

УДК: 612.8 – 073.175

Нейрофизиологический анализ стабилограмм методом Херста

Ю. Е. Лях, О. Г. Горшков, В. Г. Гурьянов, Ю. Г. Выхованец

Донецкий национальный медицинский университет им. М. Горького, Украина

Резюме

В статье рассмотрен метод фрактального анализа стабилограмм с применением алгоритма Stabilogram diffusion analysis (SDA). Исследованиями установлено, что постурально-контрольная система использует open-loop control механизм на коротко-временном интервале и малых перемещениях при поддержании вертикальной позы. Система позволяет центру масс «дрейфовать» со средним периодом 2 с. Вертикальная поза регулируется действием механизма с обратной связью (feedback mechanisms). Присутствие длительной области отрицательной корреляции в стабилограммах предполагает, что closed-loop control механизм используется на интервалах с временем задержки > 1 с и больших перемещениях.

Ключевые слова: стабилометрия, биомедицинские исследования, показатель Херста, метод Stabilogram diffusion analysis, open-loop control, closed-loop control.

Клин. информат. и Телемед.
2009. Т.5. Вып.6. с.6–9

Введение

В исследовании системы регуляции движений ключевое место принадлежит изучению механизмов поддержания вертикальной позы (ВП) [1, 2, 5]. Для изучения механизмов поддержания ВП широкое распространение получил метод компьютерной стабилометрии [1, 4]. Метод позволяет осуществлять цифровую запись отклонений центра масс ЦМ во фронтальной и сагittalной плоскостях при выполнении различных тестов, а также проводить компьютерный анализ полученных данных в режиме on-line. Стабилограмма представляет собой нестационарный процесс, описать который можно только с применением специальных методов анализа случайных процессов. Важным является учет скрытых закономерностей, присущих изучаемым сигналах. Данная задача может быть решена с применением метода фрактального анализа, который позволяет выделять периодические составляющие этих процессов и по показателю Херста определять характер рядов (персистентный или антиперсистентный), что является важным при изучении механизмов поддержания ВП человеком [3, 7]. Несмотря на большое количество исследований в этой области, до настоящего времени не разработана методика анализа стабилограмм с применением данного метода.

Целью исследований была разработка компьютерной программы для расчета показателя Херста и «критической точки», позволяющей оценить механизмы поддержания ВП.

Материалы и методы

Исследования проведены на компьютерном комплексе «Полиграф» [1] на базе психофизиологической лаборатории кафедры биофизики, медаппаратуры и клинической информатики Донецкого национального медицинского университета им. М. Горького. В исследованиях приняло участие 20 лиц мужского и женского пола в возрасте от 25 до 60 лет. Записи стабилограмм осуществлялись в условиях визуального контроля положения ЦМ на экране монитора (ОС), частичной сенсорной депривации (при закрытых глазах – ЗГ) и с открытыми глазами (ОГ). Регистрация стабилограмм производилась в течении 180 с и частотой $H=100Hz$. Первые 10 с (1000 точек) не анализировались, так как необходимо некоторое время для принятия испытуемым устойчивого положения на платформе. Расчет показателя Херста производился на интервале в 5000 точек (с 10 с по 60 с).

Результаты исследований

Получаемая в результате исследования стабилограмма представляет собой высоко нерегулярный, хаотический сигнал. Хаотические системы обычно характеризуются атTRACTором, который

имеет фрактальную структуру. В работе [8] показано, что стабилограммы не являются связанным (корреляционным) шумом и не могут быть представлены в виде классического хаотического процесса, а лучше представляются как стохастический процесс. Подобный характер имеют и физиологические временные ряды, например, электрокардиограмма [6], электроэнцефалограмма и др.

Постуральное движение может быть смоделировано как связанное случайное блуждание. В этом случае предыдущее приращение в перемещение связанно с будущим приращением, что может быть описано в виде показателя Херста Н по формуле 1 [7].

$$\Delta X^2 \approx \Delta T^{2H} \quad (1)$$

Показатель Херста позволяет проанализировать степень организованности процесса. При случайном, хаотическом процессе, когда нет никакой закономерности во временном ряде, показатель Херста равен 0,5. Если же ряду нас имеет некоторую закономерность, показатель Херста отличается от 0,5. Если мы имеем положительную корреляцию между прошедшими и будущими событиями, показатель Херста будет больше 0,5. Такой ряд называется персистентным. Если мы имеем отрицательную корреляцию между прошедшими и будущими событиями, то показатель Херста будет меньше 0,5. Этот ряд называется антиперсистентным.

