

УДК 616-009.2+612.821.35] – 073:681.6

Моделирование механизмов саморегуляции вертикальной позы человека

Ю. Е. Лях, О. Г. Горшков, В. Г. Гурьянов, Ю. Г. Выхованец
Донецкий национальный медицинский университет
им. М. Горького, Украина

Резюме

В статье проведен анализ фрактальной размерности стабิโลграмм 184 здоровых волонтеров в возрасте 18–21 лет. В рамках модели «open-loop» и «close-loop», предложенной Collins J. J. и др., установлено два механизма контроля поддержания вертикальной позы на временных интервалах 0.20–0.50 с и 1.01–1.20 с. Показано, что более низким показателям Херста на временных интервалах 0.20–0.50 с соответствует более высокая активность «постуральных мышц». Это объясняется тем фактом, что более тренированным мышцам требуется меньше усилий для поддержания вертикальной позы.

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

Клин. информат. и Телемед.
2011. Т.7. Вып.8. с.16–20

Введение

В исследовании системы регуляции движений ключевое место принадлежит изучению механизмов поддержания вертикальной позы (ВП) [1]. Для решения этой задачи широкое распространение получил метод стабิโลметрии, который заключается в регистрации положения и изменения центра масс во время стояния обследуемого на неподвижной платформе. Как известно, стабิโลграмма представляет собой хаотический нерегулярный сигнал, а анализ таких сигналов может быть проведен только с применением специальных математических методов [2, 3, 4]. В частности, одним из эффективных и адекватных для решения данной задачи является метод фрактального анализа [3]. В основе метода лежит оценка фрактальной размерности путем вычисления показателя Херста (H) [4, 5]. Подобная методика анализа стабิโลграмм была представлена в работе Collins J. J. [6], где авторами описан метод расчета показателя Херста для анализа стабิโลграмм, названный Stabilogram Diffusion Analysis (SDA) и установлено наличие двух механизмов постурального контроля (ПК).

Первый механизм называется «open-loop» или «открытая петля», представляет собой движение с прогнозированием. Он используется системой ПК на временах меньше ~ 1 с и описывается персистентным поведением, при котором показатель Херста лежит в пределах $0.5 < H < 1$. «Open-loop» механизм работает без обратной сенсорной связи и в случае постуральной контрольной системы человека может посылать ко-

манды, которые определяют состояние постуральных мышц [7].

Второй механизм называется «close-loop» или «закрытая петля», представляет собой движение с обратной связью и описывается антиперсистентным поведением, при котором показатель Херста лежит в пределах $0 < H < 0.5$. «Closed-loop» механизм работает с сенсорной обратной связью и относится к зрительной, вестибулярной и соматосенсорной системам.

Такая интерпретация и модель позволяют объяснить смысл параметров, полученных методом SDA, для понимания устойчивого поведения и функциональных взаимодействий нейромышечных механизмов, лежащих в основе ПК [7].

Несмотря на достаточно большое количество работ по анализу стабิโลграмм, в рамках данной модели нет достаточно четкого представления о механизмах ПК.

Цель исследования: разработать метод анализа стабิโลграмм, позволяющий изучить основные механизмы поддержания вертикальной позы человека.

Объект и методы исследования

Регистрация стабิโลграмм осуществлялась в произвольном акте ортоградной позы с возможностью визуального контроля положения центра масс на экране монитора

(т.е. с обратной искусственной связью – ИОС), в условиях частичной сенсорной депривации (при закрытых глазах – ЗГ) и с открытыми глазами, без обратной искусственной связи (ОГ). Регуляция позы осуществляется одновременно в двух направлениях: в антеропостериорном фиксируются отклонения вперед или назад от вертикального положения, а в медиолатеральном – влево или вправо. Сигнал поступает на вход компьютерного комплекса «Полиграф» и записывается в виде файла в базу данных. Длительность записи – 3 минуты, частота дискретизации – 100 Hz. В исследованиях в режиме с ЗГ приняло участие 184 волонтера, с ОГ – 189, с ИОС – 196.

