

ПОДХОДЫ К РЕШЕНИЮ ПРОБЛЕМЫ КОРОТКОЙ ВЫБОРКИ ПРИ АНАЛИЗЕ ЭЛЕКТРОЭНЦЕФАЛОГРАММЫ И РЯДОВ ИМПУЛЬСНОЙ АКТИВНОСТИ НЕЙРОНОВ С ЦЕЛЬЮ УСТАНОЛЕНИЯ ИХ ФРАКТАЛЬНЫХ СВОЙСТВ

*ВОРОБЬЕВ С. А., МОГИЛЕВСКИЙ А. Я.,
ПОНОМАРЕНКО С. А., ШИЛО А В..*

В статье предлагаются подходы к преодолению проблемы короткой выборки, которая играет большое значение при изучении нелинейной динамики физиологических систем по экспериментальным данным. Эти данные показывают, что активность нейронных структур обычно не имеет регулярного периодического характера. Однако возможность считать детерминированными процессы, которые раньше классифицировались как шум, открывает для исследователей богатую информацию в области физиологии мозга. В статье приводятся соответствующие выводы.

Изучение нелинейной динамики ЭЭГ и сопряженной с ней импульсной активности нейронов представляет собой сложную и важную задачу исследования деятельности мозга. Это тем более важно, что наличие нескольких аттракторов для открытой нелинейной системы, каковой и является мозг, тесно связано с возможностью управления процессами в нелинейных средах. При этом в фазовом пространстве можно выделить границы, разделяющие области притяжения различных аттракторов. Малое изменение начальных данных вблизи этой границы может привести к качественно различному поведению на развитой стадии. Лоренц этот эффект назвал “эффектом бабочки”, поскольку в изучаемой им задаче о перемещении слоёв атмосферы, изменение начальных условий, вызванное взмахом крыльев бабочки, могло привести к глобальным изменениям в поведении всей системы [1,2].

Однако до сих пор возникают сомнения в эффективности анализа ЭЭГ с целью изучения ее динамических свойств. Основная трудность заключается в том, что отдельные функциональные состояния мозга, являясь конечными по времени, не обеспечивают, как правило, в эксперименте возможность накопления выборки достаточной длины. Функциональные состояния сменяют друг друга быстрее, чем какое-либо из них успевают стать установившимся. С другой стороны, проведение нелинейного анализа, в том числе и фрактального, возможно только в том случае, если в системе закончены переходные процессы. Вместе с тем,

фрактальный анализ принципиально не позволяет исследовать момент переходного процесса.

Несмотря на это методы теории нелинейной динамики особенно ценны для анализа экспериментальных данных, полученных из отдельного временного ряда. Их основное качество – различать случайную или детерминистскую природу динамических систем. Например, они позволяют определить минимальное число переменных, необходимых для описания динамической системы; дают критерий существования аттракторов, характеризующих детерминистские динамики; дают информацию о таких количественных свойствах как размерность.

Целью настоящей работы является экспериментальная проверка возможных подходов к анализу отрезков ЭЭГ и нейрограмм малой длины для установления их фрактальных свойств и выявление связи перестраивающейся биоэлектрической активности с результатами фрактального анализа.

Данные, получаемые при экспериментальном изучении физиологических систем, таких как нейронные структуры показывают, что их активность обычно не имеет регулярного, периодического характера. Такие нерегулярности обычно связаны с шумом или случайными стохастическими процессами, которые, в принципе, совершенно непредсказуемы, если не считать их статистических свойств. С другой стороны, широкое признание того факта, что встречающиеся в природе системы способны к хаотическому поведению, привело к попытке идентификации хаоса в лабораторных условиях.

