

## СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ПРОЦЕССОВ В ЗАДАЧАХ ЛЕЧЕБНО-ВОССТАНОВИТЕЛЬНОЙ МЕДИЦИНЫ

---

**В.А. КОЧЕГУРОВ**

Томский политехнический университет (г. Томск)  
kva06@rambler.ru

*Обсуждается энергоинформационный подход при формировании критериев, обеспечивающих объективные доказательства принятых решений в лечебно-восстановительной медицине. Вводятся принципы математического моделирования доказательной медицины, бионические модели, принципы нанотехнологии доказательной медицины.*

**Ключевые слова:** *система, моделирование, доказательная медицина, бионические модели, обобщенные переменные, энергия.*

Состояние здоровья каждого человека является одной из социально важных характеристик любой государственной общности людей. Здоровье определяется как состояние полного физического, психического и социального благополучия, обеспечивающего полноценную активную трудовую и общественную деятельность. Болезнь не только препятствует, но и порой значительно ограничивает возможности человека.

Процесс перехода организма от здоровья к болезни во многих случаях проходит незаметно и связан с нарушением его функциональной деятельности. Своевременная профилактика организма и применение необходимых лечебно-восстановительных процедур способствуют сохранению его функциональных возможностей.

Для лечебно-восстановительной медицины необходимо изучение механизмов, определяющих динамическое состояние здоровья человека, а также разработка адекватных мероприятий, способствующих возвращению функциональных резервов организма человека и компенсации утраченных функций с целью повышения уровня его здоровья. В этом случае практикующий врач при принятии решения по результатам обследования пациента должен иметь обоснованные методы и критерии, обеспечивающие объективные доказательства проводимого курса лечения. Широко используемые в настоящее время статистические методы обработки результатов обследований в большинстве случаев позволяют понять общую тенденцию состояния больных без учета индивидуальных особенностей организма пациента. Следовательно, можно говорить о необходимости разработки принципов врачебной технологии, когда на фоне общих закономерностей была бы возможность делать доказательные выводы о состоянии здоровья каждого обследуемого. Назовем это принципом математического моделирования доказательной медицины [1] в оценке динамики функциональной деятельности организма человека.

В статье с позиций системного подхода рассматривается технология представления результатов наблюдений, в рамках которой показывается возможность индивидуализированной оценки принятия решения по некоторой известной закономерности, относительно которой оценивается индивидуальное состояние. Такой подход используется в экономике (теория магистралей), когда рассматривается проблема сбалансированного развития производственных процессов в условиях межотраслевых связей. Перед выходом на магистраль, как правило, производятся необходимые структурные преобразования в производстве, зависящие от его начального состояния. Важными остаются обеспечение соответствующего контроля и поддержание необходимых условий магистрального развития при нарушениях под воздействием внутренних и внешних факторов. При этом возникает проблема обоснованного выбора показателей, которые могли бы характеризовать как саму магистраль, так и свойства близлежащих траекторий, отражающих качество функционирования многомерных производственных процессов.

В настоящее время большое внимание уделяется разработке моделей развития сложных систем и выявления закономерностей их развития. Сложные системы могут качественно отличаться друг от друга – быть физическими, экономическими, физиологическими, социальными и другой природы. Однако все они подчиняются общесистемным законам естествознания и представляют собой целостный объект с взаимосвязанной структурой и взаимодействующий с окружающей средой. В биологических системах естественным образом формируются структуры, обе-

спечивающие магистральную траекторию их развития и необходимые информационные средства контроля и адаптивного управления в изменяющейся среде. Указанные функции выполняют генетическая, иммунная и центральная нервная системы. Формально их можно объединить в комплексные взаимосвязанные средства обработки внутренней и внешней информации. В настоящее время разработаны искусственные системы обработки информации, структурно отражающие функционирование генетических, иммунных и нейронно-сетевых алгоритмов. Назовем их бионическими моделями. Известны работы, в которых делается попытка комплексного использования бионических моделей в технике [2–4].

Применение бионических моделей в медицинских приложениях позволит решать важные задачи оценки развития биологических систем по магистральным траекториям в условиях нормального функционирования. При этом необходимо представить характеристики происходящих процессов в терминах обобщенных (системных) переменных состояния.

Будем рассматривать организм человека как некоторую сложную динамическую систему, взаимодействующую с внешней средой и обладающую внутренними энергетическими ресурсами [5]. На рис. 1 приведена обобщенная структурная схема, которая отображает взаимодействующие подсистемы организма, характеризующегося вектором состояния  $X(t)$

[6]. Здесь  $X(t)^T = [x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)]$  – переменные, характеризующие состояние организма,  $t$  – время.

