

довательно, расширение скатерграммы более 0,2 с и увеличение длины более 0,09 с у больных АГ можно рассматривать как один из предикторов формирования нарушений ритмической деятельности сердца.

Корреляционная ритмография при анализе последовательности кардиоинтервалов у больных АГ обладает большей информативностью по сравнению с временными и частотными методами исследования variability сердечного ритма и может быть использована для прогнозирования нарушений ритма сердца у пациентов с сердечно-сосудистыми заболеваниями.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Потешкина Н.Г., Туев А.В., Григориади Н.Е.* Временной анализ variability сердечного ритма у больных с артериальной гипертензией // *Вестн. аритмологии.* – 2002. – № 30. – С. 54-57.
2. *Михайлов В.М.* Variability ритма сердца. Опыт практического применения. – Иваново: Изд-во Ивановской госуд. мед. академии, 2000. – 200 с.

Демидова Александра Александровна

ГОУ ВПО «Ростовский государственный медицинский университет Росздрава»
в г. Ростове-на-Дону.

E-mail: aad@aanet.ru.

344068, г. Ростов-на-Дону, ул. Фурмановская, 100.

Тел.: 88632206301.

Курбатова Элеонора Владимировна

E-mail: aad@aanet.ru.

344022, г. Ростов-на-Дону, ул. Комсомольская, 19.

Тел.: 88632514504.

Demidova Alexandra Aleksandrovna

State-Owned Educational Establishment of Higher Vocational Education «Rostov state medical university Roszdrava» in a Rostov-on-Don.

E-mail: aad@aanet.ru.

100, Furmanovskaya street, Rostov-on-Don, 344068, Russia.

Phone: +78632206301.

Kurbatova Eleonora Vladimirovna

E-mail: aad@aanet.ru.

19, Komsomol street, 344022, Rostov-on-Don, Russia.

Phone: +78632514504.

УДК 616.74-009.54

Д.Ю. Душенин

АНАЛИЗ ПРИМЕНИМОСТИ МЕТОДОВ НЕЛИНЕЙНОЙ ДИНАМИКИ К ЭЭГ-МОНИТОРИНГУ

Рассмотрены основные методы анализа нелинейности систем на основе временных рядов: метод замещения данных, метод суррогатных данных, итерационное преобразование Фурье. Метод суррогатных данных применен к анализу ЭЭГ-сигнала. Получен критерий нелинейности системы – коэффициент корреляции суррогатных данных и исходного сигнала.

Нелинейность; суррогатные данные; ЭЭГ-сигнал.

D.Yu. Dushenin

ANALYSIS OF APPLICABILITY OF NONLINEAR DYNAMICS METHODS TO EEG-MONITORING

The main methods of system's analysis on the basis of time series are considered^ method of data substitution, surrogate data technology, iteration Fourier transformation. The surrogates were applied to the analysis of EEG-signals. The criterion of system's nonlinearity – correlation factor of surrogate data amd original signal – was obtained.

Nonlinearity; surrogate data; EEG-signal.

Применяемые в настоящее время методы анализа ЭЭГ справедливы для тех случаев, в которых данные показывают устойчивые и последовательные нелинейные детерминистские свойства. Если в сигнале присутствует дополнительный шум, то соотношения будут нарушены, и прогноз будет ограничен. Большинство реальных временных рядов содержат как нелинейные, так и стохастические компоненты одновременно [1]. Степень нелинейности системы можно оценить несколькими способами. Все количественные методы определения нелинейности являются неточными, а закон распределения (или ошибки исследований) аналитически оценить невозможно.

Статья посвящена исследованию методов, с помощью которых можно установить статистический характер нелинейности после изменения масштаба временного ряда, отражающего записи ЭЭГ.

Теория замещения данных. Один из наиболее важных методов оценки нелинейности – это метод замещения данных. Изначально предполагается, например, что данные представляют собой линейный гауссовский процесс, а затем пытаются опровергнуть эту гипотезу путем сравнения полученных результатов с исходными данными. Свободные параметры учитывают выборкой Монте-Карло. Ограниченная реализация получается случайной выборкой данных, подвергающихся ограничению, так что соответствующий набор параметров остается постоянным. Например, случайные данные с заданным спектром могут быть получены, если предположить, что их фазы случайные, и сделать обратное преобразование Фурье этого спектра. Данные случайной выборки с тем же самым распределением, что и заданный набор данных, могут быть получены беспорядочной перестановкой этих данных без замены.