Изучение возможной динамической модели Вилсона-Коузена генерации электрической ритмической активности головного мозга достаточно убедительно демонстрирует возможность и механизмы возникновения хаоса в таких системах [3]. Предположение о существовании хаоса в нейронных системах подтверждается также результатами математического моделирования [4]. Однако на практике обнаружить хаос нелегко. В экспериментальных системах шум взаимодействует с динамическими процессами, подчиняющимися уравнениям движения, определяющим эволюцию системы. Таким образом, эти экспериментальные системы по определению подвержены стохастическим возмущениям и поэтому трудны для теоретического рассмотрения. Возможность считать детерминированными те процессы, которые ранее классифицировались как шум, ограничивается наличием шума в изучаемой системе (в том числе в измерительном приборе). Ситуация усложняется ещё и тем, что в литературе существуют различные определения хаоса. Поэтому, при попытках экспериментально найти хаос в биологических системах, требуется крайняя осторожность.

Чтобы продемонстрировать это приведем пример использования метода first-return map, предложенного в [5], для выявления хаоса по экспериментальным данным. Утверждение авторов заключалось в том, что в измеряемых ими временных рядах импульсной активности нейронов гиппокампа крыс и генерирующих шумоподобную импульсную активность, фиксируется хаос. В тоже время, другие исследователи [6] применили методы контроля хаоса, аналогичные [5] к заведомо нехаотической системе на основе модели, генерирующей активность типа “среднее значение + белый гауссов шум”. Несмотря на принципиальное различие в моделях, используемых как в одной, так и в другой работе, были получены сходные результаты. Но если в [5] утверждается, что в системе наблюдается хаос, то [6] показывает преждевременность такого утверждения.

Следует отметить, что большинство методов, описанных в литературе, для анализа хаотических процессов в мозге являются графическими, и редко встречаются количественные методы, такие как фрактальная размерность, показатели Ляпунова или измерение энтропии. Хотя хаотическая нерегулярность в нейронах была убедительно показана при определённых условиях, значение этого “поведения” для функционирования отдельных клеток и их взаимоотношения с другими нейронами ещё должно быть выяснено.

В то же время, для большого класса прикладных задач, интересны не столько конкретные численные значения величин в данный момент в данной точке, не столько усреднение по большому временному интервалу величины, сколько сама динамика процесса. Одним из мощных методов изучения высоко сложных динамических процессов в различных системах служит метод фрактального анализа [7]. Другие количественно-визуальные методы анализа нелинейных временных рядов малой длины, содержатся, например, в [8, 9].

Мы предлагаем следующую процедуру проведения фрактального анализа по выборке короткой длины. Сначала строятся энергетические спектры анализируемых рядов. Представление спектров следует производить в дважды логарифмических координатах. Таким образом, если имелась компонента $1/f$ шума, то появляется возможность заметить и выделить её, так как было отмечено в [10], что системы с таким поведением являются шумовыми и не поддаются динамическому описанию. Фильтрацию $1/f$ шума лучше всего осуществлять на основе резонансных фильтров из работы [11]. Для фильтрованной реализации по первому минимуму автокорреляционной функции находится оптимальный временной сдвиг, используемый в процедуре Такенса [12], предназначенной для восстановления траектории динамической системы в фазовом пространстве. Эта процедура используется в силу своей простоты. С

теоретической точки зрения процедура восстановления траектории в фазовом пространстве не является принципиальной, поскольку степень адекватности восстановления зависит только от размерности того пространства, на которое производится проецирование (объемлющего пространства), а от самой процедуры восстановления с вероятностью 1 не зависит. С физической точки зрения эволюция каждой отдельной компоненты определяется всеми другими компонентами, с которыми она взаимодействует. Эта информация содержится в структуре временной зависимости, которая анализируется в процедуре фрактального анализа.

Проецирование необходимо производить последовательно в объемлющие пространства размерностей $1, 2, \dots, n$. Для каждого из объемлющих пространств находится зависимость корреляционного интеграла от радиуса покрывающих шаров при определении корреляционной фрактальной размерности ряда.

