

В. Ф. КОЧМАШЕВ

## ИНФОРМАЦИОННЫЙ АНАЛИЗ СИСТЕМНЫХ МЕХАНИЗМОВ КРОВООБРАЩЕНИЯ

Одной из центральных проблем физиологии кровообращения является изучение механизмов гомеостаза, определяющих взаимоотношения между изучаемыми в эксперименте параметрами. Эти механизмы не могут быть представлены как совокупность контуров саморегуляции отдельных физиологических показателей [5], поэтому при построении модели необходимо рассматривать регистрируемые показатели как параметры функциональной системы, целью деятельности которой является поддержание на заданном уровне значений существенных переменных, постоянство которых обеспечивает оптимальные условия функционирования организма как целого. При меняющихся условиях среды это постоянство обеспечивается за счет приспособительного изменения пластичных переменных, поддерживающих гомеостаз [1]. Для количественного анализа такой подход дает следующие положения, которые могут быть формализованы: постоянство существенной переменной обеспечивается многими пластичными переменными, диапазон изменения последних определяет компенсаторные возможности системы, а диапазон изменения существенной переменной—качество поддержания гомеостаза. В наиболее общем виде модель, удовлетворяющая этим положениям, описывается уравнением

$$F(x_1 \cdot \dots \cdot x_n) = \text{const}, \quad (1)$$

где  $F$ —существенная переменная,  $x_i$ —поддерживающие пластичные переменные. Реакции системы на внешние воздействия, проявляющиеся в изменении  $x_1$ , можно подразделить на патологические, т. е. вызывающие нарушение гомеостаза, и компенсирующие—нейтрализующие антигомеостатический эффект патологических [2]. Поскольку патогенные воздействия, определяющие реакции системы, зачастую неизвестны или не могут быть оценены количественно, целесообразно использовать стохастическую модель и рассматривать  $x_1$  как случайные величины. В большом числе случаев их статистические свойства могут быть аппроксимированы многомерным нормальным распределением. В этом случае связи между всеми переменными линейны и уравнение (1) приобретает вид

$$F(x) = a_1 x_1 + \dots + a_n x_n = \text{const}, \quad (2)$$

где  $a_i$  — весовые коэффициенты, определяющие вклад каждой поддерживающей переменной в значение существенной. Дисперсия  $D_F$  может служить критерием стабильности переменной  $F$ , ее значение зависит от дисперсий переменных  $x_i$ :

$$D_F = a_1^2 \sigma_{11}^2 + a_1 a_2 \sigma_{11} \sigma_{22} r_{12} + \dots + a_1 a_n \sigma_{11} \sigma_{nn} r_{1n} + \dots + a_n^2 \sigma_{nn}^2, \quad (3)$$

где  $\sigma_{ii}$  — среднеквадратичные отклонения,  $r_{ij}$  — коэффициенты корреляции. Как видно из (3), при ненулевых значениях коэффициентов  $D_F$  может быть близка к 0 только в том случае, если имеются ненулевые корреляции между  $x_i$ .

Существенная переменная часто бывает недоступна прямой регистрации, поэтому возникает задача косвенной оценки ее стабильности по взаимным корреляциям доступных регистрации поддерживающих переменных. В качестве обобщенных показателей коррелированности совокупности случайных величин можно использовать коррелятивные энтропии [6]. Для многомерного нормального распределения их можно записать в виде [3]:

$$H_1 = -\frac{1}{2} \log |R|, \quad (4)$$

$$H_g = \frac{1}{2} \log \frac{\bar{R}_{11x} \dots \bar{R}_{nnx}}{|R|^{n-1}}, \quad (5)$$

где  $\bar{R}_{ij}$  — миноры корреляционной матрицы,  $|R|$  — ее определитель,  $H_1$  — общая коррелятивная энтропия,  $H_g$  — двойственная коррелятивная энтропия.

Следующей задачей является определение весовых коэффициентов в уравнении (2). Поскольку значение  $F$  может быть неизвестно, применить обычные методы регрессионного анализа для их определения невозможно. Можно использовать известные приемы оценки характерных дисперсий и получить редуцированную ковариационную матрицу, для которой выполняется условие (3). Далее значения коэффициентов определяются решением однородной системы уравнений вида [4]

$$\Sigma' a = 0, \quad (6)$$

где  $\Sigma'$  — редуцированная ковариационная матрица,  $a$  — вектор коэффициентов. Из условия (2) следует, что ранг  $\Sigma'$  равен  $n-1$ , поэтому система (6) имеет решение:

$$a_i = c \bar{\Sigma}_{ik}, \quad i=1, \dots, n, \quad (7)$$

где  $\bar{\Sigma}_{ik}$  — алгебраические дополнения,  $c$  — постоянная. Таким образом, при неизвестных значениях существенного параметра веса поддержива-

ющих переменных могут быть определены с точностью до постоянной, которая может быть выбрана из дополнительных условий.