Наиболее известен метод расчета показателя Херста при анализе стабилограмм, называемый Stabilogram diffusion analysis (SDA) [8, 9, 10]. Основная задача при вычислении показателя Херста по формуле 1 сводится к определению среднего значения квадрата отклонения от среднего $\langle \Delta X^2 \rangle_{\Delta t}$ для данного временного интервала Δt . В методе SDA рассчитывается смещение для каждой пары точек, находящихся на временном интервале Δt : $\Delta X_{i+\Delta t} = X_{i+\Delta t} - X_i$. Далее $\Delta X_{i+\Delta t}$ возводится в квадрат и суммируется со всеми остальными возможными парами и нормируется на число пар. Таким образом рассчитывается $\langle \Delta X^2 \rangle_{\Delta t}$.

$$\langle \Delta X^2 \rangle_{\Delta t} = \frac{1}{N-m} \sum_{i=1}^{N-m} (X_{i+\Delta t} - X_i)^2 \quad (2)$$

где N – число точек временного ряда, m – ширина интервала показателя Херста.

Из графика зависимости $\ln(\langle \Delta X^2 \rangle_{\Delta t})$ от $\ln(\Delta t)$ определяется угол наклона аппроксимирующей прямой и оценивается показатель Херста. При нахождении по-

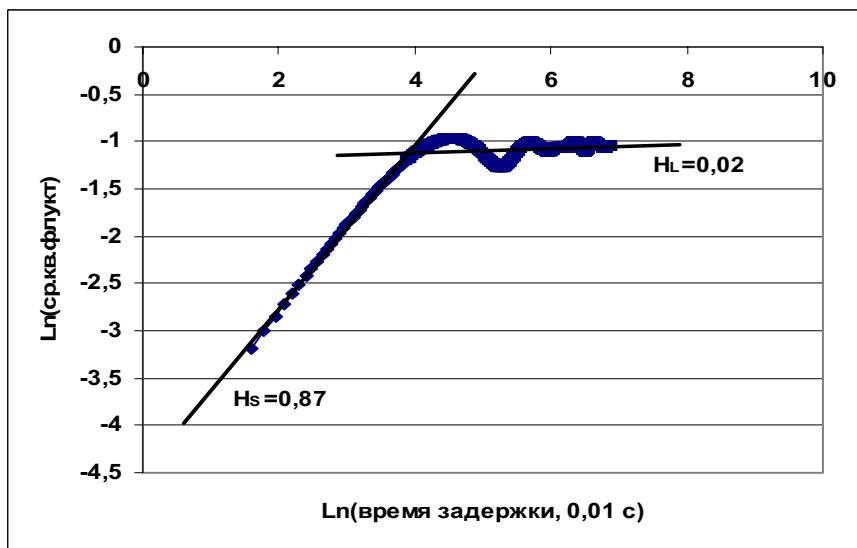


Рис. 1. Пример расчета показателя Херста для стабилограммы. Short-term region ($H_s > 0,5$) и Long-term region ($H_l < 0,5$). КрТ $\ln(t_{kp}) \approx 4,7$.

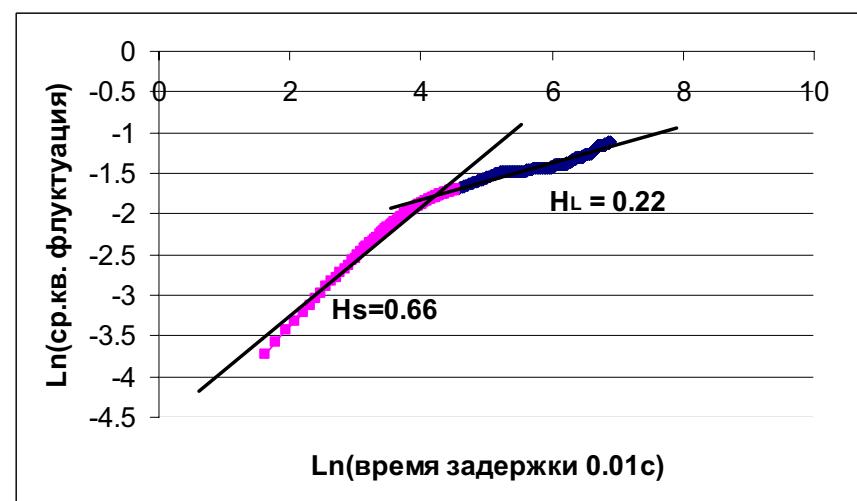


Рис. 2а. Пример расчета показателя Херста для стабилограмм одного испытуемого ОС, КрТ = 0,92 с.