Корреляционная же размерность определяется следующим способом. Подсчитываются расстояния $P(x_i, x_j)$ между всеми точками в p -мерном пространстве. Затем вычисляется функция:

$$C(\varepsilon) = \lim_{N \rightarrow \infty} 1/N^2 * \{ \text{число} \\ \text{расстояний } P(x_i, x_j), \text{ меньших } \varepsilon \},$$

называемая корреляционным интегралом. Здесь ε радиус p -мерных шаров, покрывающих всё множество точек, N - количество таких шаров. Корреляционным показателем или корреляционной размерностью является число

$$v = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} [\ln C / \ln \varepsilon] \quad (1)$$

Определим дискретный набор $\varepsilon(t_i) = \varepsilon_i, t_i \rightarrow \infty$, где $\varepsilon(s\Delta t), s = 0, 1, \dots, 2m$ одна из динамических переменных, m - длина выборки. По этим данным можно построить набор m -мерных векторов $\zeta_k = (\varepsilon_k, \varepsilon_{k+1}, \dots, \varepsilon_{k+l-1})$ для $l = 1, 2, \dots$ и определить размерность множества $\{\zeta_k\}$ в l -мерном фазовом пространстве. Множество, состоящее из векторов ζ_k , часто называют множествами в ζ -пространстве, а процесс их построения – реконструкцией аттрактора.

Выбор Δt (смещения) является важным методическим вопросом. Именно от его успешного решения зависит, будет ли обнаружена фрактальная структура того или иного аттрактора. Процедура, приведенная выше, и была предназначена для выбора необходимого значения смещения Δt .

При этом при её разработке были использованы следующие соображения. Пусть Δt очень мало, тогда все ζ -векторы будут лежать вблизи прямой в ζ -

пространстве, где $\zeta_{k+1} = \zeta_k$. Это приведёт к тому, что интервал масштабов, на котором сосредоточен линейный участок кривой $\ln C = f(\ln \varepsilon)$, будет смещён в область очень малых масштабов и оценить его будет очень трудно.

Если же Δt будет достаточно велико, то ζ - векторы будут заполнять некоторый куб в ζ - пространстве и оценить наклон линейного участка кривой $\ln C = f(\ln \varepsilon)$ также будет трудно. Поэтому естественно выбирать Δt так, чтобы ζ_k и ζ_{k+1} были бы достаточно близки, но в наименьшей степени коррелированы. Этим требованиям удовлетворяют такие значения Δt , при которых автокорреляционная функция

$$\text{Corr}(\Delta t) = \frac{1}{T} \int_0^T \varepsilon(t) \varepsilon(t + \Delta t) dt - \left[\frac{1}{T} \int_0^T \varepsilon(t) dt \right]^2 \quad (2)$$

в первый раз достигает нуля.

Далее обработка выполняется следующим образом. Результаты вычисления корреляционного интеграла представляются в виде графиков зависимости в логарифмических координатах $\ln C = f(\ln \varepsilon)$. Затем, при рассмотрении каждой кривой находятся участки, которые имеет смысл линеаризовать. Необходимо отметить, что в подобном представлении участки кривой часто имеют неоднозначности, которые можно разделить на два типа – лакунарность и излом. Лакунарность вызвана неоднородностью фрактальной фигуры, полученной по экспериментальным данным. Излом характеризует разные наклоны кривой, а значит различные значения размерности.

Начиная с некоторых значений d - размерности аттрактора и M - размерности объемлющего пространства, кривые стремятся выйти на постоянный уровень. Далее строится график зависимости размерности d хаотического аттрактора от размерности M объемлющего пространства. Согласно [10] систематическая ошибка в определении фрактальной размерности при длине выборки 800-1000 точек лежит в пределах 0,3-0,5; что достаточно много. Погрешности, привносимые процедурой линеаризации, имеют порядок 0,005. Поэтому линеаризация вполне допустима.

