

налов не меняются (рис.1б). Формирование высокой плотности двойников свидетельствует о существовании большой концентрации барьеров для кристаллизации, каковыми могут быть развитая внешняя поверхность сотообразной структуры, а также адсорбированные атомы кислорода и углерода [2].

\* \* \*

Анализ результатов исследования позволил предложить модель формирования радиационных дефектов в кристаллическом Ge при имплантации тяжелых примесей. В модели предполагается, что энергия, выделяющаяся при торможении ионов в ядерную подсистему, приводит к существенному ослаблению связей поверхностных атомов с подложкой, что, в свою очередь, облегчает условия их поверхностной миграции. Предполагается также, что формирование сотообразной структуры является следствием поверхностной миграции атомов из впадин к пикам. Как показали предварительные теоретические оценки, такое поверхностное состояние атомов Ge является энергетически выгодным. Ранее сообщалось, что при термическом напылении в вакууме на монокристаллы Ge наблюдали столбчатый рост пленок Ge [5]. По-видимому, в зарожении и эволюции сотообразной структуры заметную роль также играют процессы физического распыления с последующим поверхностным осаждением распыленных атомов.

Работа выполнялась при финансовом содействии Фонда фундаментальных исследований Республики Беларусь (грант Ф98-003).

1. Appleton B.R., Holland O.W., Narayan J. at all. //Appl.Phys.Lett. 1982. Vol.41. №8. P.711.

2. Holland O.W., Appleton B.R., Narayan J. // J.Appl.Phys. 1983. Vol.54. №5. P.2295.

3. Coleman M.V., Thomas D.J.D. // Phys.Stat.Sol. 1967. Vol.24. №2. P.K111.

4. Custer J.S., Thompson M., Jacobson D.C. at all. // Appl.Phys.Lett. 1994. Vol.64. №4. P.437.

5. Nakhodkin N.G., Bardamid A.F., Novoselskaya A.I. //Thin Solid Films. 1984. Vol.112. P.267.

Поступила в редакцию 27.04.99.

УДК 621.391:537.86:539.182

А.В.СИДОРЕНКО

## МЕТОД НЕЛИНЕЙНОЙ ДИНАМИКИ ДЛЯ АНАЛИЗА БИОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ МОЗГА ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ ЦЕНТРАЛЬНОЙ НЕРВНОЙ СИСТЕМЫ

An analysis of the bioelectric brain activity is carried out by the nonlinear dynamics method. This method may be used to differentiate the manifestations of excitation and retardation processes.

Традиционными методами для анализа биоэлектрической активности мозга являются статистические и спектральные методы [1,2]. Получаемая при этом информация носит интегральный характер и не всегда достаточна, чтобы идентифицировать функциональное состояние организма. Регистрируемые различные типы электроэнцефалограммы при изменении функционального состояния ЦНС (центральной нервной системы) содержат периодические и непериодические составляющие. Природа стохастичности электроэнцефалограммы заключается в сложнейшей структуре взаимодействия различных отделов нервной системы. Функционируя как единое целое,

мозг проявляет свои уникальные возможности, в частности в феномене хранения и извлечения информации.

Периодическая биоэлектрическая активность, согласно представлениям о фазово-частотном способе кодирования информации в мозге, играет определяющую роль. Для адекватного функционирования система должна обладать возможностью изменения уровня активности в сторону синхронизации и десинхронизации, которую можно рассматривать как состояние детерминированного хаоса.

Целью предлагаемой работы является выявление при помощи методов нелинейной динамики критериев для оценки функционального состояния центральной нервной системы.

### Методы анализа

Спектральный корреляционный метод широко используется для обработки и анализа сигналов и достаточно подробно освещен в литературе [3]. Остановимся на одном из методов нелинейной динамики. В основу использования данных методов в физиологии положены представления о функциональных системах живого организма как открытых диссипативных динамических системах, далеких от состояния термодинамического равновесия. Их поведение описывается методами, развитыми для исследования детерминированного хаоса. Под детерминированным хаосом понимают нерегулярные колебания, порождаемые нелинейными процессами, для которых динамические законы однозначно определяют эволюцию во времени состояния системы по известной предыстории. Теория детерминированного хаоса позволяет получить количественную меру степени упорядоченности случайно-подобных сигналов. Динамическому хаосу в фазовом пространстве системы соответствует притягивающее множество, называемое странным аттрактором.

Основным преимуществом методов нелинейной динамики является то, что фазовый портрет системы может быть восстановлен из измеренных параметров, зависящих от одной переменной [4]. Параметрами, характеризующими нелинейную динамическую систему, являются корреляционная размерность  $d$  и энтропия Колмогорова  $K$ . Корреляционная размерность  $d$  отражает степень сложности системы, т.е. определяет число независимых дифференциальных уравнений, необходимых для описания системы. Энтропия Колмогорова  $K$  характеризует устойчивость работы системы, измеряемую скоростью расходимости ее траекторий в фазовом пространстве.

