Հայկական ՍՍՀ գիտությունների ակադեմիա, Հայաստանի կենսաբանական հանդես
Академия наук Армянской ССР, Биологический журнал Армении
Academy of Sciences of the Armenian SSR, Biological Journal of Armenia

1988, 41, 3

ՀՈԴՎԱԾՆԵՐ · СТАТЬИ

Биолог. ж. Армении, т. 41, № 3, 1988 УДК 612:573.22

ИЕРАРХИЧЕСКАЯ ДИСКРЕТНАЯ МОДЕЛЬ ДАННЫХ ФИЗИОЛОГИЧЕСКИХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Г. Ц. АГАЯН, В. В. МОТТЛЬ, Н. Б. МУЧНИК

ЦНИИ медико-биологических проблем спорта, Москва, Тульский политехнический институт, Институт проблем управления, Москва

Предлагается дискретная математическая модель данных физиологических экспериментов. Модель основана на концепции системного квантования поведения и позволяет формализовать процесс анализа и интерпретации данных физиологических экспериментов с применением ЭВМ.

Առաջարկվում է ֆիզիոլոգիական փորձերի տվյալների դիսկրետ մաթեմատիկական մոդելը։ Մոդելը հիմնվում է վարքի համակարգային քվանտավորման կոնցեպցիայի վրա և հնարավորություն է տալիս ձևական դարձնել ֆիզիոլոգիական փորձերի տվյալների անալիզի և ինտերպրետացիայի պրոցեսը ԷՀՄ-ի կիրառումով։

Discrete mathematical model of data of physiological experiments is proposed. The model is based on the conception of system quanting of behaviour and allows to formalize the process of analysis and interpretation of data of physiological experiments with the use of ECM.

Физиологические эксперименты—математическая модель—принцип доминанты—функциональная система—системное квантование поведения.

Существенным моментом экспериментальных исследований в физиологии является невозможность непосредственного наблюдения за скрытыми процессами, представляющими центральный интерес при изучении механизмов управления жизнедеятельностью как организма в целом, так и его отдельных функциональных систем. Как правило, в ходе физиологического эксперимента регистрируют целый ряд внешних характеристик исследуемого организма, измеряемых датчиками соответствующих физических величин. В частности, в эксперименте могут наблюдаться некоторые характеристики поведения животного

или человека параллельно с регистрацией ряда отведений электроэнцефалограммы, электромиограммы, электрокардиограммы, нередко ведется также запись пневмограммы, электроокулограммы, кривой кожно-гальванического рефлекса, реограммы и т. п. Анализ полученных осциллограмм, обычно называемых в совокупности полиграммой, призван восстановить (объективизировать) непосредственно не наблюдаемый процесс взаимодействия функциональных систем исследуемого организма.

Успех исследования в значительной мере зависит от того, насколько адекватно суждение о скрытых физиологических процессах, вынесенное на основе анализа полиграммы их косвенных показателей. Стремление к более детальному исследованию связано, во-первых, с необходимостью увеличения числа компонент регистрируемой полиграммы и расширения разнообразия их физической природы и, во-вторых, с требованием снижения уровня субъективности при восстановлении скрытых процессов по косвенным экспериментальным данным. Обеспечить выполнение этих требований можно только путем алгоритмизации анализа данных физиологического эксперимента с применением средств вычислительной техники.

Анализ экспериментальных данных имеет своей конечной целью проверку и уточнение той или иной гипотезы о механизме изучаемого физиологического процесса, выдвинутой на основе обобщения результатов ряда предыдущих наблюдений и экспериментов. Достаточно глубокая алгоритмизация анализа данных возможна лишь в том случае, если рабочая гипотеза сформулирована в виде некоторой математической модели. Для этого, в свою очередь, прежде всего необходимо создание формального языка описания физиологических процессов, в терминах которого должны строится математические модели экспериментальных данных.

Неисчерпаемая сложность динамической структуры живого организма не позволяет рассчитывать на создание обозримой математической модели его поведения, претендующей на полную адекватность даже в ограниченном классе экспериментов. Формальный язык для математического моделирования данных физиологических экспериментов должен выбираться из соображений компромисса между полнотой имитации физиологических процессов и достаточной простотой структуры моделей.

В данной работе предлагается математический аппарат для моделирования и обработки данных физиологических экспериментов, существенно использующий принципы теории доминанты А. А. Ухтомского, теории функциональных систем П. К. Анохина и теории системного квантования поведения, развиваемой научной школой К. В. Судакова [9]. Предлагаемая иерархическая квантовая модель представляет полиграмму данных физиологического эксперимента как совокупность случайных процессов со скачкообразно изменяющимися вероятностными свойствами. Такой подход к анализу данных физиологических экспериментов, позволивший выделить отдельные кванты поведения в континууме поведенческой деятельности человека, был впервые

применен Г. Н. Агаяном при исследовании системных механизмов целенаправленной деятельности спортсменов-стрелков [1, 2].