Задачей данного этапа является нахождение линейных или близких к таковым участков кривой. Здесь следует учитывать то, что:

- область скейлинга (область линейного изменения $\ln C$) должна быть не меньше одного порядка для всех кривых. Более того, наиболее оптимальным представляется выбор области скейлинга как раз в пределах одного порядка, поскольку в этом случае возможно получить максимум информации об аттракторе. Иными словами, такой выбор ведёт к увеличению энтропии Колмогорова;

- необходимо по возможности избегать попадания точек моделирующего отрезка на область низких значений корреляционного интеграла [$10^{-6} - 10^{-5}$], так как объём статистической выборки в этой области очень мал для адекватного представления;

- проекции в различных объемлющих пространствах иногда бывают неудачными. Из-за этого увеличиваются вероятности ошибочной интерпретации. Поэтому важно учитывать тенденции изменения параметров кривых от проекций в объемлющих пространствах одной размерности к проекциям в объемлющих пространствах больших и меньших размерностей;

- некоторую информацию о линейных участках и областях их раздела может дать результат процедуры дифференцирования кривой;

- ошибка визуальной оценки увеличивается от проекции в объемлющем пространстве одной размерности в объемлющие пространства более высоких размерностей, так как уменьшается динамический диапазон изменения r .

Тем не менее, следует отметить, что при выделении размерности в большинстве случаев анализа ЭЭГ не наблюдается однозначный выход на плато зависимостей размерности динамической системы d от размерности пространства вложения M . Это, по видимому, связано именно с малой длиной реализаций. Адекватная же оценка размерности достигается в случае, если предельная размерность объемлющего пространства связана с количеством экспериментальных точек n в ряду неравенством [13]

$$M \leq 2 \log_{10}(n). \quad (3)$$

Для большинства анализируемых отрезков ЭЭГ и импульсной активности нейронов удовлетворительная точность достигается при M меньшем или равном 6. Учитывая, что ЭЭГ в принципе имеют достаточно высокие размерности, а также то, что для коротких временных рядов отклонение от прямой соответствующее шумовой компоненте, нарастает сравнительно медленно, не представляется возможным набрать статистику для систем с размерностью больше 2. Более того, это требование идёт в разрез с требованием стационарности процесса. Хотя процедура выделения размерности для коротких рядов неоднозначна, её выбор влияет на систематическую погрешность, но не на содержание и динамику процесса. В этих условиях не следует ставить задачу точного определения размерности, достаточно обычно лишь выявить тенденции её изменения и отличия от размерностей других опытов, в которых применялась такая же процедура нахождения размерности.

Так как в настоящее время не существует однозначного способа определения размерностей странных аттракторов динамических систем,

восстановленных по коротким реализациям, по видимому, единственным выходом является использование различных методов для определения размерности систем, а затем сравнение их результатов. Практический опыт показывает, что наиболее адекватными для выделения размерности динамических систем являются следующие подходы.

Первый способ в своей основе содержит необходимость нахождения среднего значения размерности по всей рассматриваемой области. Он даёт совокупную оценку для всего множества размерностей, отвечающего одной системе. Однако при этом заранее не известно, различны ли участки размерностных зависимостей.

Второй способ основан на максимальном приближении аппроксимирующей прямой к множеству экспериментальных точек. Он заключается в том, что строятся биссектриса угла между осями координат, где по абсциссе откладывается M , а по ординате d и аппроксимирующая прямая. При этом за значение размерности d берётся либо ордината точки пересечения биссектрисы и аппроксимирующей прямой либо ордината точки, соответствующей стандартному значению M (например, $M = 6$). Недостатком такого способа является, как и в первом, невозможность учесть наиболее репрезентативные участки исходной совокупности. Назовём этот метод – аппроксимация по минимуму отклонения.

Третий способ основан на сравнении результатов фрактального анализа для длинных (порядка 50000 точек) и коротких (порядка 2000 точек) реализаций, полученных в одних и тех же экспериментах. В соответствии с ним для определения истинной размерности по коротким реализациям следует брать среднюю величину нескольких самых высоких размерностей перед их возможным срывом вверх. Однако при этом невозможно точно установить, где начинается выход на плато. Такой метод назван – аппроксимация по предполагаемому насыщению.

