

УДК 612.746.4:007

ТЕОРИЯ Н. А. БЕРНШТЕЙНА ОБ ОРГАНИЗАЦИИ ДВИЖЕНИЙ И КИБЕРНЕТИЧЕСКИЕ МЕХАНИЗМЫ РЕГУЛЯЦИИ

В. А. Галкин, О. Е. Филатова, Т. В. Гавриленко, Д. В. Горбунов
Сургутский государственный университет, Gorbunov.dv@mail.ru

С позиций новой теории хаоса-самоорганизации доказана статистическая неустойчивость для подряд получаемых выборок любых биомеханических параметров. В первую очередь сюда относятся тремор, теппинг и выборки электромиограмм. Все это укладывается в новом эффекте Еськова – Зинченко, однако возникает вопрос о механиках такой устойчивости. Доказывается, что первичный статистический хаос возникает на уровне центральной нервной системы. Доказан хаос параметров электроэнцефалограмм. Тогда возникает закономерно двухкластерная кибернетическая схема регуляции движений: хаос в 1-м кластере управления порождает и суммирует хаос в эффекторном органе – нервно-мышечной системе. В итоге мы имеем в мышцах хаос более высокого порядка: если в электроэнцефалограммах число k пар совпадений выборок было большим ($k_1 \geq 25$), то в матрицах треморограмм и электромиограмм $k_2 \leq 10$, т. е. в 2–3 раза меньше. С позиций новой теории хаоса-самоорганизации доказано различие между верхним (ЭЭГ) и нижним (эффекторным) уровнями регуляции движений.

Ключевые слова: электроэнцефалограмма, эффект Еськова – Зинченко, организация движений.

BERNSTEIN'S THEORY ON REGULATION OF MOVEMENTS AND CYBERNETIC MECHANISMS OF REGULATION

V. A. Galkin, O. E. Filatova, T. V. Gavrilenko, D. V. Gorbunov
Surgut State University, Gorbunov.dv@mail.ru

The statistical instability for consecutive samples of any biomechanical parameters is proved from the perspective of the new theory of chaos-self-organization. First of all, these parameters include tremor, tapping and electromyogram samples which are within a new Eskov – Zinchenko effect. However, it raises the question about the mechanics of such stability. It is proved that the primary statistical chaos occurs at the level of the central nervous system. The chaos parameters of the electroencephalograms are proved. Then there is a natural two-cluster cybernetic scheme of regulation of movements: chaos in the 1st cluster management generates and summed the chaos in the end organ – the neuromuscular system. As a result, muscles have the chaos of a higher order: if in the electroencephalograms the number of k pairs of matching samples is large ($k_1 \geq 25$), then in matrices of tremorogram and electromyogram it is $k_2 \leq 10$, i.e. 2–3 times less. The difference between the upper (electroencephalogram) and lower (effector) levels of motion regulation is proved from the perspective of the new theory of chaos-self-organization.

Keywords: electroencephalogram, Eskov – Zinchenko effect, regulation of movements.

Введение. Прошло более 70 лет с момента выхода фундаментальной работы Н. А. Бернштейна «О построении движений» [1], но за этот период в биомеханике и науках о мозге в целом ничего существенного не произошло. Более 70 лет назад этот выдающийся физиолог и психолог предположил, что любое движение происходит без повторений, и предпринял попытку объяснения этой гипотезы – это была именно гипотеза, так как никаких доказательств отсутствия статистической устойчивости не было предоставлено ни выдающимся предшественником тогда, ни всей современной наукой сейчас. Он выдал только гениальную догадку о «повторении без повторений» в организации любого двигательного акта [2–7].

За этот большой период развития всей науки никто даже не попытался проверить гипотезу Н. А. Бернштейна о «повторении без повторений». Как оказалось [2–13], эта гипотеза была подтверждена эффектом Еськова – Зинченко (ЭЗ), а затем и эффектом Еськова – Филатовой (ЭФ). В этих эффектах доказано, что любая выборка треморограмм (ТМГ), теппинграмм (ТПГ) или электромиограмм (ЭМГ) одного испытуемого в неизменном гомеостазе является уникальной, ее невозможно статистически повторить [10–15].