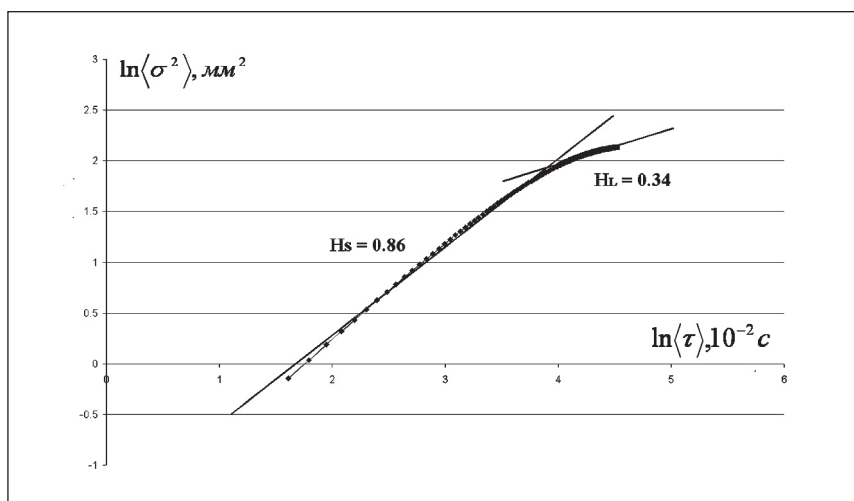


Рис. 1. Зависимость натурального логарифма среднего значения квадрата флуктуации $\ln\langle\sigma^2\rangle$ от натурального логарифма времени задержки $\ln\langle\tau\rangle$, разбитая на два интервала.

Результаты собственных исследований

Традиционно принято разбивать кривую зависимости натурального логарифма среднего значения квадрата флуктуаций $\ln\langle\sigma^2\rangle$ от натурального логарифма времени задержки $\ln\langle\tau\rangle$ на два участка (до критической точки и после критической точки) и на полученных двух временных интервалах строить аппроксимирующие кривые для нахождения показателя Херста [4, 8]. На рис. 1 показано две области, характеризующие различные механизмы контроля. Показатель Херста определяется по наклону аппроксимирующей прямой. На графике выделена область, соответствующая механизму контроля движения с прогнозированием (персистентное поведение – $H_s > 0,5$) и обратной связью (антиперсистентное поведение – $H_l < 0,5$). Точка перехода персистентного поведения в антиперсистентное называется критической точкой.

Кривая зависимости логарифма флуктуации $\ln\langle\sigma^2\rangle$ от логарифма времени задержки $\ln\langle\tau\rangle$ меняет свой наклон в критической точке, а постепенно. Таким образом можно выделить более чем две области, различного поведения кривой. Каждая область будет характеризовать определенный механизм контроля.

Для того, чтобы определить оптимальное число интервалов разбиения проводилась следующая процедура: кривая разбивалась на различное число интервалов, определялся показатель Херста на данных интервалах, при

получении статистически значимого различия между показателями Херста на смежных интервалах оценивались оптимальные интервалы. В данном исследовании было определено четыре интервала разбиения. На рис. 2 показана кривая зависимости натурального логарифма среднего значения квадрата флуктуаций $\ln\langle\sigma^2\rangle$ от натурального логарифма времени задержки $\ln\langle\tau\rangle$ разбитая на четыре интервала.

В результате анализа нейросетевых моделей было получено, что система регуляции ПК для усиления устойчивости использует два механизма контроля [9] на временных интервалах 0.20–0.50 с и 1.01–1.20 с. На других временных интервалах был обнаружен большой разброс показателей Херста, что не позволило выявить какую-либо зависимость.

Первый механизм контроля описывается персистентным поведением на временах 0.20–0.50 с. Данное поведение характеризует механизм контроля постурального движения, называемый «open-loop» или «открытая петля» и представляет собой движение с прогнозированием [6]. Система ПК использует механизм прогнозирования при движении в антеропостериорном направлении на временах 0.20–0.50 с. Анализ нейросетевых моделей показал, что более устойчивому состоянию соответствуют более высокие показатели Херста [9].