Для вычисления корреляционной размерности и энтропии Колмогорова может быть использован алгоритм Гроссбергера–Прокаччо [5].

Временная реализация электроэнцефалограммы (аналог для животных – электрокортикограмма)  $x(t)$  представляется в виде последовательности чисел

$$x_1, x_2, \dots, x_n,$$

где  $x_n = x(n\tau)$ ,  $\tau$  – время выборки,  $n$  – целое число.

Эта последовательность порождает  $m$ -мерные векторы, лежащие в  $m$ -мерном фазовом пространстве

$$x_i^T = (x_i, \dots, x_{i+m-1}),$$

где  $T$  – знак транспонирования.

Состояние системы в реконструированном  $m$ -размерном фазовом пространстве определяется  $m$ -размерными точками для каждой временной реализации  $x(t)$ .

Корреляционная размерность  $d$  определяется

$$d = \lim_{r \rightarrow 0} [\lg C_m(r) / \lg r],$$

где  $C_m(r)$  – корреляционный интеграл,  $r$  – размер ячейки разбиения.

Корреляционный интеграл записывается

$$C_m(r) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N^2} \sum_{i,j=1}^N \theta[r - |x_i - x_j|],$$

где  $\theta$  – функция Хевисайда.  $N$  – число точек, используемых для оценки размерности.

Найдено, что для малых  $r$  поведение функции  $C_m(r)$  может быть описано:  $C_m(r) \approx r^d$ , где  $d$  – параметр, близкий к фрактальной размерности странного аттрактора. Для достоверной оценки корреляционной размерности  $d$  размерность соответствующих псевдофазовых пространств должна удовлетворять условию Мане

$$m \geq 2d + 1.$$

Для оценки корреляционной размерности сигнала электрокортикограмм нами используется метод расчета, описанный в [6], который обеспечивает выигрыш во времени.

Энтропия Колмогорова  $K$  определяется выражением

$$K = \lim_{r \rightarrow 0} \lim_{\tau \rightarrow 0} \frac{1}{\tau} \lg [C_m(r) / C_{m+1}(r)].$$

Для открытых динамических систем энтропийные параметры целесообразно представлять в нормированном к энергии виде [7]. В нашей работе рассчитывается энтропия Колмогорова, нормированная на энергию в физиологически значимом диапазоне электрокортикограммы. В качестве нормирующей величины используется энергия в том частотном диапазоне ритмических составляющих мозга, в котором находится максимальная частота спектра.

### Аппаратурное обеспечение и особенности проведения эксперимента

Экспериментальные исследования проводились на 30 белых крысах массой 160–180 г.

Функциональное состояние центральной нервной системы изменяли при воздействии:

- 1) электромагнитных излучений,
- 2) фармакологических средств.

Электромагнитное излучение миллиметрового диапазона оказывало влияние на состояние нервной системы различным образом. Введение уретана (1 г/кг, внутривенно), наркотизирующего вещества, вызывало состояние торможения [8]. Состояние возбуждения вызывалось введением стрихнина в сенсомоторную зону больших полушарий мозга. Для регистрации электрокортикограмм животным субдурально устанавливались позолоченные электроды в соматосенсорную зону коры больших полушарий. Измерения проводились в автоматизированной установке [9], расположенной в экранированной от внешних электромагнитных полей камере. Для облучения использовано низкоинтенсивное излучение миллиметрового диапазона (плотность потока мощности 150 мкВт/см<sup>2</sup>) от серийных генераторов Г4-141 или Г4-142. Облучение осуществлялось СВЧ полем линейной поляризации, ориентированном вдоль головы животного. Формирование электромагнитного поля проводилось рупорной антенной с коэффициентом направленного действия 22 дБ и шириной диаграммы направленности 17° и

21° в плоскости магнитной и электрической составляющей поля. Усиление сигналов электрической активности мозга происходило в усилителе биоэлектрических сигналов УБФ4-03. Для автоматизации измерений использовался разработанный модуль преобразования сигналов. Обработка усиленных биоэлектрических сигналов осуществлялась компьютером типа РС АТ 486. Частота дискретизации составляла 800 Гц, длительность реализации – 12 с. Регистрация выбранных реализаций проводилась в режиме контроля и при воздействии миллиметрового излучения или введения фармакологических средств через определенные временные интервалы. Разработанное программное обеспечение позволяло осуществлять ввод экспериментальных данных в компьютер, проведение цифровой обработки сигналов, анализ электрокортикограмм на основе рассчитанных информационных параметров.