Четвёртый способ состоит в том, что если наблюдается выход на “полку” по крайней мере для четырёх последовательных точек в любой области размерностной зависимости, то осуществляется аппроксимация с помощью прямой параллельной оси абсцисс. В этом случае ордината уровня насыщения берётся в качестве значения размерности. Этот метод назван аппроксимацией по уровню насыщения.

Как показывает наш опыт, при анализе коротких отрезков ЭЭГ и импульсной активности одиночных нейронов следует использовать все эти методы, но в большинстве случаев наилучшие результаты получаются с использованием методов аппроксимации по минимуму отклонения и аппроксимации по предполагаемому насыщению.

Разработанный алгоритм был использован для описания фрактальных свойств коротких участков престаимпульной ЭЭГ (4 сек, 333 точки), один из

которых приведен на рис. 1. Спектр этого ряда показан на рис.2.

В выбранных частотных диапазонах управляющего канала (α, δ , или θ). При последующем анализе было установлено, что фрактальные свойства участков соответствующих многопериодическому или монопериодическому режиму активности селектированных циклов ЭЭГ выходят на “полку”, тогда как аналогичные по длительности участки при контрольной неассоциативной стимуляции свойством насыщения не обладают. Характер насыщения при многопериодической (Рис.3) и монопериодической (Рис. 4) управляемой стимуляции несколько различен: так при последней, наряду с насыщением кривой корреляционного интеграла можно было отметить появление так называемых неразделенных аттракторов (две “полки”), возможно свидетельствующих об одновременном существовании двух конкурирующих процессов в динамической системе мозга. Искусственное удлинения рядов функциональных состояния путем добавления однородных участков престаимпульной ЭЭГ до 1024 - 6000 точек не приводит к существенному изменению характера насыщения кривой.

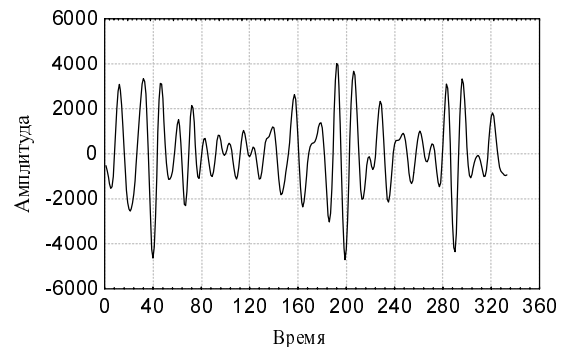


Рис.1. Нативная престаимпульная ЭЭГ.

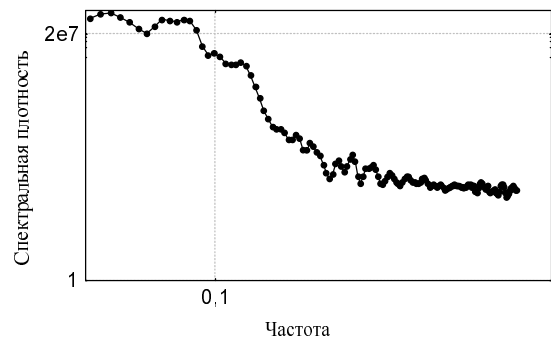


Рис. 2. Спектральная плотность престаимпульной ЭЭГ.

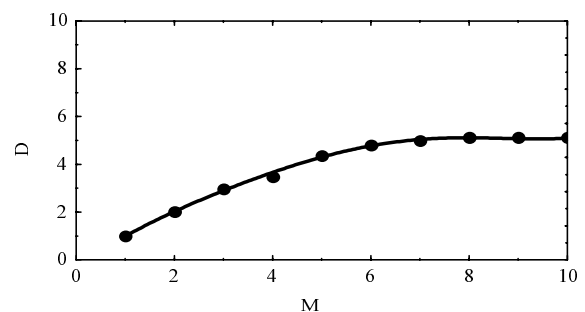


Рис. 3. Характер насыщения при многопериодической управляемой стимуляции.