Рассмотрим, каким процессам соответствуют более высокие показатели Херста и в каком случае показатель Херста уменьшается. Для примера рас-

смотрим физическую модель данного процесса. Как известно, система регуляции ПК использует «open-loop» механизм на коротко-временном интервале и малых перемещениях, что позволяет центру масс «дрейфовать» с периодом около 2 с [8], что дает нам возможность в первом приближении рассматривать траекторию движения центра масс как некоторый гармонический процесс. На рис. 3а показано смещение центра масс в виде синусоиды с периодом $\sim 200 \times 10^{-2}$ с. Персистентное поведение соответствует временам задержки $\tau < 100 \times 10^{-2}$ с. Ниже на рис. 3б представлен график зависимости натурального логарифма среднего значения квадрата флуктуаций $\ln\langle\sigma^2\rangle$ от натурального логарифма времени задержки $\ln\langle\tau\rangle$. Персистентная область аппроксимирована прямой, а показатель Херста определяется по углу наклона прямой и равен соответственно $H = 0.91$.

После добавления случайной составляющей, которая представляет собой моделирование некоторой шумоподобной флуктуации, показатель Херста уменьшился. На рис. 4а приводится синусоида с добавлением случайной составляющей, ниже на рис. 4б изображен график зависимости натурального логарифма среднего значения квадрата флуктуаций $\ln\langle\sigma^2\rangle$ от натурального логарифма времени задержки $\ln\langle\tau\rangle$. Показатель Херста равен соответственно $H = 0.87$.

Таким образом, чем больше вклад случайной составляющей в исследуемом процессе, тем ниже показатель Херста, а при броуновском случайном движении показатель Херста $H = 0.5$ [10].

Как известно из работ [7] результат мышечного воздействия содержит шумоподобную флуктуацию, а усиленные активности скелетной мышцы приводит к увеличению шумоподобной составляющей.

Так как «open-loop» механизмы управляют состоянием постуральных мышц, то можно предположить, что более низкие показатели Херста соответствуют более высокой активности постуральных мышц.

Данный результат согласуется с результатами, полученными при изучении влияния физической подготовки на степень организации постурального движения [11]. Было получено, что у профессиональных спортсменов показатели Херста на временах задержки $\tau = 0.2-0.5$ с и $\tau = 0.5-0.8$ с имеют более высокие показатели, чем у студентов. Очевидно, что более тренированным мышцам спортсменов требуется меньше усилий для поддержания вертикальной позы и соответственно меньшей шумоподобной составляющей.

Второй механизм контроля описывается антиперсистентным поведением на временах 1.01–1.20 с. Данное поведение характеризует механизм ПК, называемый «close-loop» или «закрытая петля» и представляет собой движение с обратной связью [6]. Достигнув определенного критического значения при отклонении от вертикального положения, система ПК начинает движение в противоположную сторону и наиболее выражен этот механизм в медиолатеральном направлении на временах 1.01–1.20 с. Чем ближе значение показателя Херста на данных временах к нулю, тем больше способность системы ПК регулировать устойчивость, т.е. более устойчивому состоянию соответствуют более низкие показатели Херста.

Так как «closed-loop» механизмы работают с сенсорной обратной связью и относятся к зрительной, вестибулярной и соматосенсорной системам, можно предположить, что более низкие показатели Херста соответствуют более высокому уровню организации зрительной, вестибулярной и соматосенсорной системами.

Выводы

Персистентное поведение на временах 0.20–0.50 с характеризует

механизм контроля постурального движения называемый «open-loop» и представляет собой движение с прогнозированием. Более низкие показатели Херста соответствуют более высо-