В данной модели моментами времени и характером изменения вероятностных свойств компонент регистрируемой полиграммы управляет стохастический конечный автомат с несколькими выходами, соответствующими отдельным компонентам полиграммы, и одним входом, позволяющим вводить в модель информацию о моментах приложения и характере внешних воздействий на исследуемый организм в ходе эксперимента (рис. 1). Специальная структура алфавита внутренних

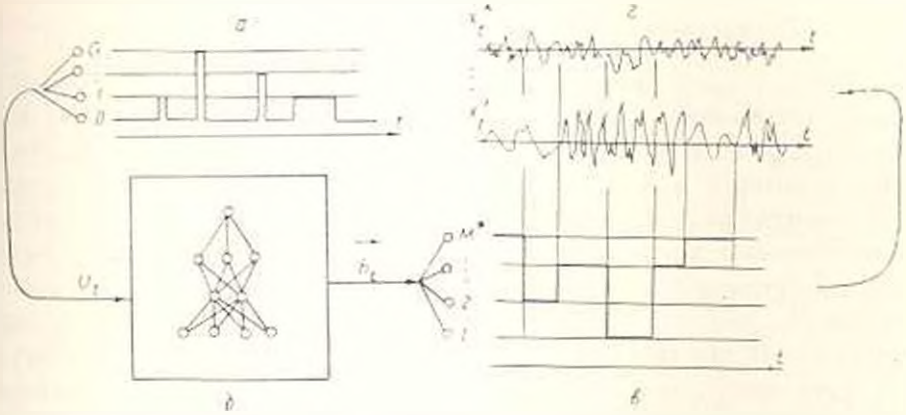

Рис. 1. Общая структура квантовой модели данных физиологического эксперимента: входной сигнал (а), иерархическая структура внутренних состояний стохастического автомата функциональных подсистем (б), последовательность элементарных квантов деятельности (в), экспериментальная полиграмма (г).

состояний и условных вероятностей переходов автомата отражает представление о любой функциональной системе организма как о динамически складывающейся иерархии функциональных подсистем, число уровней которой полагается конечным. Согласно принципу доминанты предполагается, что в каждый момент времени на каждом уровне иерархии множество возможных структур подсистем нижних уровней определяется одной подсистемой, доминирующей на данном уровне. Механизм функционирования каждой подсистемы верхних уровней иерархии формализуется как специфический для данной подсистемы вероятностный марковский закон чередования доминирования подсистем непосредственно ниже следующего уровня.

Совокупность индексов функциональных подсистем, доминирующих в данный момент времени на каждом уровне иерархии, играет роль агрегированного модельного представления о текущем внутреннем состоянии организма как динамической системы. Каждый интервал времени, в течение которого состояние системы неизменно, интерпретируется как элементарный квант непрерывной деятельности организма, а совокупность индексов подсистем, доминирующих в этом интервале времени, называется типом кванта.

Данные физиологического эксперимента включают в себя экспериментальную полиграмму вместе со сведениями о моментах времени

приложения внешних воздействий на исследуемый организм и их характере в терминах некоторого конечного алфавита, играющего роль входного алфавита стохастического автомата функциональных подсистем. Обработка данных сводится к выбору структуры и оцениванию параметров квантовой модели как стохастического динамического объекта, представленного реализациями его входного и выходного сигналов [8]. Такой подход позволяет автоматизировать процесс анализа данных физиологических экспериментов в терминах теории системного квантования поведения с помощью алгоритмов, реализующих соответствующие методы математической статистики.

Стохастический автомат функциональных подсистем

Будем рассматривать совокупность функциональных систем организма, деятельность которых объективно проявляется в данных конкретного физиологического эксперимента, как иерархическую структуру, в которой каждая функциональная система является подсистемой, принадлежащей определенному уровню иерархии. Основными качественными характеристиками системы в целом являются число уровней иерархии L и число функциональных подсистем на каждом уровне M_j, $j=0,\ldots, L-1$, причем на высшем уровне $j=L$ расположена единственная система $M_L=1$, которая интерпретируется как максимальная функциональная система, регулирующая всю физиологическую деятельность организма, объективно наблюдаемую в данном эксперименте (рис. 2). Отдельные подсистемы будем обозначать символом

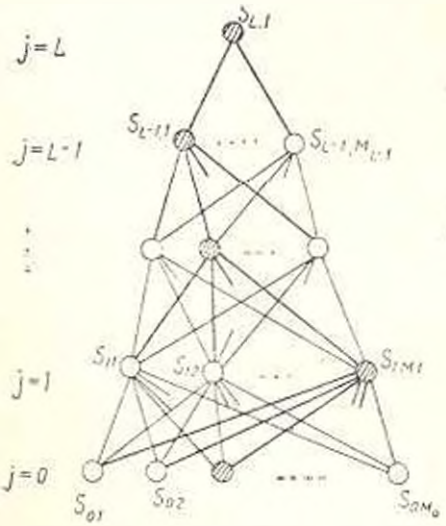

Рис. 2. Качественная структура иерархии функциональных подсистем: ▩ —подсистемы, доминирующие в данный момент.