Из экспериментальных электрокортикограмм вычислялись корреляционная размерность  $d$  и нормированная энтропия Колмогорова  $E$ . Спектральная плотность мощности электрокортикограмм рассчитывалась согласно [3] при помощи преобразования Фурье. Спектральная плотность мощности электрокортикограмм  $S_n/S_0$  оценивалась в частотном диапазоне ритмических составляющих мозга:  $\delta$  – (0,5–4) Гц,  $\theta$  – (4–8) Гц,  $\alpha$  – (8–12) Гц,  $\beta$  – (12–30) Гц, где  $n$  соответственно изменялось от 1 до 4.  $S_0$  представляет собой спектральную плотность мощности в диапазоне частот от 0,5 до 30 Гц. Для каждой реализации оценивалась максимальная частота спектра мощности  $f_m$ . При определении параметров методом наименьших квадратов рассчитывались среднеквадратичные отклонения теоретических аппроксимаций от экспериментальных данных.

### Результаты и их обсуждение

На рис. 1, представляющим действие уретана на биоэлектрическую активность мозга, видны характерные изменения, свойственные переходу от бодрствующего состояния к наркотическому сну, что выражается в появлении медленных волн большой амплитуды. Спектральный корреляционный анализ показывает существенные изменения в уровне спектральной плотности мощности отдельных частотных составляющих ЭКоГ (таблица).

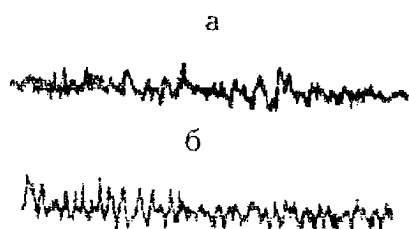


Рис. 1. Электрокортикограммы крысы: а – в контроле, б – при изменении функционального состояния (при действии наркоза)

Происходит значительное снижение вклада  $\beta$ - и  $\alpha$ -ритмов и возрастание  $\delta$ - и  $\theta$ -ритмов в суммарную биоэлектрическую активность мозга. Через 10 мин после введения наркоза более чем в четыре раза снижается максимальная частота ЭКоГ  $f_m$ . Эти типичные изменения ЭКоГ отмечаются и другими авторами при действии наркоза [8].

При проведении анализа биоэлектрической активности мозга с использованием метода нелинейной динамики удалось выявить дополнительные важные изменения в ЭКоГ. Из таблицы видно, что при действии наркоза происходит снижение коэффициента корреляционной размерности. Так, через 10 мин после введения уретана коэффициент  $d$  уменьшился с  $2,512 \pm 0,011$  до  $2,448 \pm 0,010$ , а нормированное значение  $E$  снизилось на 21,5 %. Эти сведения указывают на то, что в условиях наркоза, когда в мозгу преобладают процессы торможения, его способность переходить в новое функциональное состояние снижается, т.е. можно говорить о снижении числа степеней свободы ЦНС.

Изменения параметров электрокортикограммы крысы при введении наркоза

Время наблюдения, мин	$S_1/S_0$	$S_2/S_0$	$S_3/S_0$	$S_4/S_0$	$f_m, \text{Гц}$	$d$	$E \cdot 10^{-2}$
Бодрствование							
Контроль	0,209± 0,010	0,221± 0,008	0,061± 0,005	0,341± 0,007	6,22± 0,04	2,512± 0,011	2,179± 0,01
Наркоз							
5	0,676± 0,008	0,199± 0,01	0,045± 0,007	0,054± 0,01	2,62± 0,03	2,489± 0,012	1,852± 0,012
10	0,817± 0,01	0,094± 0,005	0,027± 0,006	0,024± 0,010	1,31± 0,03	2,448± 0,010	1,712± 0,009
15	0,813± 0,008	0,096± 0,005	0,048± 0,007	0,024± 0,008	1,21± 0,03	2,437± 0,012	1,126± 0,012

Проведенные эксперименты показали, что активизирующие работу мозга воздействия (микроволновое излучение, стрихнин) вызывают изменения показателей ЭКОГ, рассчитанных методом нелинейной динамики в противоположном направлении (рис.2,3).

Так, если наркотизированных крыс подвергнуть облучению миллиметровым излучением, происходит возрастание параметра корреляционной размерности, причем более эффективное действие излучения наблюдается на десятой минуте облучения. Максимальное значение корреляционной размерности  $d$  и нормированного значения энтропии Колмогорова  $E$  устанавливаются через час после начала воздействия. Это свидетельствует о повышении реактивности ЦНС.

Еще более выраженные изменения наблюдаются в смещении спектральных характеристик и показателей нелинейной динамики при действии на мозг стрихнина (см. рис.2,3). Функциональное состояние при этом характеризуется повышением динамичности нервной системы с максимумом действия на пятой минуте после введения стрихнина. В этом же состоянии усиливаются высокочастотные составляющие спектра ЭКОГ, мощность  $\beta$ -ритмов по сравнению с контролем возрастает на 45–54%.