Важным свойством системы является способность при функционировании сохранять неизменными свои показатели в условиях случайных возмущений и взаимодействия с внешней средой. Это свойство внутренней саморегуляции систем определяется наличием совокупности обратных связей и сложных приспособительных реакций, направленных на устранение или максимальное ограничение факторов, нарушающих относительно устойчивое динамическое постоянство показателей внутренней среды. В биологических системах такое динамическое равновесное состояние называется гомеостазом. Фактически гомеостаз имеет место при наличии устойчивых стационарных состояний, когда обеспечиваются условия саморегуляции и нормальное функционирование системы при изменяющейся внешней среде и случайных возмущениях. Нарушение условий саморегуляции в области гомеостаза указывает на появление дефектов во внутренней структуре системы. Явление гомеостаза можно сравнить со свойством восстановления своих геометрических форм упругими телами, находящимися под воздействием механических сил. Появление остаточных явлений (несохранения геометрических форм) в реакциях на механические воздействия указывает на нарушение внутренней структуры тел и их упругих свойств.

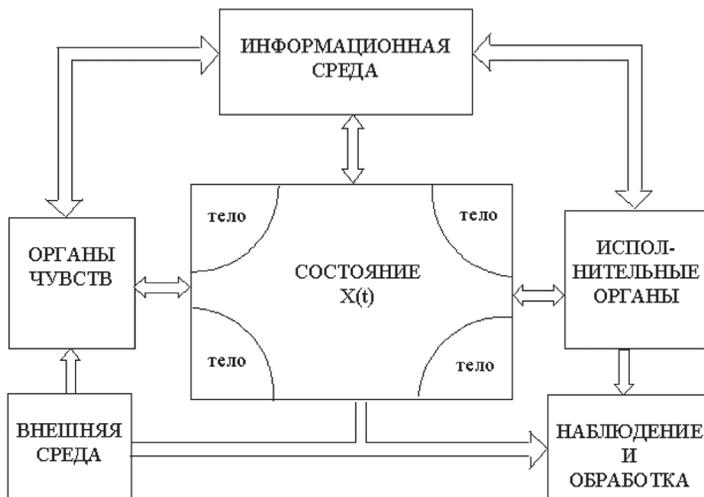


Рис. 1. Обобщенная структурная схема взаимодействующих подсистем организма

При моделировании представляет интерес изучение поведения системы, обладающей гомеостатическими свойствами за счет обменных энергоинформационных процессов, происходящих внутри системы и поддерживаемых поступлением энергии извне, когда сохраняется сбалансированное функционирование вблизи равновесного состояния. При малых колебаниях переменных состояния систему можно рассматривать как линейную, и ее поведение определяется характером равновесия. При больших колебаниях поведение системы не может быть описано линейными зависимостями, и оно носит достаточно сложный характер.

Деградация динамических систем при равновесном функционировании связана с нарушением энергоинформационных процессов, поддерживающих изменение состояния в допустимых пределах. Это означает, что обобщенные критерии оценки функционирования динамической биосистемы разумно формировать на основе энергетических либо информационных показателей.

Имеется проблема формирования энергетических показателей на основе наблюдаемых переменных состояния  $X(t)$ , поскольку их измерения производятся в неоднородных шкалах и требуются знания их производных. Поэтому при моделировании необходимо измеряемые величины привести к единым системным шкалам, ввести адекватные единицы измерения, опираясь на принцип баланса, подобия и сохранения размерности.

Это достаточно сложная задача и в каждом конкретном случае требует дополнительных исследований. Здесь мы формально введем единую шкалу измерений и представленные в новой шкале переменные состояния и их производные назовем обобщенными переменными. Запишем их в виде

$$q^T(t) = [q_1(t), q_2(t), \dots, q_i(t), \dots, q_n(t)],$$

$$\dot{q}^T(t) = [\dot{q}_1(t), \dot{q}_2(t), \dots, \dot{q}_i(t), \dots, \dot{q}_n(t)].$$

Связь между переменными  $X(t)$  и обобщенными переменными  $q(t)$ , в общем случае, носит нелинейный характер:

$$X(t) = X_q(q(t)),$$

$$\dot{X}(t) = \frac{\partial X_q(q(t))}{\partial q(t)} \cdot \frac{dq(t)}{dt} = \dot{X}_q(q(t), \dot{q}(t)),$$

$$P(\dot{X}(t)) = P(\dot{X}_q(q(t), \dot{q}(t))). \quad (1)$$

Здесь  $\frac{\partial X_q(q(t))}{\partial q(t)}$  – матрица Якоби,  $P(\dot{X}_q(q(t), \dot{q}(t)))$  – обобщенный импульс.