S_{jh}, где первый индекс j указывает номер уровня иерархии, а второй h—порядковый номер подсистемы на этом уровне.

Будем считать время дискретным $t=0, 1, 2, \ldots$ Согласно принципу доминанты, в каждый момент времени на каждом уровне иерархии одна из подсистем этого уровня является доминирующей. Обозначим через $M_j=\{1,\cdots, M_j\}$, $j=0,\cdots, L-1$ множество функциональных подсистем на данном уровне, а через $h_j^t \in M_j$ индекс подсистемы, доминирующей в момент t на уровне j. Тогда состояние автомата функциональных подсистем в момент времени t естественно понимается

как совокупность $h_t = (h_t^0, \ldots, h_t^{L-1})$ индексов подсистем, доминирующих в данный момент на всех уровнях иерархии, кроме высшего уровня, который соответствует максимальной функциональной системе, доминирующей в течение всего периода эксперимента. Множество $M^* = M_0 \times \cdots \times M_{L-1}$ всех упорядоченных наборов индексов $h = (h_0, \ldots, h^{L-1})$, $h^j \in M_j$ является конечным алфавитом внутренних состояний автомата функциональных подсистем, содержащим $M^* = M_0 M_1 \cdots M_{L-1}$ символов.

Всякая подсистема S_{jh} кроме подсистем нижнего уровня $j=0$, оставаясь доминирующей на своем уровне иерархии в течение некоторого времени, реализует свою специфическую программу функционирования, которая выражается в определенном порядке доминирования подсистем непосредственно нижележащего уровня $S_{j-1,e}$, $l \in M_{j-1}$. В данной модели этот порядок предполагается в большей или меньшей степени случайным и формализуется в виде специфических для данной подсистемы вероятностных характеристик марковской цепи с множеством значений M_{j-1}.

Обозначим через u_t входной сигнал модели, принимающий в каждый момент времени t определенное значение из конечного алфавита внешних воздействий $\gamma = \{0, 1, \ldots, G\}$. Значение $u_t = 0$ удобно интерпретировать как отсутствие в момент t внешних воздействий на исследуемый организм. Если программа данного эксперимента не предусматривает исследования реакции организма на внешние возмущения, то входной сигнал может отсутствовать. В этом случае автомат функциональных подсистем рассматривается как автономный стохастический конечный автомат.

Согласно принятой концепции модели, количественные характеристики программ функционирования подсистем S_{jh} каждого из верхних уровней $j = 1, \ldots, L$ определяет матричная функция $Q_j(h, u)$, $h \in M$, $u \in \gamma$, которая при фиксированных j, h ставит в соответствие каждому значению входного сигнала $u_t = u$ матрицу условных вероятностей переходов марковской цепи доминирования подсистем нижележащего уровня:

$$q_j^{kl}(h, u) = P(h_{t+1}^{j-1} = l \mid h_t^{j-1} = k, h_t^j = h, u_t = u); \quad k, l \in M_{j-1}.$$

Функциональным подсистемам на верхних уровнях иерархии отводится роль реализации более крупных программ деятельности по сравнению с подсистемами нижних уровней. Эта концепция формально выражается в предположении, что с повышением уровня иерархии марковские процессы, управляющие порядком доминирования подчиненных подсистем на непосредственно нижележащем уровне, носят все более «медленный» характер с более редкими моментами переключений. Максимальный интервал времени, в течение которого остается измененным индекс h^j подсистемы, доминирующей на j-м уровне, естественно назвать квантом деятельности уровня j и связывать с ним реализацию одной определенной программы деятельности из множества программ $M_j = \{1, \ldots, M_j\}$. В этих терминах весь период эксперимента представляет собой один квант высшего уровня L.

В каждый момент времени t, согласно данной модели, реализуются L+1 последовательно вложенных друг в друга программ деятельности, индексы которых, кроме неизменной глобальной программы на уровне L, указывают на текущее состояние автомата функциональных подсистем $h_t = (h_t^0, \ldots, h_t^{L-1})$. Элементарным квантом деятельности является максимальный интервал, в течение которого состояние неизменно. Каждое состояние автомата естественно понимать как тип элементарного кванта, связываемый с определенной упорядоченной совокупностью индексов реализуемых программ или, что эквивалентно, доминирующих подсистем $h = (h^0, \ldots, h^{L-1})$, из конечного множества типов M^*.