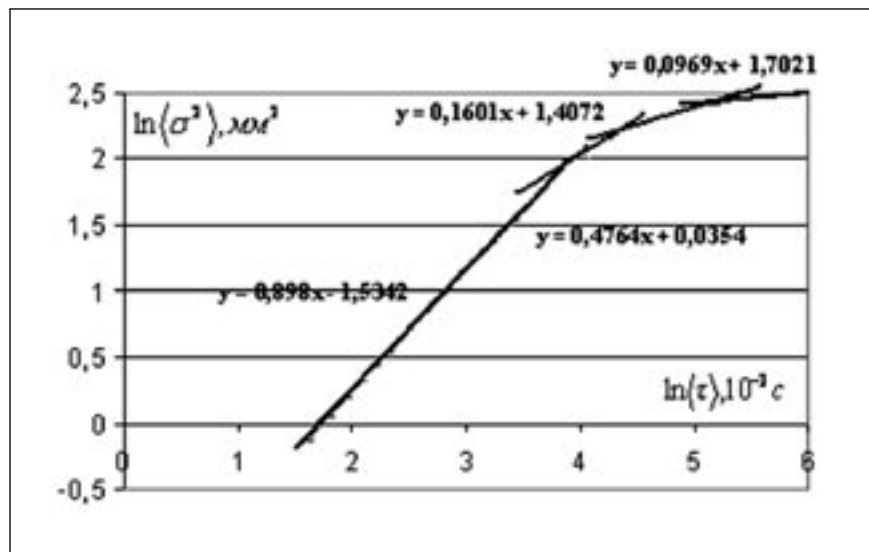


Рис. 2. Зависимость натурального логарифма среднего значения квадрата флуктуаций $\ln\langle\sigma^2\rangle$ от натурального логарифма времени задержки $\ln\langle\tau\rangle$, разбитая на четыре интервала.

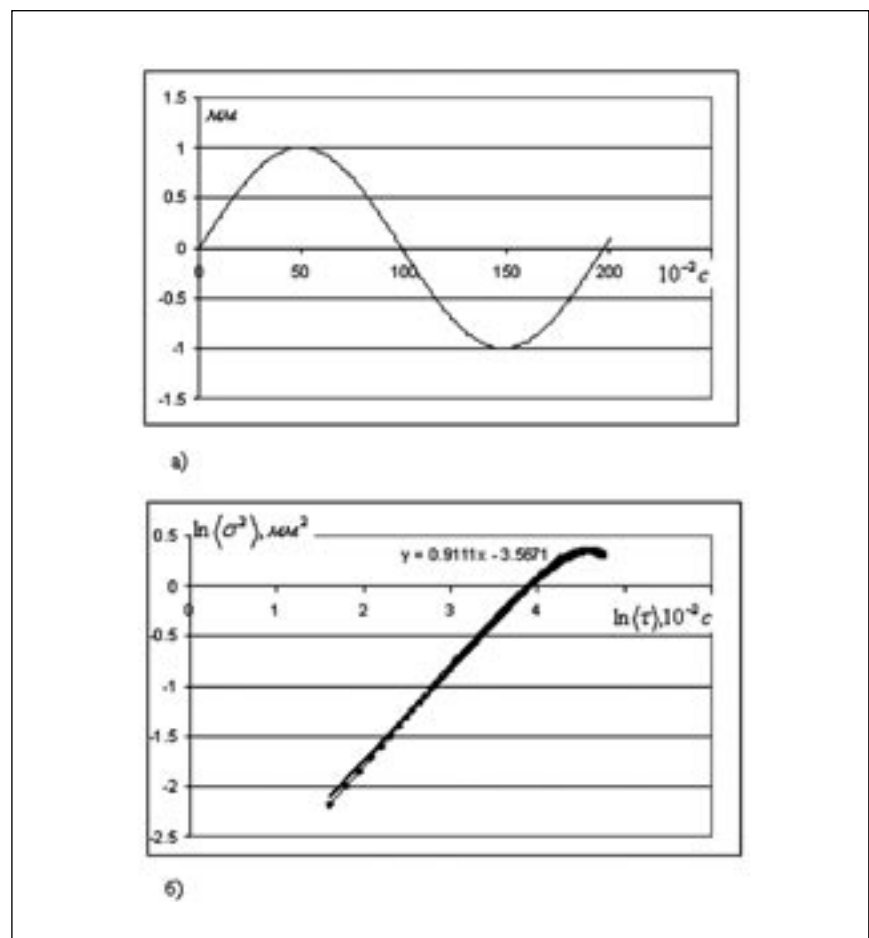


Рис. 3. а) синусоида с периодом $\sim 200 \times 10^{-2}$ с; б) график зависимости натурального логарифма среднего значения квадрата флуктуаций $\ln\langle\sigma^2\rangle$ от натурального логарифма времени задержки $\ln\langle\tau\rangle$.

