	56	4	—	—
Компенсаторный	36	55	56	30	40	47
Гиперкомпенсированный	—	—	32	21	—	13
Декомпенсированный	9	9	—	20	—	—
Нестабильный	9	—	56	34	—	20

Заключение. В работе показана необходимость учета для оценки функционирования систем не только уровня, но и динамической взаимосвязи переменных состояния. Предложены модели и методы, позволяющие выявить закономерности развития биологических систем. Получены аналитические выражения, позволяющие 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 возрасте.

Список литературы

1. КОНСТАНТИНОВА Л. И., КОЧЕГУРОВ В. А., ШУМИЛОВ Б. М. Параметрическая идентификация нелинейных дифференциальных уравнений на основе сплайн-схем, точных на многочленах // Автоматика и телемеханика. 1997. № 5. С. 15–20.
2. КОНСТАНТИНОВА Л. И., КОЧЕГУРОВ В. А., КОЧЕГУРОВ А. И. Информационные технологии магистралей в задачах доказательной медицины // Изв. ТПУ. 2011. № 5. С. 32–38.
3. ГЕРГЕТ О. М. Решение актуальных медицинских задач математическими методами / О. М. Гергет, А. И. Кочегуров. Saarbrücken: LAP LAMBERT Acad. Publ. GmbH&Co, 2012.

Кочегуров Владимир Александрович – д-р техн. наук, проф. Института кибернетики Томского политехнического университета; тел.: (382-2) 42-61-00; e-mail: am@am.tpu.ru;
Гергет Ольга Михайловна – доц. Института кибернетики Томского политехнического университета; тел.: (382-2) 42-61-00; e-mail: Olgagerget@mail.ru;
Константинова Людмила Ивановна – канд. техн. наук; тел.: (382-2) 42-61-00; e-mail: kli@am.tpu.ru

Дата поступления – 22.10.12 г.