Стохастический автомат функциональных подсистем определяет вероятностную модель квантования деятельности как последовательность случайных процессов понижающихся уровней, в которой случайный процесс высшего уровня h_t^{L-1} с множеством значений M_{L-1} является условно марковским относительно входного сигнала u^t, а каждый следующий процесс h_t^{L-j}, $j = 1, \ldots, l, \ldots, L$ с множеством значений M_{L-j} — условно марковским относительно u_t и предыдущего процесса h_t^l. Условные марковские свойства случайных процессов квантования задаются на высшем уровне h_t^{L-1} — матричной функцией $Q_0(u_t)$, а на каждом следующем уровне h_t^{l-1} — матричными функциями $Q_l(h_t^l, u_t)$, элементами которых являются условные вероятности переходов $q_t^{h^0}(u_t)$ и $q_t^{h^l}(h_t^l, u_t)$.

Таким образом, структура стохастического автомата функциональных подсистем задается упорядоченной совокупностью $(L, M_0, \ldots, M_{L-1}, \gamma)$, элементами которой являются число уровней иерархии, множества подсистем на каждом уровне и алфавит входного сигнала. Вероятностные характеристики автомата задает совокупность матриц $Q_j(h, u)$, $h \in M_j$, $u \in \gamma$, $j = 1, \ldots, L$.

Физиологические процессы, модельное представление об организации которых выражает стохастический автомат функциональных подсистем, имеют скрытый характер, поэтому предполагается, что текущее состояние автомата h_t недоступно для непосредственного наблюдения. Реально наблюдается лишь полиграмма внешних проявлений деятельности функциональных подсистем, рассматриваемая в данной модели как векторный случайный процесс $x_t = (x_t^1, \ldots, x_t^k)$, характеристики которого в пределах каждого элементарного кванта деятельности остаются постоянными в терминах некоторой вероятностной модели и определяются типом кванта $h \in M^*$ (рис. 1). Выбор модели экспериментальной полиграммы составляет отдельную проблему.

Квантовая модель экспериментальной полиграммы

Пусть ϑ_i, $i = 1, 2, 3, \ldots$ — моменты времени, соответствующие границам элементарных квантов деятельности, g_i — тип i-го кванта $h_i = g_i$, $\vartheta_i < t \leqslant \vartheta_{i-1}$, $g_i \in M^*$. В совокупности последовательность (ϑ_i, g_i) на

чальных моментов и типов квантов составляет случайный поток классифицированных событий, вероятностные характеристики которого полностью определяются структурой $(L, M_0, \cdots, M_{L-1}, \gamma)$ и параметрами $Q_j(h, u)$, $h \in M_j$, $u \in \gamma$, $j = 1, \cdots, L$ стохастического автомата функциональных подсистем.

Достаточно общим модельным представлением об отражении последовательности элементарных квантов на экспериментальной полиграмме является представление о соответствующих фрагментах $X_{\theta_i}^{\theta_{i+1}-1} = (x_{\theta_i}, \cdots, x_{\theta_{i+1}-1})$ наблюдаемого случайного процесса $x_t = (x_t^1, \cdots, x_t^K)$ как о примыкающих друг к другу случайных векторах, размерность каждого из которых K_i определяется числом компонент полиграммы K и длительностью элементарного кванта $\tau_i = \theta_{i+1} - \theta_i$, а условная плотность распределения $f_{g_i}(X_{\theta_i}^{\theta_{i+1}-1} | X_{\theta_i-n}^{\theta_i-1}, g_i)$ относительно фрагмента предыстории $X_{\theta_i-n}^{\theta_i-1} = (x_{\theta_i-n}, \cdots, x_{\theta_i-1})$ некоторой конечной длины n — типом кванта g_i. В параметрическом варианте такая модель полностью задается параметрическим семейством условных плотностей распределений $f_g(X_\theta^{\theta+\tau-1} | X_{\theta-n}^{\theta-1}, c)$, $\tau = 1, 2, 3, \cdots$ и набором значений параметра $c(g)$, $g \in M^*$ для каждого типа квантов. При заданных вероятностных моделях последовательности квантов и наблюдаемого процесса задача определения границ и типов элементарных квантов деятельности (θ_i, g_i) на экспериментальной полиграмме $X = (x_1, \cdots, x_N)$ есть задача распознавания потока случайных событий [5].

Однако при столь общем представлении о вероятностных свойствах экспериментальной полиграммы x_t в пределах элементарного кванта деятельности определенного типа выбор конкретного параметрического семейства условных плотностей распределений $f_g(X_\theta^{\theta+\tau-1} | X_{\theta-n}^{\theta-1}, c)$, $\tau = 1, 2, 3, \ldots$ является весьма непростой проблемой. Ниже предлагаются две параметрические модели для однородных фрагментов компонент полиграммы. В обоих случаях основное предположение состоит в условной независимости компонент $x_t^1, \cdots, x_t^k$ векторного случайного процесса x_t относительно случайного процесса квантования h_t.