Методику расчета коррелятивных энтропий можно проиллюстрировать на следующем примере. Оценим стабильность формы кривой давления в левом желудочке, регистрируемой при катетеризации полостей сердца. Практически для получения устойчивых значений информационных показателей достаточно измерения амплитуд кривой в миллиметрах относительно изолинии в пяти фиксированных точках по каждому исследуемому комплексу. Обозначим совокупность измерений по одному комплексу через  $x = (x_1, \dots, x_5)$ . Для анализа можно выбрать любое число комплексов, например, три. Тогда исходные данные могут быть представлены в виде матрицы

$$X' = (x_1, x_2, x_3)' = \begin{pmatrix} x_{11}x_{12} \cdot x_{15} \\ x_{21}x_{22} \cdot x_{25} \\ x_{31}x_{32} \cdot x_{35} \end{pmatrix}.$$

Вычислив все парные корреляции между комплексами, получим корреляционную матрицу:

$$R = \begin{pmatrix} 1 & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & 1 & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & 1 \end{pmatrix}.$$

После этого можно вычислить коррелятивные энтропии по формулам (4) и (5):

$$H_1 = -\frac{1}{2} \log |R| = -\frac{1}{2} \log \left( 1 - r_{21}^2 - r_{31}^2 - r_{32}^2 + 2r_{21}r_{31}r_{32} \right),$$

$$H_g = \frac{1}{2} \log \frac{\bar{R}_{11} \bar{R}_{22} \bar{R}_{33}}{|R|^2} = \frac{1}{2} \log \frac{(1-r_{21}^2)(1-r_{31}^2)(1-r_{32}^2)}{(1-r_{21}^2-r_{31}^2-r_{32}^2+2r_{21}r_{31}r_{32})}.$$

Если все комплексы совершенно одинаковы по форме,  $H_1$  имеет максимальное значение, с увеличением вариабельности комплексов ее значение убывает.  $H_g$  характеризует связи более высоких порядков. Сравнение количественных показателей стабильности формы комплексов имеет значение для выявления скрытых изменений формы кривой, не обнаруживаемых визуально. Например, сравнение средних значений  $H_1$  на группе больных с митральным стенозом и группе больных, у которых наличие порока сердца при проведении зондирования не подтвердилось, показывает, что, хотя визуально кривые между группами не различались, количественные методы, как более чувствительные, позволили выявить скрытые изменения формы кривых. Для I группы среднее значение  $H_1$  равнялось  $1,5679 \pm 0,00564$ , для II группы оно составило  $1,5962 \pm 0,00288$ ,  $P < 0,01$ .

Предлагаемые методы могут использоваться для анализа электрофизиологических и других данных в случаях, когда гомеостатический параметр недоступен прямой регистрации и требуется косвенная оценка его характеристик по связанным с ним регистрируемым переменным.

Ереванский филиал ВНЦХ АМН СССР Поступила 6/II 1986 г.

Վ. Ֆ. ԿՈՉՄԱՉԵՎ

ԱՐՅԱՆ ՇՐՋԱՆԱՌՈՒԹՅԱՆ ՄԵԽԱՆԻԿԱԿԱՆ ՀԱՄԱԿԱՐԳԵՐԻ  
ԻՆՅՈՐՄԱՑԻՈՆ ՎԵՐԼՈՒԾՈՒԹՅՈՒՆ

Ա մ փ ն փ ու մ

Առաջարկված են արյան շրջանառության քանակական բնութագրերի ստացման մեթոդներ մուտք գործող տվյալների ոչ լրիվ դեպքերի համար:

Ցույց է տրված, որ այդ դեպքերում հնարավոր է ինդհանուր տեսության համակարգերի սահմաններում անուղղակի ձևով դնահատել կարգավորման որակը:

V. F. Khotchmashev

Information Analysis of Systemic Mechanisms of  
Circulation

S u m m a r y

Some methods to obtain quantitative character of the blood circulation mechanisms in case of insufficient input data are suggested. It is shown that in this case indirect evaluation of regulatory qualities is possible in framework of general functional system theory.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Анохин П. К. Вестник АМН СССР, 1962, 4, 16—27.
2. Брновицкий А. Ю. В кн.: «Динамика взаимоотношений патологических и компенсаторных реакций организма при некоторых формах нарушения кровообращения». Минск, 1974, 7—28.
3. Кочмашев В. Ф. В кн.: «Математические методы в биологии и медицине». Тезисы докладов. Свердловск, 1984, 43—45.
4. Кочмашев В. Ф. В кн.: «Кровоснабжение, метаболизм и функция органов при реконструктивных операциях». Тезисы докладов. Ереван, 1986, 112—114.
5. Меделяновский В. А. Успехи физиологических наук. 1982, 3, 96—126.
6. Te Sun Hsu. Inf. and Control, 1978, № 2, 46—52.

УДК 636.8.001.6:611.813.14

Л. Д. САВЕНКО

ДАННЫЕ ИНТЕГРАЛЬНОЙ РЕОГРАММЫ ТЕЛА (ИРГТ) ПРИ  
РАЗРУШЕНИИ МИНДАЛЕВИДНОГО ТЕЛА (МТ)  
ГОЛОВНОГО МОЗГА ВЗРОСЛОЙ КОШКИ

В экспериментальной медицине проблема сердечно-сосудистой патологии является одной из основных. При создании моделей патологии кровообращения значительное внимание уделено влиянию глубоких