Это означает, что вероятность совпадения любой j -й и $j+1$ -й выборки (соседних выборок) одного испытуемого в неизменном гомеостазе является крайне малой величиной ($p < 0,01$). В этом случае их статистические функции $f(x)$ не совпадают ($f_j(x_i) \neq f_{j+1}(x_i)$ с $p \geq 0,95$ или даже $p \geq 0,99$). С позиции теории вероятности это почти невозможное событие, и что же тогда все эти 150–200 лет изучали в биологии, медицине, психологии, экологии и других «нечетких» науках?

Если выборки уникальны, т. е. они хаотически формируются, тогда от опыта к опыту они другие, что и пытался сказать Н. А. Бернштейн в своей гипотезе о «повторении без повторений». Значит, для уникальных систем методы современной детерминистской и стохастической науки (ДСН) неприменимы. Предлагаем новые методы теории хаоса-самоорганизации (ТХС). Именно ТХС может описывать хаос ТМГ, ТПГ, ЭМГ и других параметров x_i гомеостаза [14–15].

Однако возникает вопрос: каковы механизмы этой стохастической неустойчивости, статистического хаоса получаемых подряд выборок от одного и того же испытуемого? Ответ на этот вопрос и представлен в рамках ТХС [8–12].

1. Хаос в нервно-мышечной системе вторичен. Прежде всего, напомним, как регистрируется хаос в нервно-мышечной системе (НМС) человека. Для этого необходимо многократно повторить измерения ТМГ, ТПГ или ЭМГ у одного и того же испытуемого в неизменном гомеостазе. После, например, 15 последовательных измерений мы получаем 15 таких выборок ТМГ или ЭМГ, и эти выборки входят в матрицу парных сравнений выборок. В таких матрицах парных сравнений выборок находим числа k совпадений пар этих выборок (например, табл. 1 для ТМГ и табл. 2 для ЭМГ). Обычно эти числа (k_2 для ТМГ и k_3 для ЭМГ в табл. 1, 2) существенно не отличаются и удовлетворяют неравенству k_2 (или k_3) ≤ 12 . Для ТПГ величина $k_4 \leq 18$, т. е. в 2–3 раза больше, чем для ТМГ, так как теппинг требует вмешательства сознания – это произвольное движение и доля стохастики выше.

Таблица 1

Матрица парного сравнения выборок треморограмм испытуемого ГДВ (число повторов $N = 15$), использовался непараметрический критерий Вилкоксона (критический уровень $p < 0,05$, число совпадений $k_2 = 5$)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	0.00		0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3	0.00	0.00		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.43	0.26	0.00	0.00	0.00
4	0.00	0.00	0.00		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5	0.00	0.00	0.00	0.00		0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
6	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		0.00	0.00	0.00	0.00	0.13	0.00	0.00	0.00	0.00
7	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
8	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		0.00	0.16	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
9	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00
10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.16	0.00		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
11	0.00	0.00	0.43	0.00	0.00	0.13	0.00	0.00	0.00	0.00		0.00	0.00	0.00	0.00
12	0.00	0.00	0.26	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		0.00	0.00	0.00
13	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00		0.00	0.22
14	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		0.00
15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.22	0.00	

Таблица 2

Матрица парного сравнения выборок ЭМГ одного испытуемого ГДВ (число повторов N = 15) при слабой статической нагрузке разгибателя мизинца правой руки (F₁ = 5 даН), использовался непараметрический критерий Вилкоксона (критический уровень $p < 0.05$, число «совпадений» $k_3 = 12$)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1		0.00	0.00	0.00	0.92	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	0.00		0.00	0.60	0.00	0.00	0.00	0.16	0.70	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3	0.00	0.00		0.00	0.00	0.00	0.06	0.00	0.00	0.58	0.00	0.00	0.00	0.23	0.00
4	0.00	0.60	0.00		0.00	0.00	0.00	0.15	0.67	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00
5	0.92	0.00	0.00	0.00		0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00
6	0.02	0.00	0.00	0.00	0.03		0.00	0.47	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
7	0.00	0.00	0.06	0.00	0.00	0.00		0.00	0.00	0.20	0.00	0.00	0.00	0.04	0.00
8	0.00	0.16	0.00	0.15	0.00	0.47	0.00		0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
9	0.00	0.70	0.00	0.67	0.00	0.00	0.00	0.03		0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00
10	0.00	0.00	0.58	0.00	0.00	0.00	0.20	0.00	0.00		0.00	0.00	0.00	0.04	0.00
11	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		0.00	0.00	0.00	0.00
12	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00		0.00	0.00	0.63
13	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		0.00	0.00
14	0.00	0.00	0.23	0.00	0.03	0.00	0.04	0.00	0.00	0.04	0.00	0.00	0.00		0.00
15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.63	0.00	0.00	