Модель авторегрессии. Эта модель соответствует представлению об однородном фрагменте компоненты полиграммы как об отрезке реализации стационарного нормального случайного процесса. В качестве математической модели шумоподобного фрагмента используется стохастическое разностное уравнение авторегрессии [3]

$$x_t = \alpha_0 + \sum_{i=1}^{n} \alpha_i x_{t-i} - \beta \xi_t,$$

где ξ_t — последовательность независимых нормальных случайных величин с нулевым математическим ожиданием и единичной дисперсией, $a = (n, \alpha_0, \ldots, \alpha_n, \beta)$ — вектор параметров, в состав которого входят порядок авторегрессии n, коэффициенты авторегрессии $\alpha_0, \ldots, \alpha_n$ и коэффициент интенсивности шума β.

Если элементарные кванты деятельности типа $h \in M^*$ наблюдаются на s-й компоненте полиграммы в виде характерных шумоподобных фрагментов, то с этим типом квантов связывается некоторое значение вектора параметров авторегрессии $a^s(h)$, определяющее математическое ожидание и частотный спектр случайных колебаний кривой на фрагментах данного типа [6]. Порядок авторегрессии n ограничивает сложность спектра случайного процесса. При $n=1$ спектр имеет монотонный характер, что соответствует колебаниям без явно выраженной преобладающей частоты, при $n=2$ в реализациях случайного процесса могут выделяться либо, наоборот, отсутствовать колебания с некоторой частотой, при $n=4$ таких характерных частот может быть две и т. д. На рис. 3, а, б приведены примеры реализаций случайных процессов авторегрессии первого и второго порядка и их спектры.

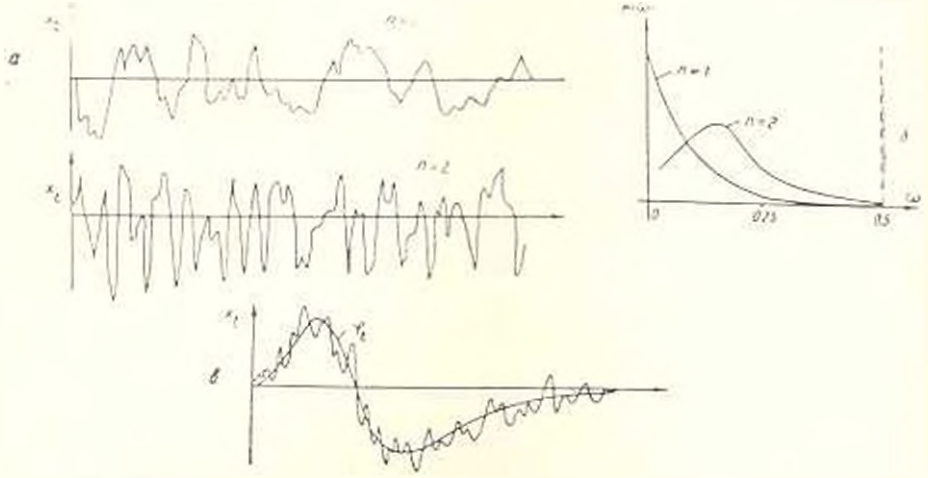

Рис. 3. Модельное представление однородных фрагментов компонент экспериментальной полиграммы: реализации процессов авторегрессии (а) и их спектры (б); фрагмент фиксированной формы (в).

Модель фрагментов фиксированной формы [4]. Другое представление об элементарном фрагменте компоненты полиграммы заключается в предположении о существовании характерной формы кривой, повторяющейся в среднем при многократной реализации кванта определенного типа. Такой фрагмент естественно рассматривать как реализацию нестационарного случайного процесса, математическое ожидание которого $M[x_t] = \varphi_{t-\nu}$ определяется временем $\eta = t - \nu$, отсчитываемым от момента начала элементарного кванта и называемым текущей фазой кванта. Зависимость математического ожидания от фазы φ_η, $\eta = 0, 1, 2, \ldots$, являющуюся признаком кванта определенного типа и называемую его эталоном, удобно представлять вектором коэффициентов ее разложения по некоторой системе базисных функций ψ_τ^η, $\tau = 1, \ldots, n$, линейно независимой на любом интервале $0 \leqslant \eta \leqslant \tau$, $\tau = n, n+1, \ldots$ (рис. 3, в).

В качестве параметрической вероятностной модели фрагмента фиксированной формы примем последовательность независимых случайных

величин, определяемую суммой параметрически заданного эталона и дискретного белого шума:

$$x_t = \sum_{i=1}^{n} \alpha_i \varphi_{t-i} + \beta \xi_t.$$

С типом $h \in M^*$ элементарных квантов, проявляющимся на s-й компоненте полиграммы в виде фрагментов характерной фиксированной формы, связывается определенное значение вектора параметров $a^s(h)$, в состав которого входят число базисных функций n, коэффициенты формы эталона $\alpha_1, \ldots, \alpha_n$ и с. к. о. шума β.