Итерационное Фурье-преобразование. В действительности моментальное Гауссовское распределение имеют немногие временные ряды, которые описывают нелинейные системы. Неподчинение ряда этому распределению означает нелинейность описываемой системы, что может также иметь и другое простое объяснение: данные, возможно, были искажены в процессе измерения. Таким образом, имеем стационарный гауссовский линейный стохастический процесс, в результате которого получаем последовательность $\{x_n\}$, а фактическая последовательность – $G_n=G(x_n)$, где G_n – монотонная функция. Ограниченная реализация этой гипотезы требовала бы построения случайной последовательности данных с тем же спектром мощности (полностью определяющим линейный процесс) и с тем же моментальным распределением (определяющим исследуемую функцию), как и у исследуемых данных. Метод приведенного по амплитуде преобразования Фурье (АПФ), предложенный в [2], заключается в преобразовании измеряемой функции G_n и масштабировании данных по гауссовскому распределению. Затем фазы Фурье-ряда рандомизируются, и масштабирование инвертируется. Как описано в [3], эта процедура дает равномерный спектр, так как точная инверсия G_n невозможна. В [3] представлена схема, которая устраняет эту ошибку путем итерационного приближения спектра и закона распределения данных замещения. В то же время замещенные данные масштабируются к точным значениям, заданным по условию,

и затем применяют Фурье-преобразование к точным значениям амплитуд, полученным из данных. Погрешность вычисления сходится или к нулю после нескольких итераций, или к некоторому числу, которое тем меньше, чем больше длина временного ряда.

Схемы Фурье рандомизации имеют несколько недостатков из-за того, что данные представляют только один период сигнала. Возможные артефакты могут привести к погрешностям и неправомерности использования метода. Необходимо иметь в виду, что начало и конец сигнала должны приблизительно совпадать по амплитуде и фазе, тогда предположение о периодичности будет правильным. Обычно это приводит к потере нескольких точек ряда. Нужно обратить внимание на то, что данные могут быть усечены также по нескольким точкам для того, чтобы можно было произвести быстрое преобразование Фурье.

Общая ограниченная рандомизация. В [4] предложен общий метод получения случайных данных, который справедлив для указанных ограничений. С помощью этого метода можно избежать артефактов и неточности Фурье рандомизации, вычисляя функцию автокорреляции, а не Фурье-преобразование, так как последнее не предполагает периодичности. Можно расширить ограничение предыдущего метода, так как на принципиально произвольные статистические данные наблюдения могут быть наложены данные замещения. Желаемое свойство данных формулируется в терминах функции веса, которая принимает абсолютный минимум, когда это условие выполняется. Состояния, близкие к минимуму, могут быть получены методом модельной «закалки». Функция веса минимизируется для всех возможных перестановок данных [4].

Пакет TISEAN [5] содержит стандартные блоки для библиотеки операций с данными замещения, обеспечивающие выполнение определенных пользователем функций веса. В настоящее время применяется только функция автокорреляции с периодическим продолжением и без него. Также имеется модуль, который управляет процессом модельной «закалки» через схему экспоненциального затухания, и имеется модуль, который выполняет случайную перестановку данных и позволяет исключить набор точек из схемы перестановки. Модули автокорреляции используют выражение $\max_{\tau=1}^{\tau=\max} = |C(\tau) - C(\tau)data|/\tau$, где $C(\tau)$ – функция автокорреляции с периодическим продолжением или без него.

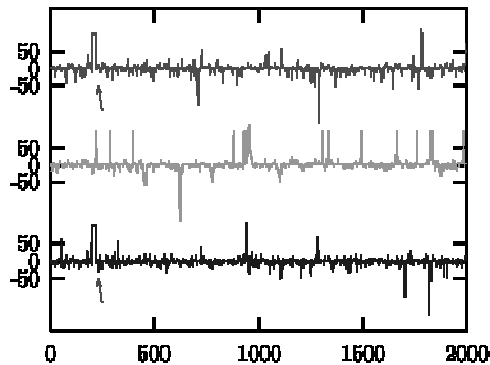


Рис 1. Вверху: данные от постоянного гауссовского линейного стохастического процесса $x_n = 0,7x_{n-1} + \eta_n$, измеренные функцией $G(x_n) = x_n^3$.