Обменные процессы сопровождаются изменением переменных состояния во времени и связаны с расходом кинетической энергии на совершение работы и частично на восстановление потенциальной энергии.

Введем понятие системной кинетической энергии

$$W_k(\dot{X}(t)) = W_k(\dot{X}_q(q(t), \dot{q}(t)))$$

и потенциальной энергии

$$W_n(X(t)) = W_n(X_q(q(t))).$$

При этом справедливы следующие равенства, включающие все силы, действующие внутри системы:

$$\frac{\partial W_k(\dot{X}_q(q(t), \dot{q}(t)))}{\partial \dot{q}^T(t)} = P(\dot{X}_q(q(t), \dot{q}(t))),$$

$$\frac{\partial W_n(X_q(q(t)))}{\partial q^T(t)} = \Phi_{\Pi}(X_q(q(t))), \quad (2)$$

в которых первое характеризует обобщенный импульс или количество движения (свойство реактивности гомеостаза), а второе – обобщенную силу, определяющую резервные возможности гомеостаза.

Вычислим  $\frac{\partial W_k(\dot{X}_q(q(t), \dot{q}(t)))}{\partial q^T(t)}$  и  $\frac{\partial W_k(\dot{X}_q(q(t), \dot{q}(t)))}{\partial \dot{q}^T(t)}$ .

$$\begin{aligned}
\frac{\partial W_k(\dot{X}_q(q(t), \dot{q}(t)))}{\partial \dot{q}^T(t)} &= \left[ \frac{\partial W_k(\dot{X}_q(q(t), \dot{q}(t)))}{\partial \dot{X}_q^T(q(t), \dot{q}(t))} \right]^T \cdot \frac{\partial \dot{X}_q(q(t), \dot{q}(t))}{\partial \dot{q}^T(t)} = \\
&= \left[ \frac{d}{dt} \frac{\partial \dot{X}_q(q(t))}{\partial \dot{q}^T(t)} \right]^T \cdot P(\dot{X}_q(q(t), \dot{q}(t))). \\
\frac{\partial W_k(\dot{X}_q(q(t), \dot{q}(t)))}{\partial \dot{q}^T(t)} &= \left[ \frac{\partial \dot{X}_q(q(t), \dot{q}(t))}{\partial \dot{q}^T(t)} \right]^T \cdot \frac{\partial W_k(\dot{X}_q(q(t), \dot{q}(t)))}{\partial \dot{X}_q^T(q(t), \dot{q}(t))} = \\
&= \frac{\partial X_q(q(t))}{\partial \dot{q}^T(t)} \cdot P(\dot{X}_q(q(t), \dot{q}(t))).
\end{aligned}$$

Используя эти выражения, можно получить уравнение, связанное с изменением количества движения в системе во времени:

$$\begin{aligned}
\frac{d}{dt} \frac{\partial W_k(\dot{X}_q(q(t), \dot{q}(t)))}{\partial \dot{q}^T(t)} - \frac{\partial W_k(\dot{X}_q(q(t), \dot{q}(t)))}{\partial \dot{q}^T(t)} = \\
+ \left[ \frac{\partial X_q(q(t))}{\partial \dot{q}^T(t)} \right]^T \cdot \frac{dP(\dot{X}_q(q(t), \dot{q}(t)))}{dt}. \quad (3)
\end{aligned}$$

Для характеристики обменных процессов введем разность между кинетической и потенциальной энергией:

$$\Delta W(\dot{X}_q(q(t), \dot{q}(t))) = W_k(\dot{X}_q(q(t), \dot{q}(t))) - W_1(X_q(q)).$$

Тогда с учетом (3) получим

$$\begin{aligned}
\frac{d}{dt} \frac{\partial \Delta W_k(\dot{X}_q(q(t), \dot{q}(t)))}{\partial \dot{q}^T(t)} - \frac{\partial \Delta W_k(\dot{X}_q(q(t), \dot{q}(t)))}{\partial \dot{q}^T(t)} = \\
= \frac{\partial W_1(X_q(q(t)))}{\partial \dot{q}^T(t)} - \left[ \frac{\partial X_q(q(t))}{\partial \dot{q}^T(t)} \right]^T \cdot \frac{dP(\dot{X}_q(q(t), \dot{q}(t)))}{dt}.
\end{aligned}$$

Обозначим

$$\Phi(\dot{X}_q(q(t), \dot{q}(t))) = \frac{\partial W_1(X_q(q))}{\partial \dot{q}^T(t)} + \left[ \frac{\partial X_q(q(t))}{\partial \dot{q}^T(t)} \right]^T \cdot \frac{dP(\dot{X}_q(q(t), \dot{q}(t)))}{dt}.$$

Отсюда имеем в окончательном виде уравнение, характеризующее обменные процессы в системе:

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial \Delta W(\dot{X}_q(q(t), \dot{q}(t)))}{\partial \dot{q}^T(t)} - \frac{\partial \Delta W(\dot{X}_q(q(t), \dot{q}(t)))}{\partial \dot{q}^T(t)} = \Phi(\dot{X}_q(q(t), \dot{q}(t))).$$

Здесь  $\Phi(\dot{X}_q(q(t), \dot{q}(t)))$  – силовая функция, которая способствует при естественных потерях восстановлению функциональных возможностей организма за счет внутренних и внешних источников энергии.

