

постинсультных больных со спастическими парезами и параличами позволяет добиться положительных результатов в комплексном восстановительном лечении.

#### Список литературы

1. Белая Н.А. Руководство по лечебному массажу. М. Медицина, 1983. – 125 с.
2. Бернштейн Н.А. Физиология движений и активности. – М.: Наука, 1990. – 392 с.
3. Белова А.Н. Нейрореабилитация: Руководство для врачей. – М.: Антидор, 2000. – 568 с.
4. Белова А.Н., Щепетова О.Н. Руководство по реабилитации больных с двигательными нарушениями. – М., 1998. – С. 30 – 33.
5. Гаваа Лувсан. Традиционные и современные аспекты восточной рефлексотерапии. – 3-е изд., перераб. – М.: Наука, 1992. – 632 с.
6. Гехт А.Б., Бурд Г.С., Селихова М.В., Яиш Ф.К., Беляков В.В. Нарушение мышечного тонуса и их лечение в раннем восстановительном периоде ишемического инсульта // Журнал неврологии и психиатрии им. С.С.Корсакова. – 1998. – №10. С. 248 – 251.
7. Кадыков А.С., Черникова Л.А., Шахпаранова Н.В. Реабилитация неврологических больных. – М.: МЕДпресс-информ, 2009. – 560 с.
8. Качан А.Т. Иглотерапия и «точечный» массаж при спастических геми – и параспарезах // Учебное пособие. – СПб.: издание СПбМАПО, 2010. – 23 с.
9. Клиническая неврология с основами медико-социальной экспертизы: Руководство для врачей / Под ред. А.Ю.Макарова. – СПб.: ООО «Медлайн-Медиа», 2006. – 600 с.
10. Скворцова В.И., Гудкова В.В. и др. Принципы ранней реабилитации больных с инсультом // Журнал неврологии и психиатрии им. С.С.Корсакова. – 2002. – №7. – С.28– 33.
11. Яроцкая Э.П. Рефлексотерапия заболеваний внутренних органов. – Харьков, 1994. – 160 с.
12. Tokujiro Namikoschi. Japanese finger-pressure therapy-shiatsu. Japan Publications. Inc. Tokyo, – 1988 – 83 p.

### АНАЛИЗ ЖИВЫХ СИСТЕМ ПО ДЛИННЫМ ВРЕМЕННЫМ РЯДАМ МЕТОДАМИ НЕЛИНЕЙНОЙ ДИНАМИКИ

Лыков И.А., Быстрой Г.П.,  
Найдич А.М., Охотников С.А.

Уральский государственный  
университет им. А.М. Горького

В данной статье рассмотрена новая комплексная методика анализа длинных хаотиче-

ских временных рядов, порождаемых открытыми нелинейными живыми системами, методами нелинейной динамики, включая фрактальный подход. Показано её применение для анализа временных рядов электрокардиограмм с целью выявления патологии на ранней стадии, не проявляющейся в на кардиограммах явном виде, и рядов, полученных при моделировании сокращения миофибрилл. Применение данной методики устанавливает новые закономерности в работе открытых нелинейных живых систем.

Нелинейные свойства живых систем позволяют получать максимальный отклик при малых управляющих сигналах, а хаос приводит к устойчивости системы в связи с повышением степеней свободы [1]. Нелинейная динамика предлагает следующие способы анализа нелинейных свойств систем по временным рядам: метод псевдофазовых и фазовых портретов, расчет показателей Ляпунова и определение времени забывания начальных условий, эволюции фазового объёма, анализ аттракторов фазовых траекторий. К последнему относятся анализ корреляционной размерности и оценка минимума энтропии Колмогорова через корреляционный интеграл а также вычисление спектра обобщённых размерностей Реньи.

#### Используемые методы

1. *Псевдофазовый портрет.* Псевдофазовый портрет (ПФ) определяет зависимость каждого последующего значения от предыдущего:  $x_{k+\Delta} = f(x_k)$ ,  $\Delta$  – временная задержка. Размывание ПФ происходит после забывания нелинейной системой начальных условий.

2. *Фазовый портрет.* Фазовый портрет (ФП) связывает значение показателя со скоростью его изменения. Циклическое поведение фазовой траектории свидетельствует о наличии притягивающего множества (аттрактора). Характеристикой ФП является фазовый объём.

3. *Показатели Ляпунова.* Хаос в детерминированных системах подразумевает чувствительную зависимость от начальных условий: две траектории, близкие друг к другу в начальный момент времени, экспоненциально расходятся за незначительное время, характеристикой такого расхождения является положительный показатель Ляпунова  $\lambda_p$ , тогда расстояние между траекториями:  $\delta(t) = \delta_0 \exp(\lambda_p t)$ . Наряду с периодическими расхождениями траекторий в устойчивой системе происходит и их сжатие. Для характеристики сжатия траекторий при наличии регулярного процесса используется отрицательный показатель Ляпунова  $\lambda_n$ .