Таким образом, есть основания предполагать, что если исследуемый отрезок ЭЭГ обладает фрактальными свойствами, то они могут проявляться уже на коротких реализациях. Вместе с тем удлинение изучаемого участка приводит в первую очередь к выявлению тонкой структуры процесса.

Поэтому большое количество точек, взятых для анализа биоэлектрической активности не дает полного описания сложности ЭЭГ, в связи с чем понятие размерности ЭЭГ правомерно только в сравнительном аспекте.

Для проверки разработанной методики анализа коротких реализаций с целью установления их фрактальных свойств была также проведена обработка экспериментальных данных активности нейронов моллюска Большого прудовика при различных режимах внутриклеточной стимуляции. Методика получена-

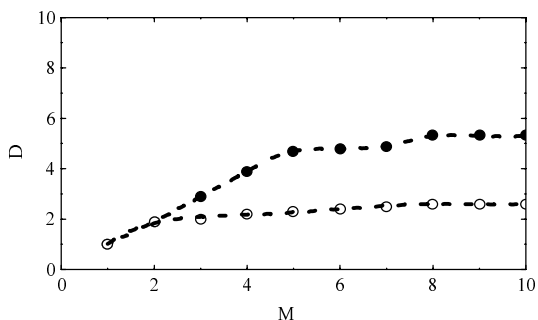


Рис. 4. Характер насыщения при монопериодической управляемой стимуляции (можно отметить появление так называемых неразделенных аттракторов (две "полки")).

ния временных рядов подробно описана в [14]. Длина полученных в эксперименте рядов не превышала 2000 точек, однако, с помощью описанной выше методики удалось установить фрактальные размерности анализируемых рядов.

Общим выводом является то, что в рассмотренных экспериментах внешняя стимуляция (кроме режима хаотического воздействия) способствует уменьшению количества систем либо их стягиванию к одной ведущей. Это уменьшение может объясняться процессами самоорганизации, при которых внутренние процессы подстраиваются под структуру воздействия. На уровне физического описания это значит, что появляется динамическая система, отвечающая вполне определенной и высоко когерентной модели нейронной активности. Возможно, что до этого активность нейрона была в том или ином смысле десинхронизирована, а потом она синхронизировалась на очень важной и, по видимому, оптимальной модели.

Литература: 1. Lorenz E.N. Deterministic nonperiodic flow // J. Atmos. Sci., 1963, 20, pp. 130-135. 2. Шустер

Г. Детерминированный хаос. Введение. – М.: Мир, 1988. – 240 с. 3. Осовец С.М., Гинзбург Д.А., Гурфинкель В.С., Зенков Л.Р., Латаш Л.П., Малкин В.Б., Мельничук П.В., Пастернак Е.Б. Электрическая активность мозга: механизмы и интерпретация // Успехи физических наук, 1983, Том 141, 1, с. 103-150. 4. Komendantov A.O., Kononenko N.I. Deterministic chaos in mathematical model of pacemaker activity in bursting neurons of snail, *Helix Pomatia* // J. theor. Biol., 1996, V. 183, pp. 219-230. 5. Schiff S.J., Jerger K., Duong D.H., Chang T., Spano M.L., Ditto W.L. Controlling chaos in the brain // Monthly Nature, 1994, V.2, 8, pp. 65-70. 6. Cristini F., Collins A. Study of the dynamical systems with Gauss's white noisy component // Phys. Lett., 1984, N94, pp. 34-49. 7. Федер Е. Фракталы. – М.: Мир, 1991. – 254 с. 8. Chang T., Sauer T., Schiff S.J. Tests for nonlinearity in short stationary time series // Chaos, 1995, V.5, 1, pp. 118-126. 9. Layne S.P., Mayer-Kress G., Holzfuss J. Problems associated with dementional analysis of electroencephalogram data // Proc. of Int. workshop of the Pecos River Ranch, 1985, pp. 246-256 10. Livinenko L.N., Ryabov V.B., Usik P.V., Vavriv D.M. Correlation dimension: the new tool in astrophysics. – Kharkov: Preprint N64, Institute of Radio Astronomy, 1992. – 53 p. 11. Kwan T., Martin K. Adaptive detection and enhancement of multiple sinusoids using a cascade IIR filter // IEEE Trans. Circuits and Systems, 1989, V.36, 7, pp. 937-947. 12. Анохин П.К. Системный анализ интегрированной деятельности нейрона // Успехи физиол. наук, 1974, Том 5, 2, с. 5-92. 13. Eckmann J.P., Ruelle D. Fundamental limitations for estimating dimensions in dynamical systems // Coping with Chaos, New York: J.Wiley&Sons, 1991, pp.312-319. 14. Могилевский А.Я., Вербный Я.И. Влияние различных режимов внутриклеточной электростимуляции на динамику адаптивных процессов нейронов // Журнал высшей нервной деятельности, 1993, Том 43, № 3, С. 102-112.