кой активности «постуральных мышц». У профессиональных спортсменов показатели Херста на временах $\tau=0.2-0.5$ с и $\tau=0.5-0.8$ с имеют более высокие показатели, чем у студентов. Более тренированным мышцам спортсменов требуется меньше усилий для поддержания вертикальной позы и соответственно меньшей шумоподобной составляющей.

Антиперсистентное поведение на временах 1.01–1.20 с характеризует механизм ПК называемый «close-loop» и обеспечивает собой движение с обратной связью. Более устойчивому состоянию соответствуют более низкие показатели Херста. Чем ближе значение показателя Херста на данных временах к нулю, тем больше способность системы ПК регулировать устойчивость.

Литература

1. Казаков В. Н., Лях Ю. Е., Уманский В. Я. Стабилометрия как метод объективной оценки двигательной активности человека. Архив клинической и экспериментальной медицины, 1998, Т.7, №1. С. 56–59.
2. Амплитудно-частотные характеристики колебаний центра тяжести человека в различных условиях сенсорного контроля. Лях Ю. Е. с соавт. // Сучасні проблеми біофізики. Донецьк. – 2001. – С. 176–187.
3. Лях Ю. Є., Гур'янов В. Г., Вихованець Ю. Г. Аналіз фрактальної розмірності біомедичних процесів. Медична інформатика та інженерія, 2008, №3. С. 41–45.
4. Лях Ю. Е., Гурьянов В. Г., Горшков О. Г. Расчеты показателя Херста алгоритмами Stabilogram diffusion analysis и detrended fluctuation analysis. Український журнал телемедицини та медичної телематики, 2009, Т.7, №1. С. 48–52.
5. Горшков О. Г., Реброва С. А. Аналіз стабілограмм методом Херста. Питання експериментальної та клінічної медицини, 2009, Т.2, №13. С. 141–146.
6. 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. p. 308–318.
7. Carrie A. Loughton, Mary Slavin, Kunal Katdare, Lee Nolan. Aging, muscle activity, and balance control: physiologic changes associated with balance impairment. Gait and Posture, 2003, № 18. С. 101–108.