4. *Время забывания начальных условий* – это время, за которое система полностью забывает

начальные условия,  $\delta$  выходит на насыщение. Оно является характеристикой памяти системы. Для определения времени забывания начальных условий ( $t_r$ ) используется выражение (Г. Быстрой):  $t_r = (\lambda_p)^{-1} \ln(\overline{\Delta\Gamma} / \mu_0)$ , где  $\mu_0$  – начальный,  $\overline{\Delta\Gamma}$  – конечный фазовые объёмы.

5. *Эволюция фазового объёма.* Фазовый объём (ФО) – объём, занимаемый траекторией в фазовом пространстве. В консервативных системах ФО со временем не меняется. В системах с хаосом происходит его сжатие до некоторого предельного значения. Для таких систем существует связь показателей Ляпунова с эволюцией фазового объёма  $V(t)$ :  $V(t) = \mu_0 \cdot \exp(t / \tau_0)$ , где  $\tau_0 = 1/(\lambda_p + \lambda_0 + \lambda_n)^{-1}$ ,  $|\tau_0|$  – характерное время изменения ФО.

6. *Спектры пульсаций.* Использование спектрального подхода позволяет интерпретировать в качестве некоторого закона зависимость мощности пульсаций сигнала от частоты:

$S(f) \sim 1/f^\alpha$ . Установление подобных закономерностей является необходимым элементом изучения хаотической динамики переменных в любой рассматриваемой системе.

7. *Показатель Хёрста (H)* – является мерой персистентного (сохранение тенденции,  $0,5 < H < 1$ ) или антиперсистентного (смена тенденции,  $0 < H < 0,5$ ) поведения ряда (при наличии самоподобия). Метод был расширен для анализа временных рядов произвольной формы. Для расширенного анализа необходимо построение  $H$  от временного масштаба.

8. *Обобщённые размерности Реньи* – являются важным показателем однородности аттрактора. Особенно важны для анализа живых систем геометрическая размерность ( $D_0$ ), информационная ( $D_1$ ) и корреляционная ( $D_2$ ). Размерность  $D_0$  отражает структурную неоднородность системы,  $D_1$  – информационную сложность,  $D_2$  – динамическую неоднородность.

9. *Минимум энтропии Колмогорова.* Обобщение понятия корреляционного интеграла позволяет найти оценку снизу энтропии Колмогорова – важнейшей характеристики хаотических систем. Если минимум энтропии Колмогорова  $K$  больше нуля, следовательно сама энтропия также положительна, что свидетельствует о наличии хаотических процессов в работе сердечной мышцы. При  $K \rightarrow 0$  наблюдается переход к регулярному процессу.

#### **Применение методов нелинейной динамики в анализе живых систем**

Используя корреляционную размерность и метод вычисления минимальной размерности вложения исследовалась модель сокращения миофибрилл [2], которая учитывает изменение

концентрации ионов кальция в саркоплазматическом ретикулуме (СР) при фиксированном значении концентрации АТФ. Данная модель сводится к системе уравнений Лоренца, которые описывают механические процессы, связанные с сокращением, включая вязкоупругость. К данной системе добавляется уравнение, описывающее изменение концентрации ионов кальция в растворе, при этом предполагается постоянство концентрации АТФ. Приведённые выше методы показывают, что система персистентная; уменьшение приведенной концентрации ионов кальция со временем ограничено значением  $10^{-7}$  моль/м<sup>3</sup>, по достижению которого приведенная концентрация начинает возрастать, что указывает на приход к СР нервного импульса и хорошо согласуется с наблюдаемыми явлениями.

#### **Применение методов нелинейной динамики в анализе ЭКГ**

Обнаружено, что при патологии миокард обладает малой информационной памятью, в нем преобладают случайные процессы, нарушается регулярность процессов возбуждения и функция рассеяния механической энергии, что приводит к перегреву мышцы, уменьшается функциональный резерв сердца [3]. Использование перечисленных методов для анализа состояния миокарда по временным рядам электрокардиограмм позволяет выявить и спрогнозировать развитие аритмии, что не может быть сделано при обычном анализе ЭКГ.

Таким образом, приведённые методы позволяют провести комплексный анализ нелинейных живых систем, позволяющий определить основные хаотические характеристики и параметры системы, в том числе для выявления нарушений в работе таких систем.

#### **Список литературы**

1. Быстрой Г.П. Термодинамика неравновесных процессов в открытых нелинейных физико-химических системах с детерминированным хаосом: автореф. дис. д-ра физ. — мат. наук: 02.00.04 // Г. П. Быстрой; Урал. гос. ун-т им. А. М. Горького. – Екатеринбург: 2009. — с. 41: ил. — Библиогр.: с. 31-34 (79 назв.).
2. Охотников С.А., Быстрой Г.П., Лыков И.А. Массоперенос и волны переключения в системе сокращающихся миофибрилл в присутствии раствора с ионами кальция // Вестник кибернетики [Электронный ресурс]. – Электрон. журн. – Тюмень: ИПОС СО РАН, 2010. – №9. – С. 99-108. – Режим доступа: <http://www.ipdn.ru>, свободный.
3. Найдич А.М. Структурная неоднородность левого желудочка и ремоделирование миокарда // Научно-практический журнал «Бюллетень сибирской медицины»; Т. 1, 2006. С. 38-45.