Таким образом, в рассматриваемой модели экспериментальной полиграммы $x_t = (x_t^1, \cdots, x_t^K)$ с каждым типом элементарных квантов деятельности связывается, во-первых, вид модели каждой компоненты x_t^s и, во-вторых, вектор параметров этой модели. Введем обобщенный вектор параметров $c^s(h) = [k^s(h), a^s(h)]$, где $k^s(h) = 1$, если квант типа h отражается на s-й компоненте полиграммы в виде случайного процесса, описываемого моделью авторегрессии, и $k^s(h) = 2$, если случайный процесс на фрагментах, соответствующих квантам этого типа, представляется моделью с фрагментами фиксированной формы. Тогда модель экспериментальной полиграммы полностью задается набором векторных функций $c^s(h)$, $h \in M^*$ для всех компонент полиграммы $s = 1, \cdots, K$.

Естественно предположить, что не все типы элементарных квантов деятельности из множества M^*, содержащего M^* элементов, различимы на каждой компоненте регистрирующей полиграммы. Формально это предположение выражается в том, что для конкретной s-й компоненты число элементов m^s в множестве значений функции $c^s(h)$ может оказаться меньше, чем M^*. Более того, такую ситуацию следует признать типичной, поскольку если $m^s = M^*$ для некоторой компоненты, то для объективизации деятельности функциональных подсистем на всех уровнях иерархии в данной модели достаточно регистрировать только одну эту компоненту, а остальные полиграммы являются излишними.

Задачи анализа экспериментальных данных

Рассматриваемая модель по существу представляет собой композицию двух стохастических операторов, первый из которых преобразует конечнозначный входной сигнал $u_t \in \Sigma$ в конечнозначную случайную последовательность $h_t \in M^*$, а второй осуществляет преобразование этой последовательности в векторный случайный процесс x_t. Роль первого оператора играет стохастический автомат функциональных подсистем, а второго—квантовая модель экспериментальной полиграммы. В рамках предложенной структуры этих моделей каждая из них задается конечным набором параметров, причем сложность моделей, определяющая число свободных параметров, может быть, вообще говоря, сколь угодно высокой (рис. 4).

Совокупность входного сигнала (программы эксперимента) $U = (u_1, \ldots, u_N)$ и выходного сигнала модели в целом (экспериментальной

полиграммы) $X=(x_1,\ldots x_K)$ в течение эксперимента $t=1,\ldots,N$ представляет собой массив экспериментальных данных. Промежуточный сигнал (последовательность состояний стохастического автомата функцио-

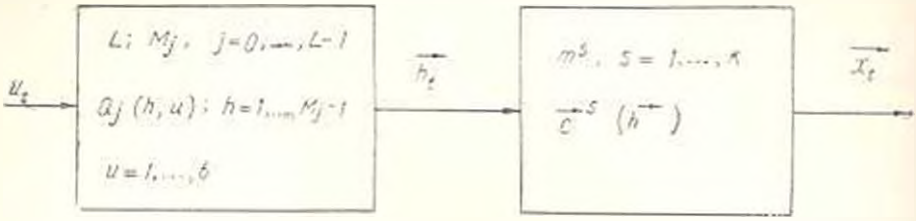

Рис. 4. Модель данных физиологического эксперимента как композиция двух стохастических операторов.

нальных подсистем) $H=(h_1,\cdots,h_K)$, $h_t=(h_t^1,\cdots,h_t^K)$ недоступен для непосредственного наблюдения. В терминах предложенной модели анализ данных экспериментов (U, X) в общем случае сводится к ее идентификации, т. е. к определению структуры $L, M_0,\ldots, M_{L-1}$ и параметров $Q_j(u)$, $Q_j(u, h)$, $u\in\gamma$, $h\in M_{j-1}$, $j=1,\cdots, L-1$ стохастического автомата функциональных подсистем, числа m^s, $s=1,\cdots, K$ и параметров $c^s(h)$, $h\in M^s=M_0\times\cdots\times M_{L-1}$ моделей элементарных фрагментов полиграммы и восстановлению последовательности H внутренних состояний автомата, определяющей иерархическое квантование деятельности функциональных подсистем в ходе эксперимента.

Возможны и более частные постановки задачи анализа данных. Если, например, в ходе предыдущих исследований выдвинуто несколько вариантов структуры модели взаимодействия функциональных подсистем, то анализ данных может сводиться к проверке гипотез о соответствии этих моделей экспериментальным данным и выбору одной из моделей, значимо более предпочтительной, нежели другие.

Общая задача идентификации модели в целом естественным образом распадается на две отдельные задачи идентификации модели полиграммы и иерархической модели функциональных подсистем, решаемые последовательно.

Идентификация квантов: модели экспериментальной полиграммы сводится по существу к выделению и классификации однородных фрагментов каждой компоненты полиграммы в отдельности. Если для представления однородных фрагментов s-й компоненты полиграммы x_t^s выбрана модель авторегрессии, то при фиксированном числе классов фрагментов m^s и фиксированном порядке авторегрессии и параметры классов $c^s(h)$, $h=1,\ldots, m^s$ можно оценить с помощью алгоритмов, предложенных в работах [7, 10]. Аналогичные алгоритмы разработаны также для модели с фрагментами фиксированной формы [4]. Те же принципы могут быть использованы для построения алгоритмов, допускающих чередование на одной и той же кривой фрагментов с моделями обоих видов. Мощным инструментом для оценивания числа классов и порядка моделей является информационный критерий Акаике [8].