показателя Херста по кривой зависимости $\ln(D)$ от $\ln(t)$ принято разбивать кривую на два участка (рис. 1): до критической точки (КрТ), которая представляет собой точку перехода персистентного ряда в антиперсистентный и после, H_s и H_l соответственно. H_s – это short-term region в пределах которой временной ряд ведет себя как скоррелированное случайное блуждание ($H > 0,5$) и H_l – long-term region в пределах которой временной ряд ведет себя как отрицательно скоррелированное случайное блуждание ($H < 0,5$).

В результате расчетов установлено, что H_s для ОС, ОГ и ЗГ меняется в интервале 0,55–0,75, H_l меняется в интервале 0,01–0,35, КрТ от 0,5 до 1,5 с, что в среднем составляет 1 с. Данные результаты согласуются с данными Collins и др. [9]. При малых временах $\Delta t < \Delta t_{kp}$, мы имеем персистентный ряд, при больших временах $\Delta t > \Delta t_{kp}$ – антиперсистентный ряд.

На рис. 2а, 2б, 2с приведены типичные графики для расчета показателя Херста в условиях ОС, ОГ, ЗГ.

Как видно H_s измеренные в условиях ОС, ОГ, ЗГ для испытуемого меняются

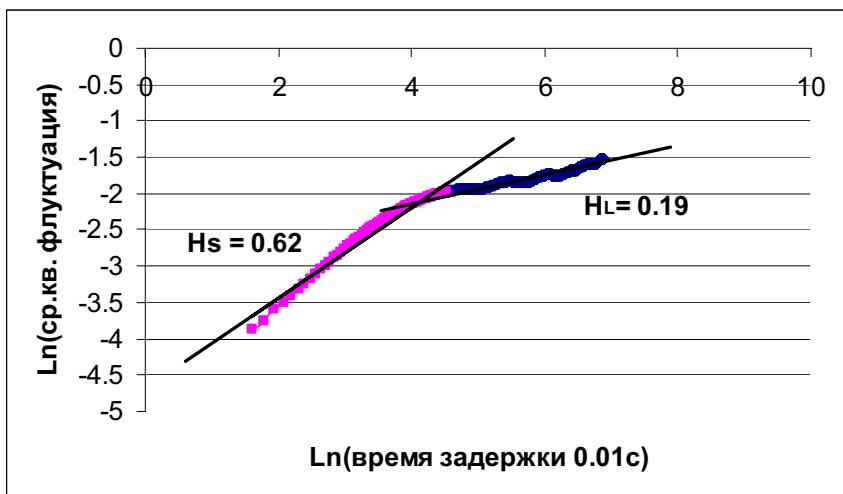


Рис. 2б . Пример расчета показателя Херста для стабилограмм одного испытуемого ОГ , КрТ =1.09 с.

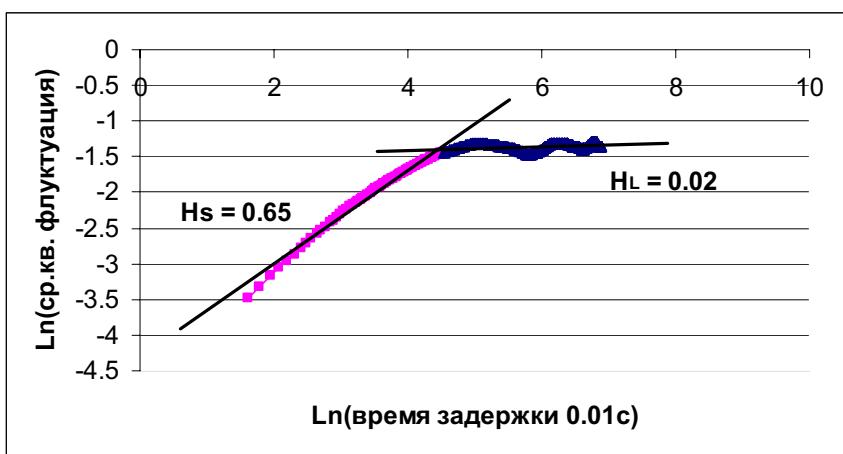


Рис. 2с. Пример расчета показателя Херста для стабилограмм одного испытуемого ЗГ , КрТ = 1.45 с.