Поступила в редакцию 25.03.99

Воробьев Сергей Анатольевич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник ПНИЛАСУ ХТУРЭ. Научные интересы: искусственные нейронные сети, фильтрация и прогнозирование нестационарных процессов, фракталы и фрактальная размерность. Хобби: психология, иностранные языки, музыка. Служебный адрес: 310726, Харьков, пр. Ленина, 14; тел. (0572)409890. e-mail: svor@kture.kharkov.ua

Могилевский Александр Яковлевич, доктор биологических наук, профессор, ведущий научный сотрудник ФТИНТ НАНУ. Научные интересы: нейрофизиология, сенсорные процессы и эмоционально-мотивационная деятельность, фракталы в биологии. Хобби: психология, художественная литература, поэзия. Служебный адрес: 310137, Харьков, пр. Ленина, 47, тел. (0572) 30-85-58. e-mail: mogilevsky@ilt.kharkov.ua

Пономаренко Сергей Александрович, биофизик, сотрудник КОСС РФ. Научные интересы: нейрофизиология, искусственные нейронные сети, хаос, фракталы и

фрактальная размерность. Хобби: селекция и декоративное растениеводство. Служебный адрес: 654127, ст. Казанская., Краснодарский край.

Шило Александр Владимирович, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник отдела криофизиологии ИПК и К НАНУ. Научные интересы: нейрофизиология, хаос в физиологии, фракталы и фрактальная размерность. Хобби: философия, китайская гимнастика, аквариумные рыбки. Служебный адрес: 310015, Харьков, ул. Переяславская 23; тел. (0572)702935; e-mail: avshilo@yahoo.com

УДК 519.21:612.82

Підходи до вирішення проблеми короткої вибірки при аналізі електроенцефалограм та рядів імпульсної активності з метою встановлення їх фрактальних властивостей / С.А.Воробйов, А.Я.Могилевський, С.А. Пономаренко, А.В.Шило // Радіоелектроніка та інформатика. – 1999. - № 00. – С.00-00.

Запропоновано та викладено підхід до вирішення проблеми короткої вибірки при аналізі електроенцефалограм (ЕЕГ) та рядів імпульсної активності нейронів з метою встановлення їх фрактальних властивостей. Наведено висновки, що здобуті як результат застосування цього підходу до аналізу експериментальних даних активності нейронів молюска при різних режимах внутрішньокліткової стимуляції та коротких відрізків ЕЕГ з забезпеченням селективного управління звуковими сигналами.

Бібліогр.: 4 мал., 14 назв.

UDC 519.21:612.82

The approaches to decision of short series problem in analysis of electroencephalogram and neuron activity for definition of its fractal properties / S.A.Vorobyov, A.Ya.Mogilevskiy, S.A. Ponomarenko, A.V.Shilo // Radioelektronika i informatika. – 1999. - № 00. – P.00-00.

The approach to decision of short series problem in analysis of electroencephalogram for definition of its fractal properties is proposed and described. The conclusions defined from the using of proposed approach to analysis of *Lymnaea stagnalis*'s neurons activity experimental dates for different regimes of intracellular stimulation are described too.

Refs. 4 fig., 14 items.