Именно эти матрицы и доказывают статистическую неустойчивость выборок параметров НМС для одного испытуемого в неизменном гомеостазе. Эти матрицы показывают, что $f_j(x_i) \neq f_{j+1}(x_i)$ с вероятностью $p \geq 0,95$ (табл. 1, 2). Фактически мы имеем ограничение применения стохастики в физиологии НМС, впрочем, и в физиологии сердечно-сосудистой системы (ССС) тоже. Если стохастика не работает, как и вся современная детерминистская и стохастическая наука (ДСН), то возникает базовая проблема физиологии и всего естествознания в целом: каковы механизмы этого стохастического хаоса, и как описывать такие системы не в рамках ДСН?

Ответы на эти вопросы заключаются в изучении динамики поведения самих нейросетей мозга (НСМ), которые осуществляют управление любым двигательным актом, любым процессом в НМС, например, в виде выборок электроэнцефалограмм (ЭЭГ) [14–15].

2. Хаос в нейросетях мозга – первичный хаос в системах регуляции любых движений. Напомним, что Н. А. Бернштейн только подводил всю физиологию и кибернетику к пониманию реальности 5 систем регуляции движений [1] (системы А, В, С, D, E) и к невозможности их повторений в рамках ДСН. Это была гипотеза, а реальность заключена в табл. 1, 2, где нет произвольных статистических повторений любых движений (в виде тремора или ЭМГ). Оказалось, что аналогичные матрицы могут быть построены и для ЭЭГ, т. е. для НСМ.

В режиме 15 повторений регистрации ЭЭГ у одного и того же испытуемого в неизменном гомеостазе многократно получаем матрицы парных сравнений выборок ЭЭГ, подобных в табл. 1, 2. Для примера представляем матрицу в виде табл. 3, где число k_1 несколько больше, чем k_2 и k_3 . Однако эта величина в любом случае будет меньше 40 % от общего числа $N = 105$ независимых пар сравниваемых выборок. Хаос характерен и для НСМ в виде хаоса ЭЭГ. Подчеркнем, что этот хаос первичный, так как любой двигательный акт первоначально зарождается на уровне центральной нервной системы (НСМ находится в подчинении ЦНС и ВНД). Это второй важный кластер в организации любого движения, но это первый и главный кластер по значимости управления.

Таблица 3

Матрица парного сравнения ЭЭГ одного и того же здорового человека (число повторов N = 15) в период релаксации в отведении Fz-Ref, использовался непараметрический критерий Вилкоксона (значимость $p < 0.05$, число совпадений $k_1 = 25$)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1		0.00	0.03	0.29	0.65	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.71	0.19	0.64	0.00	0.00
2	0.00		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.12	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3	0.03	0.00		0.15	0.19	0.11	0.00	0.00	0.00	0.02	0.79	0.00	0.88	0.00	0.00
4	0.29	0.00	0.15		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.40	0.07	0.48	0.00	0.00
5	0.65	0.00	0.19	0.00		0.65	0.00	0.00	0.00	0.10	0.31	0.00	0.38	0.00	0.00
6	0.00	0.00	0.11	0.00	0.65		0.00	0.02	0.00	0.22	0.34	0.00	0.68	0.00	0.00
7	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		0.00	0.00	0.00	0.00	0.22	0.00	0.00	0.00
8	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00		0.82	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
9	0.00	0.12	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.82		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10	0.00	0.00	0.02	0.00	0.10	0.22	0.00	0.01	0.00		0.00	0.00	0.07	0.00	0.00
11	0.71	0.00	0.79	0.40	0.31	0.34	0.00	0.00	0.00	0.00		0.00	0.78	0.00	0.00
12	0.19	0.00	0.00	0.07	0.00	0.00	0.22	0.00	0.00	0.00	0.00		0.00	0.00	0.00
13	0.64	0.00	0.88	0.48	0.38	0.68	0.00	0.00	0.00	0.07	0.78	0.00		0.00	0.00
14	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		0.00
15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	