Режим  $\Phi(\dot{X}_q(q(t), \dot{q}(t))) = 0$  характеризует динамическое равновесие, при этом переменные состояния  $X(t)$  совершают циклические колебания в допустимых пределах вблизи равновесия значения  $X_0(t)$ , которое, в свою очередь, может медленно изменяться во времени, что фактически определяет закономерность развития системы или ее магистраль.

Из приведенных выражений следует, что для оценки функционирования динамической системы (организма) необходимо контролировать не только уровни переменных состояния, но и их динамическую взаимосвязь.

В [7–15] применен такой подход к решению практических задач на основе известных методов обработки информации, адаптированных к медицине. Вместе с тем нам представляется, что разумно использовать методы обработки наблюдаемых величин, построенных на основе структуры бионических моделей. Но это не простая задача, она требует проведения отдельных специальных исследований.

Рассмотренные принципы обработки информации в медицине индивидуальны для каждого пациента, и их, на наш взгляд, можно отнести к своеобразной «нанотехнологии» в социальных задачах прогнозирования здоровья населения.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Власов В.В.* Введение в доказательную медицину. – М.: Медиа Сфера, 2001. – 392 с.
2. *Васильев В.И., Жернаков С.В.* Диагностика состояния авиационных двигателей с использованием нейронных сетей // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. – 2007. – № 10 – С. 34–38.
3. *Гаврилов А.И.* Нейросетевая реализация процедуры идентификации динамических систем // Автоматизация и современные технологии. – 2002. – № 1. – С. 22–25.
4. *Зубков А.В.* Предсказание многомерных временных рядов с помощью нейронных сетей // Информационные технологии. – 2002. – № 2. – С. 20–26.
5. *Баевский Р.Н., Чернышов М.К.* Некоторые аспекты системного подхода и анализа временной организации функций в живом организме. – М.: Наука, 1986.
6. *Ершов Ю.А., Карпов А.И., Костырин Е.В.* Вектор состояния подсистем организма как основа автоматизации медицинской диагностики // Биомедицинские технологии и радиотехника. – 2004. – № 12. – С. 37–42.

7. *Константинова Л. И.* Математические модели и алгоритмы оценки риска заболеваний детей первого года жизни: Дис. ... канд. техн. наук. – Томск, 1987.

8. *Степанова Е. И., Нарциссов Р. П., Кочегуров В. А., Константинова Л. И.* Прогнозирование здоровья детей раннего возраста. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 1987. – 160 с.

9. *Хохлова Т. Е.* Модели и комплекс программ для решения задач реабилитационной терапии травм нервов конечностей: Дис. ... канд. техн. наук. – Томск, 1987.

10. *Абдулкина Н. Г., Левицкий Е. Ф., Кочегуров В. А., Константинова Л. И., Горелова Ю. В., Хохлова Т. Е.* Алгоритмизация физиотерапии травм периферических нервов. – Томск: Печатная мануфактура, 2007. – 151 с.

11. *Андреев С. Ю.* Моделирование динамики возбуждения предсердий в задачах восстановления ритма сердца: Дис. ... канд. техн. наук. – Томск, 2006.

12. *Андреев С. Ю., Кочегуров В. А.* Алгоритмы интраоперационного моделирования возбуждения предсердий // Сибирский журнал индустриальной математики. – Новосибирск: Изд-во Института математики, 2005. – Т. 8, № 2. – С. 5–11.

13. *Гергет О. М., Кочегуров В. А.* Модели и алгоритмы оценки адаптационных стратегий и дифференциальной диагностики здоровья детей в неонатальном периоде. – Saarbrücken: Изд-во LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH, 2012. – 145 с.

14. *Марченко В. В.* Математическое и программное обеспечение в задачах реабилитации детей с заболеванием щитовидной железы: Дис. ... канд. техн. наук. – Томск, 2009.

15. *Кочегуров В. А., Константинова Л. И., Марченко В. В.* Использование фазового отображения ЭЭГ для контроля состояния здоровья пациентов с тиреопатологией // Известия Томского политехнического университета. – 2011. – Т. 319, № 5. – С. 125–129.