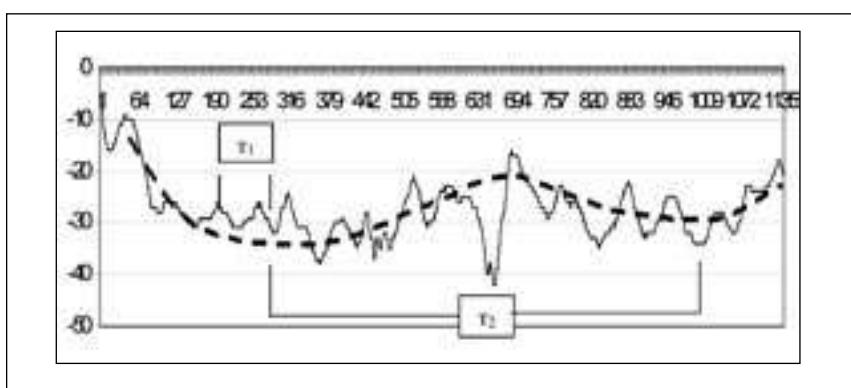


Рис. 3. Фрагмент записи колебаний центра масс испытуемого.

незначительно. Так, для примера, приведенного на графиках, показатель Херста H_s меняется в пределах 0.62–0.66. Следует отметить что первые 50 мс ($\ln(50)=3.9$) кривые ОС, ОГ, ЗГ имеют примерно одинаковые углы наклона, что указывает на сходство показателя Херста для ОС, ОГ, ЗГ на этом временном отрезке. В то же время, величина HL имеет довольно большой разброс в пределах 0.022–0.22. Значение критической точки, измеренные для конкретного человека, также как и показатель Херста, меняются незначительно. В среднем, значение КрТ соответствует 1 с. Для примера приведенного на графиках, КрТ меняется в пределах 0.92–1.45 с. Если мы представим процесс регуляции ВП на платформе в виде модели классического маятника, то КрТ – это время за которое движение маятника меняется на противоположное, то есть время полупериода колебаний. Таким образом, с КрТ можно оценить период колебаний центра масс вокруг некоторого устойчивого положения. В среднем он равен 2 с, что согласуется с данными собственных исследований, полученными при разложении в ряд Фурье стабилограмм в условиях ОС, ОГ, ЗГ [4].

Анализ спектрального состава колебаний ЦТ показал, что в условиях ОС, ОГ, ЗГ можно выделить два основных периода (T_1 и T_2), на которых происходило рассеяние мощности (рис. 3).

В нашем случае особый интерес представляют только малые периоды колебаний T_1 . Среднее значение T_1 для ОС равно 1.98 с , для ОГ – $T_1= 2.5$ с, ЗГ – $T_1=2.4$ с. Значения T_1 полученные в результате разложения в ряд Фурье хорошо согласуются со значениями, которые дает КрТ. Таким образом можно сделать вывод, что ЦМ движется вокруг некоторого устойчивого положения с средним периодом 2 с.

Выводы

1. Система регуляции ВП использует open-loop control механизм на коротко-временном интервале и малых перемещениях, что позволяет ЦМ «дрейфовать» с периодом около 2 с.

2. Closed-loop control механизм используется на длинно-временных интервалах (время задержки > 1 с) и больших перемещениях.