Пусть в результате анализа s-й компоненты полиграммы выделено m^s классов фрагментов. Обозначим через $A^s=\{1,\ldots, m^s\}$ множество ви-

дексов классов. Каждому моменту времени $t = 1,..., N$ поставим в соответствие индекс $e_t^s \in A_s$, указывающий класс фрагмента s-й компоненты, содержащего этот момент времени. Цепочка индексов $e_1^s, \cdots, e_N^s$ характеризует структуру этой компоненты полиграммы, а совокупность таких цепочек для всех компонент $s = 1,..., K$ является агрегированным представлением всей полиграммы $X = (x_1,...,x_N)$ в целом.

Образуем вектор индексов $e_t = (e_t^1, \cdots, e_t^K)$ $e_t^s \in A_s$, указывающий классы фрагментов, содержащих момент времени t на отдельных компонентах полиграммы. Каждый максимальный интервал времени, в течение которого все компоненты вектора h_t неизменны, естественно интерпретировать как элементарный квант деятельности. Объективно наблюдаемая последовательность h_t рассматривается как отражение последовательности h_t состояний гипотетического автомата функциональных подсистем.

Последовательность векторов индексов $E = (e_1, ..., e_N)$ будем называть эмпирической последовательностью элементарных квантов в отличие от теоретической последовательности $H = (h_1, ..., h_N)$. Границы элементарных квантов в этих последовательностях совпадают, однако множества значений различны. Множество $A^* \subset A_1 \times \cdots \times A_K$ различных значений e в последовательности E назовем эмпирическим множеством типов элементарных квантов в отличие от теоретического множества типов $M^* = M_0 \times ... \times M_{L-1}$, определяемого структурой стохастического автомата функциональных подсистем. Число элементов множества A^* в общем случае не превосходит, а в реальной ситуации, как правило, меньше, чем число элементов M^*.

Каждое значение $e = (e^1, ..., e^K) \in A^*$, указывающее совокупность значений вектора параметров модели для фрагментов отдельных компонент полиграммы, следует интерпретировать как характеристику внешнего проявления определенного теоретического типа элементарных квантов $h \in M^*$. При этом нескольким теоретическим типам может соответствовать один и тот же эмпирический тип. В отличие от внешней характеристики вектор индексов $h = (h^1, ..., h^{L-1})$ дает внутреннюю интерпретацию каждого теоретического типа элементарных квантов, связывая с каждым элементом множества M^* набор индексов доминирующих подсистем на всех уровнях иерархии. Определение числа теоретических типов M^* элементарных квантов и поиск интерпретации элементов множества M^* составляют основное содержание второго этапа анализа данных.

Идентификация стохастического автомата функциональных подсистем включает в себя определение его структуры и параметров на основе анализа агрегированного представления экспериментальной полиграммы в виде эмпирической последовательности элементарных квантов $E = (e_1, ..., e_N)$ совместно с входным сигналом $U = (u_1, ..., u_N)$. В понятие структуры автомата функциональных подсистем дополнительно к числу уровней L и числам подсистем на каждом уровне $M_0, ..., M_{L-1}$ должно быть включено также отображение $e(h)$ множества теоретических типов элементарных квантов $M^* = \{h\}$ в множество эмпирических типов $A^* = \{e\}$. Условимся обозначать это отображение символом Γ. Если

определены численные значения матриц условных вероятностей $Q_L(u)$, $Q_j(u, h)$, $j=1,...,L-1$ и, следовательно, условные вероятностные свойства случайной последовательности элементарных квантов h_t, то отображение Γ определяет условные вероятностные свойства случайной последовательности эмпирических квантов e_t относительно входного сигнала u_t.

При фиксированном входном сигнале $U=(u_1,...,u_N)$ случайная последовательность h_t есть марковская цепь, определяемая матрицей условных переходных вероятностей $R(u_t)$ с $M^*\times M^*$, $M^*=M_0M_1...M_{L-1}$ элементами

$$r(h_t, h_{t-1}, u_t) = q(h_t^{L-1}, h_{t-1}^{L-1}, u_t) \prod_{j=1}^{L-1} q(h_t^{j-1}, h_{t-1}^{j-1}, h_t^j, u_t).$$