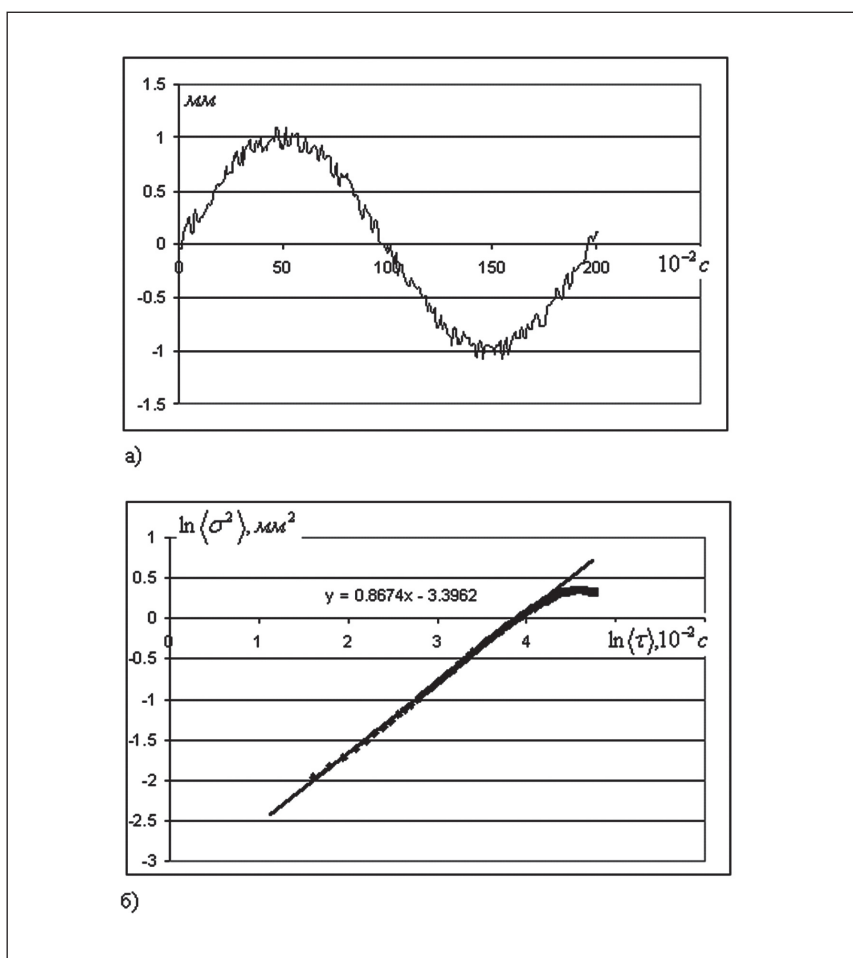


Рис. 4. а) синусоида с периодом $\sim 200 \times 10^{-2}$ с; б) график зависимости натурального логарифма среднего значения квадрата флуктуаций $\ln \langle \sigma^2 \rangle$ от натурального логарифма времени задержки $\ln \langle \tau \rangle$.

8. Лях Ю. Е., Горшков О. Г., Гурьянов В. Г., Вихованец Ю. Г. Нейрофизиологический анализ стабิโลграмм методом Херста. Клиническая информатика и телемедицина, 2009, Т.5, №6. С. 6–9.
9. Лях Ю. Е., Горшков О. Г., урьянов В. Г., Вихованец Ю. Г. Биокібернетическі механізми саморегуляції устойчивості і підтримання вертикальної пози (нейросетевий аналіз). Нейронауки: Теоретичні та клінічні аспекти, 2010, Т.6, №2. С. 28–32.
10. Федер Е. «Фракталы». Москва. – «МИР», 1992 г. – 123с.
11. Лях Ю. Е., Горшков О. Г., Гурьянов В. Г., Вихованец Ю. Г. Оценка степени организации постурального движения с помощью показателя Херста. Материалы IV международной научно-технической конференции «Актуальные вопросы теоретической и прикладной биофизики, физики и химии БФФХ-10–Севастополь», – 2010, Т.2. С. 235–237.

Human vertical posture mechanisms modeling

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

M. Gorky Donetsk National Medical University, Donetsk, Ukraine

Abstract

The paper reports of the fractal dimensionality analysis performed on a group of 184 healthy volunteers aged 18 up to 21. Within the framework of the «open-loop» and «close-loop» model, suggested by Collins J. J. and others. There were discovered two mechanisms of vertical posture support on time intervals of 0.20–0.50 s and 1.01–1.20 s.

It is proved that the low Hurst exponent readings on time intervals 0.20–0.50 s correspond to much higher activity of the postural muscles. That could be explained by the fact that better trained muscles require less effort to preserve and support the vertical posture.

Key words: stabilometry, Hurst exponent, Stabilogram diffusion analysis, open-loop control, closed-loop control.

Моделювання механізмів саморегуляції вертикальної пози людини

**Ю. Є. Лях, О. Г. Горшков
В. Г. Гур'янов, Ю. Г. Вихованець**
*Донецький національний медичний
університет ім. М. Горького, Україна*

Резюме

У статті проведено аналіз фрактальної розмірності стабілограм 184 здорових волонтерів віком 18–21 років. У межах моделі «open-loop» і «close-loop», запропонованої Collins J. J.

та співавт., встановлено два механізми контролю підтримки вертикальної пози на часових інтервалах 0.20–0.50 с та 1.01–1.20 с.

Показано, що більш низьким значенням показника Херста на часових інтервалах 0.20–0.50 с відповідає більш висока активність «постуральних м'язів». Це пояснюється тим фактом, що більш треновані м'язи потребують менше зусиль для підтримки вертикальної пози.

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

Переписка

д.б.н., професор **Ю. Е. Лях**
Донецкий национальный
медицинский университет
им. М. Горького
пр-т Ильича 16
Донецк, 83003, Украина
тел.: +380 (622) 955 386
эл. почта: olgor22@yahoo.com
liakh@dsmu.edu.ua
rodger1964@dsmu.edu.ua