Отсчеты 200-220 – это артефакты. На среднем графике изображен сигнал, подверженный преобразованию Фурье, – артефакты проявляются в качестве увеличенного числа пиков и, следовательно, уменьшают предсказуемость.

Внизу: артефакт сохраняется вместе с распределением значений и задержек 1, ..., 25 автокорреляционной функции [6]

На рис. 1 показан пример постоянного гауссовского линейного стохастического процесса, который содержит артефакты в образцах 200–220. Метод Фурье не способен выделить артефакты. Структура артефактов распределяется равномерно на протяжении всего временного интервала, выражаясь в большом количестве пиков и меньшей предсказуемости. На самом деле данная гипотеза постоянного линейного стохастического гауссовского процесса может быть отклонена с достоверностью 95 %, используя ошибки нелинейного предсказания. Артефакт может быть ошибочно принят за нелинейность. При помощи программы `randomize_auto_exp_random` [5] можно исключить артефакты из схемы рандомизации и получить корректный результат.

Женщины:

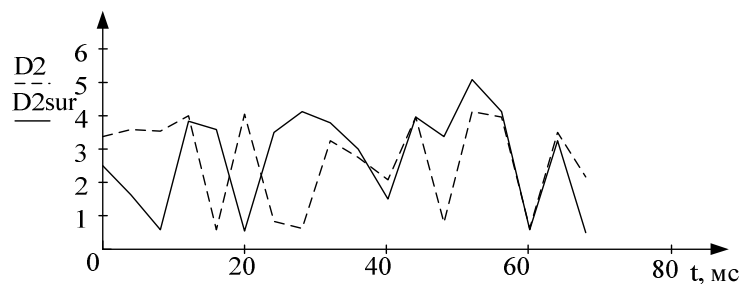


Рис. 2. Мгновенная корреляционная размерность для диагноза «невралгия». Отведение С4-А2

Анализ электроэнцефалографических сигналов. Для определения принадлежности ЭЭГ-сигналов к хаотическим по каждому из отведений рассчитывались корреляционные размерности, и затем строились графики для реального сигнала и для суррогатных данных.

Для реализации этого вида анализа использовалось программное обеспечение Tisean [5].

На рис. 2–6 показаны примеры визуального представления исследуемых временных рядов. Здесь $D2$ – мгновенная корреляционная размерность исследуемого участка нативного ЭЭГ-сигнала, $D2_{sur}$ – мгновенная корреляционная размерность временного ряда суррогатных данных.

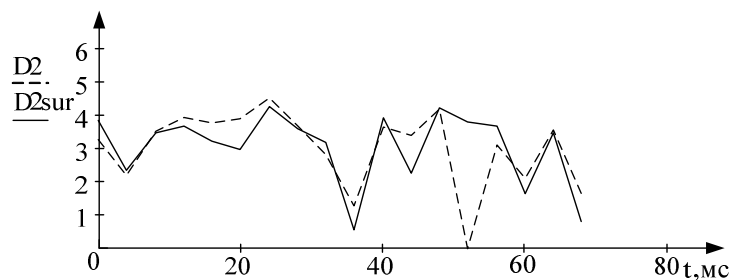


Рис. 3. Мгновенная корреляционная размерность для диагноза «рассеянный склероз». Отведение С4-А2

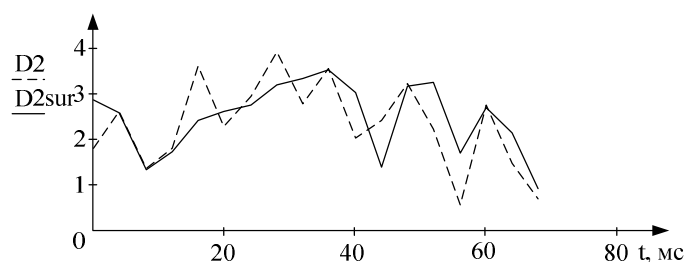


Рис. 4. Мгновенная корреляционная размерность для условно здорового пациента. Отведение С4-А2

Мужчины:

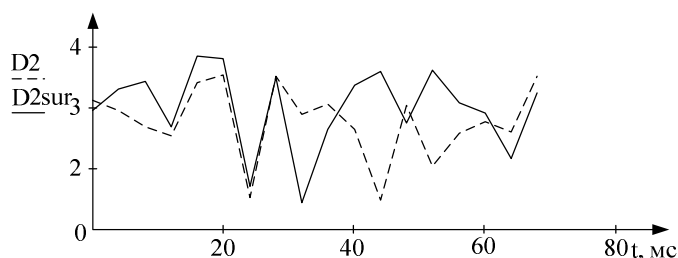


Рис. 5. Мгновенная корреляционная размерность для диагноза «лудомания». Отведение С4-А2

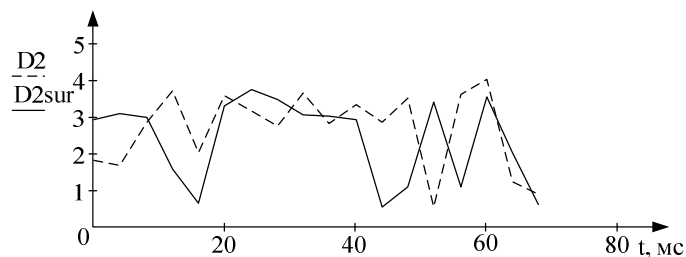


Рис. 6. Мгновенная корреляционная размерность для условно здорового пациента. Отведение С4-А2

Для получения результата теста на нелинейность методом суррогатных данных необходимо сравнить зависимости мгновенной корреляционной размерности для участка нативной ЭЭГ и суррогатных данных.

Визуальное сравнение говорит о схожести зависимостей, например, рис. 3,4, или их значительном расхождении, например, рис. 5. Однако для точного сравнения этого недостаточно. Поэтому был предложен количественный критерий меры совпадения рядов $D2$ и $D2sur$. Были вычислены коэффициенты корреляции для рядов $D2$ и $D2sur$. Из теории известно, что значение коэффициента корреляции $K > 0,6$ говорит об удовлетворительном, $K > 0,8$ – о хорошем, $K > 0,95$ – практически полном совпадении. Результаты расчета коэффициента корреляции сведены в табл. 1.

Таблица 1

Коэффициент корреляции для рядов $D2$ и $D2sur$

Коэффициент корреляции, K	Женщины	Мужчины
Условно здоровые	0,80	0,65
	0,61	0,60
	0,60	0,58
	0,78	
Невралгия	0,68	
Рассеянный склероз	0,80	
	0,68	
Лудомания		0,60
		0,69
		0,89
		0,67
		0,64
		0,75

Для дальнейшего анализа методами нелинейной динамики рекомендуется использовать те участки нативного ЭЭГ-сигнала и отведения, которые показали удовлетворительное совпадение, исходя из значения коэффициента корреляции.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Борисова О.С., Воронин В.А., Куценко Н.Н., Леонова А.В., Старченко И.Б., Чернов Н.Н.* Моделирование нелинейных сред и сигналов в акустике и медицине // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2010. – № 2 (103). – С. 14-20.
2. *Theiler J., Eubank S., Longtin A., Galdrikian B., Farmer J. D.* Testing for nonlinearity in time series: The method of surrogate data, *Physica D* 58, 77 (1992).
3. *Schreiber T., Schmitz A.* Improved surrogate data for nonlinearity tests, *Phys. Rev. Lett.* 77, 635 (1996).
4. *Schreiber T.* Constrained randomization of time series data, *Phys. Rev. Lett.* 80 (1998) 2105.
5. *Hegger R., Kantz H., Schreiber T.* Practical implementation of nonlinear time series methods: The TISEAN package, *CHAOS* 9, 413 (1999).
6. *Kantz H., Schreiber T.*, *Nonlinear Time Series Analysis*, 2nd edition, Cambridge University Press, Cambridge (2004).

Душенин Денис Юрьевич

Технологический институт федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Южный федеральный университет» в г. Таганроге.

E-mail: ddushenin@gmail.com.

347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44.

Тел.: +79185181500.

Dushenin Denis Yurievich

Taganrog Institute of Technology – Federal State-Owned Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”.

E-mail: ddushenin@gmail.com.

44, Nekrasovsky, Taganrog, 347928, Russia.

Phone: +79185181500.