К десятой минуте при сочетании действия наркоза и стрихнина происходит смещение максимальной частоты спектра в область низких частот. Поведение нормированного значения энтропии Колмогорова  $E$  аналогично корреляционной размерности, т.е. она максимальна в состоянии, определяемом максимальным значением корреляционной размерности.

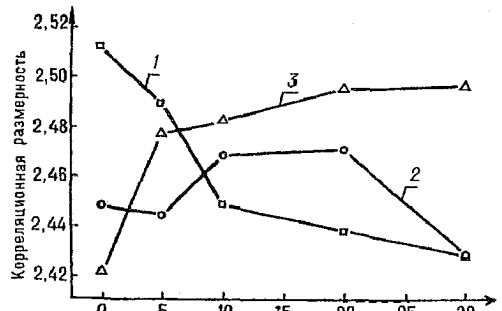


Рис.2. Изменения корреляционной размерности электрокортикограммы крысы при: 1 — действии наркоза; 2 — наркоза+миллиметрового излучения; 3 — наркоза + стрихнина

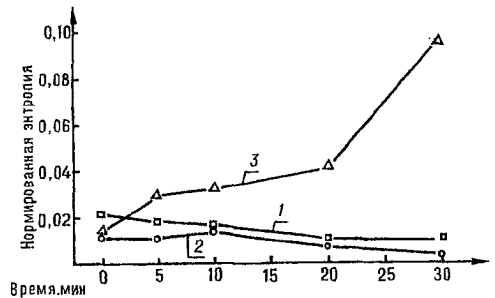


Рис.3. Изменения нормированной энтропии Колмогорова электрокортикограммы крысы при: 1 — действии наркоза; 2 — наркоза+миллиметрового излучения; 3 — наркоза+стрихнина

Анализ биоэлектрической активности мозга с использованием метода нелинейной динамики позволяет получить дополнительные сведения о функциональном состоянии ЦНС. Такие параметры, как корреляционная размерность и нормированная энтропии Колмогорова, могут быть использованы в качестве критерия для характеристики сложных режимов функционирования автоволновых биологических систем, в частности для дифференциации выраженности процессов возбуждения и торможения в мозге. Возможно, указанные параметры следует использовать для оценки функциональной динамичности ЦНС.

1. Павлова Л. П. Системный подход к психофизиологическому исследованию мозга человека. Л., 1988.
2. Зенков Л. Р. // Журн. нейропатологии и фтизиатрии. 1990. №90. С.48.
3. Марпл-мл. С. Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения. М., 1990.
4. Takens F. Detecting strange attractions in turbulence / Eds. D.A.Rand. Berlin., 1981. P.366.
5. Grassberger P., Procaccia. I. //Physical Review Letters. 1983. Vol.50. №5.P.346.
6. Сидоренко А. В., Царюк В. В., Ходасевич А. И и др. // Современные методы обработки сигналов в системах измерения, контроля, диагностики и управления. Мн., 1995. Ч.1. С.168.
7. Анищенко В. С. // Радиотехника и электроника. 1992. Т.37. №3. С.167.
8. Холодов Ю. А., Лебедева Н. Н. Реакции нервной системы человека на электромагнитные поля. М., 1992.
9. Сидоренко А. В. //Зарубежная радиоэлектроника. 1996. № 12. С. 57.

Поступила в редакцию 02.03.99.

УДК 537.87

С. В. МАЛЫЙ, П. Д. КУХАРЧИК

## РАСЧЕТ ЭФФЕКТИВНЫХ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДОМ МИНИМАЛЬНЫХ АВТОНОМНЫХ БЛОКОВ

A new calculation technique of the effective electrodynamic parameters of composite materials representing a dielectric matrix with dispersed arbitrary particles is offered. The procedure is based on the method of minimal autonomous blocks. The calculation of dielectric permeability of the composite material with two-layer spherical particles has been performed.

Композиционные материалы, представляющие собой диэлектрические матрицы с диспергированными в них частицами, имеют широкое применение в различных областях техники. Электродинамические свойства композиционных материалов находятся в сложной многопараметрической зависимости от их внутренней структуры и радиофизических свойств входящих в них компонентов.

Если структурные неоднородности распределены по объему композиционного материала периодически или статистически равномерно, а характеристические размеры неоднородностей  $a \ll \lambda$ , где  $\lambda$  – длина волны в среде, то радиофизические свойства композита могут быть описаны усредненными макроскопическими материальными параметрами – эффективными диэлектрической  $\epsilon_{eff}$  и магнитной  $\mu_{eff}$  проницаемостями. Значения эффективных электродинамических параметров композиционных материалов определяются по данным натурного или вычислительного эксперимента в результате решения соответствующей обратной задачи.

В настоящее время известны различные по точности, универсальности и эффективности аналитические и численные модели взаимодействия элек-