Литература

1. Лях Ю. Е., Вихованець Ю. Г., Гур'янов В. Г., Черняк А. М. Програм-

- но-апаратний комплекс для біомедичних досліджень // Медична інформатика та інженерія. – 2008. – №1. – С. 9–13.
2. Выхованец Ю. Г., Панченко О. А., С. Я. Семисалов, Черняк А. Н. Біокібернетический аналіз стабілограмм у лиц с нарушениями координации движений // Український журнал телемедицини та медичної телематики. – 2009. – Т7, №1. – С. 31–34.
 3. Лях Ю. Е., Гур'янов В. Г., Горшков О. Г. Расчеты показателя Херста алгоритмами Stabilogram diffusion analysis и detrended fluctuation analysis // Український журнал телемедицини та медичної телематики. – 2009. – Т7, №1. – С. 48–52.
 4. Выхованец Ю. Г., Лях Ю. Е., Чуприна Е. И., Никитенко С. Н. Амплитудно-частотные характеристики колебаний центра тяжести человека в различных условиях сенсорного контроля // Сучасні проблеми біофізики – Донецьк, 2001. – С. 176–187.
 5. Лях Ю. Е., Гур'янов В. Г., Чуприна Е. И., Довгялло Е. Н., Миронова Г. И. «Фрактальный анализ временных рядов». В кн.//Применение математических методов в исследованиях по физиологии человека / под ред. В. Н. Казакова – серия «Очерки биологической и медицинской информатики». – Донецк: из-во ДонГМУ, 2000. – 84с.
 6. Лях Ю. Е., Выхованец Ю. Г., Гур'янов В. Г., Черняк А. Н. Показатель Херста при оценке вариабельности сердечного ритма // Международная конференция: Компьютерная медицина 2007. – Харьков, 2007. – С. 126–127.
 7. Федер Е. «Фракталы». Москва, «МИР», 1992 г. – 123с.
 8. Collins J. J, De Luca C. J. Random Walking during Quiet Standing. Physical review letters. 1994, volume 73, number 5 : 764–767.
 9. Collins J. J, De Luca C. J. Open-loop and closed-loop control of posture: a random-walk analysis of center-of-pressure trajectories. Exp Brain Res 1993, 95:308–318.
 10. Amoud H., Abadi M., Hewson D., Michel-Pellegrino V., Doussot M., and Duchene J, «Fractal time series analysis of postural stability in elderly and control subjects,» Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation, vol. 4, pp. 1–12, 2007.

Neurophysiology analysis of stabilogram by Hurst exponent

Yu. Lyakh, O. Gorshkov, V. Gurjanov,

Yu. Vihovanets

M. Gorky Donetsk National Medical University, Donetsk, Ukraine

кореляційного зв'язку у стабіограмах доводить, що closed loop control механізм використовується на інтервалах з часом затримки >1 с. і великих зміщеннях.

Ключові слова: стабілометрія, біомедичні дослідження, показник Херста, метод Stabilogram diffusion analysis, open-loop control, closed-loop control.

Abstract

The paper deals with the method of fractal analysis applying the algorithm of Stabilogram Diffusion Analysis (SDA). The performed research suggest that the posture-control system utilizes open-loop control mechanism on a short-term interval and little displacements under postural control. The system allows for the C.O.P. to «drift» with the average period of 2 s. The posture is controlled by the action of feedback mechanisms. The presence of long-term region of negative correlation in stabilograms suggest that the closed-loop control mechanism is utilized on long-term intervals (delay-time > 1 s) and larger displacements.

Keywords: stabilometria, biomedical research, Hurst exponent, Stabilogram diffusion analysis, open-loop control, closed-loop control.

Нейрофізіологічний аналіз стабіограм методом Херста

Ю. Е. Лях, О. Г. Горшков, В. Г. Гур'янов, Ю. Г. Вихованець

Донецький національний медичний університет ім. М. Горького

Резюме

В роботі розглянуто метод фрактального аналізу стабіограм із застосуванням алгоритму Stabilogram diffusion analysis. Дослідженнями доведено, що постурально-контрольна система використовує open loop control механізм на короткотерміновому інтервалі та малих зміщеннях при утриманні вертикальної постави. Система дозволяє «дрейф» центру мас із середнім періодом коливань 2 с. Вертикальна постава регулюється дією механізму зворотнього зв'язку. Наявність області негативного

Переписка

д.б.н., професор **Ю. Е. Лях**

Донецький національний медичний університет ім. М. Горького
пр-т Ільича, 16, Донецьк, 83003
Україна

тел.: +380 (622) 955-386

ел. поча: biofis@dgmu.donetsk.ua
roger1964@dsmu.dn.ua