Условимся обозначить символом B предполагаемую структуру автомата функциональных подсистем в целом $B=(L, M_0,..., M_{L-1})$. Пусть h_0 — начальное состояние автомата. Поскольку нумерация подсистем произвольна, то можно считать, что $h_0=(1,...,1)$, т. е. что на каждом уровне в начальный момент времени $t=0$ доминировала подсистема с номером $h_t^j=1$. Тогда условная вероятность реализации теоретической последовательности элементарных квантов $H=(h_1,...,h_N)$ определяется произведением

$$r(H|U, h_0; B, R) = \prod_{t=1}^{N} r(h_t, h_{t-1}, u_t).$$

Для всякой эмпирической последовательности элементарных квантов $E=(e_1,...,e_N)$ предполагаемые отображение Γ и структура автомата B выделяют множество $H(\Gamma, E)$ последовательностей H, не противоречащих E. Следовательно, условная вероятность появления на выходе стохастического автомата конкретной последовательности E, зарегистрированной в результате эксперимента, есть сумма

$$p(E|U, h_0; B, R, \Gamma) = \sum_{H \in H(\Gamma, E)} r(H|U, h_0; B, R).$$

Для идентификации стохастического автомата функциональных подсистем удобно использовать информационный критерий Акаике [8], представляющий собой в сущности критерий максимального правдоподобия с некоторой поправкой, позволяющей сравнивать модели с разным числом параметров. В результате идентификации будет найдена структура (рис. 2), сложность которой не навязывается априори, а отражает реально различимые детали и закономерности данных эксперимента в рамках принятой общей концепции модели.

Алгоритмы идентификации модели такого вида нуждаются в специальной разработке. В частности, может оказаться естественным предположение, что множество эмпирических типов элементарных квантов $A^*=\{e\}$ непосредственно отражает лишь множество функциональных подсистем нижнего уровня $M_0=\{h^0\}$. Такое предположение формально выражается в том, что на множестве теоретических типов квантов $M^*=\{h\}$ отображение Γ является константой по компонентам $h^1,..., h^{L-1}$ вектора индексов h. Тогда на каждом интервале постоянства $u_t=u$ входного сигнала $U=(u_1,...,u_N)$ случайная последовательность

eᵢ может рассматриваться как марковская цепь чередования индексов подсистем нижнего (нулевого) уровня со скачкообразно изменяющейся матрицей переходных вероятностей $q(h_i^0 h_{i-1}^0, h_i^1, u)$. Каждое значение этой матрицы соответствует определенной подсистеме первого уровня, а последовательность этих значений, в свою очередь, есть марковская цепь со скачкообразно изменяющимися переходными вероятностями и т. д. Такие случайные процессы названы многоуровневыми структурными случайными процессами. Алгоритмы их анализа могут быть приняты в качестве основы для разработки алгоритмов идентификации стохастического автомата функциональных подсистем.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Агаян Г. Ц.* Автореф. докт. дисс., М., 1981.
2. *Агаян Г. Ц.* Вест. АМН СССР, 2, 53—60, 1985.
3. *Бокс Дж., Дженкинс Г.* Анализ временных рядов. Прогноз и управление, 1, 2, М., 1974.
4. *Воробьев С. А.* Автоматика и телемеханика, 8, 89—93, 1985.
5. *Моттль В. В.* Автоматика и телемеханика, 4, 92—100, 1985.
6. *Моттль В. В., Мучник И. Б., Яковлев В. Г.* Автоматика и телемеханика, 8, 84—95, 1983.
7. *Моттль В. В., Яковлев В. Г.* В сб.: Статистические проблемы управления, 65, 135—144, Вильнюс, 1984.
8. Современные методы идентификации систем (под ред. П. Эйкхоффа). М., 1983.
9. *Судаков К. В.* Вест. АМН СССР, 2, 3—11, 1985.
10. *Яковлев В. Г.* Автореф. канд. дисс., М., 1983.

Поступило 22.XI 1987 г.

Биолог. ж. Армении, т. 41, № 3, 1988 УДК 121.615.127.015+616.005.8

ВЛИЯНИЕ ЭТПЕНАЛА НА НЕКОТОРЫЕ СТОРОНЫ МЕТАБОЛИЗМА МИОКАРДА ПРИ ЛЕЧЕНИИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИНФАРКТА

Е. Г. ДЖАНПОЛАДЯН, К. Г. КАРАГЕЗЯН, В. М. САМВЕЛЯН, Л. М. ОВСЕПЯН

Институт кардиологии МЗ АрмССР, Ереван

Изучали действие этпенала в дозе 2 мг/кг на некоторые показатели метаболизма сердечной мышцы в динамике экспериментального инфаркта миокарда. Получены данные, свидетельствующие о восстановлении тканевого дыхания с упорядочением коэффициента Р/О, нормализации уровня суммарных и индивидуальных фосфолипидов, лимитировании интенсивности течения процессов свободнорадикального окисления липидов с максимальным приближением к исходным показателям на 3-й неделе эксперимента.

Ուսումնասիրվել է 2 մգ/կգ դոզայով էթփենալի ազդեցությունը սրտամկանի նյութափոխանակության որոշ ցուցանիշների վրա սրտամկանի փորձարարական ինֆարկտի դինամիկայում։