Таким образом, хаос в параметрах гомеостатических систем начинается с хаоса нейросетей мозга, с хаоса ЭЭГ, т. е. с 1-го кластера управления НМС. В неизменном гомеостазе уже НМС задают управляющие драйвы на НМС в виде хаотических сигналов, которые, однако, ограничены размерами площади квазиаттракторов S. В нашем случае при неизменном гомеостазе сохраняются статистически все 15 площадей КА для 15 ЭЭГ. Это считается закономерностью в ТХС, но для ДСН это невозможно. Напомним, что ТХС и ДСН находятся в антагонизме: если биосистема в ДСН находится в непрерывном изменении, то в ТХС она находится в покое – в неизменном гомеостазе, и наоборот. В ТХС мы изменяем понятия и законы поведения биосистем.

Заключение.

1. Хаос статистических функций в исполнительном органе – НМС, мышцах, является вторичным хаосом нижней второй кластерных систем. При этом произвольное движение (теппинг) имеет более высокие значения доли стохастики ($k_3 \geq 15$), чем хаос тремора или ЭМГ.

2. Центральная нервная система образует первый верхний кластер организации движения. Драйверы в виде ЭЭГ имеют большие значения k числа пар статистически совпадающих выборок ЭЭГ. Однако уже на втором уровне (кластере) мы имеем гораздо меньшие доли стохастики ($k < 10$ или даже $k < 5$), что можно трактовать как суперпозицию хаоса ЦНС (в виде ЭЭГ) и НМС, где хаос явно превалирует. Такая двухкластерная система сейчас апробируется как модель хаотического поведения НМС в виде сложной регуляции. Это реальная кибернетическая схема регуляции НМС.

3. Дальнейшее использование в теории НМС стохастики и всей ДСН неприменимо к живым системам. Особая динамика гомеостатических систем требует применения методов компартментно-кластерной теории биосистем, которая была разработана В. М. Еськовым в 80–90-х годах XX века. Эта пока единственная теория, позволяющая описывать хаос гомеостатических систем как статистическую неустойчивость.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ А 18-07-00162, мол_а 18-37-00113

Литература

1. Бернштейн Н. А. О построении движений. М. : Медгиз, 1947. 254 с.
2. Григоренко В. В., Еськов В. М., Лысенкова С. А., Микшина В. С. Алгоритм автоматизированной диагностики динамики возрастных изменений параметров сердечно-сосудистой системы при нормальном старении в оценке биологического возраста // Систем. анализ и управление в биомед. системах. 2017. Т. 16. № 2. С. 357–362.
3. Зилов В. Г., Хадарцев А. А., Иляшенко Л. К., Еськов В. В., Миненко И. А. Экспериментальные исследования хаотической динамики биопотенциалов мышц при различных статических нагрузках // Бюл. эксперимент. биологии и медицины. 2018. Т. 165. № 4. С. 400–403.
4. Зинченко Ю. П., Филатов М. А., Колосова А. И., Макеева С. В. Сравнительный стохастический и хаотический анализ параметров внимания учащихся в аспекте их работоспособности // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 14. Психология. 2017. № 4. С. 21–33. DOI: 10.11621/vsp.2017.04.21.
5. Betelin V. B., Eskov V. M., Galkin V. A., Gavrilenko T. V. Stochastic volatility in the dynamics of complex homeostatic systems // Doklady Mathematics. 2017. Vol. 95. № 1. P. 92–94. DOI: 10.1134/S1064562417010240.
6. Eskov V. M., Eskov V. V., Vochmina J. V., Gavrilenko T. V. The evolution of the chaotic dynamics of collective modes as a method for the behavioral description of living systems // Moscow University Physics Bulletin. 2016. Vol. 71. № 2. P. 143–154. DOI: 10.3103/S0027134916020053.
7. Eskov V. M., Bazhenova A. E., Vochmina U. V., Filatov M. A., Ilyashenko L. K. N. A. Bernstein hypothesis in the Description of chaotic dynamics of involuntary movements of person // Russian Journal of Biomechanics. 2017. Vol. 21. № 1. P. 14–23.
8. Eskov V. M. Cyclic respiratory neuron network with subcycles // Neural Network World. 1994. Vol. 4. № 4. P. 403–416.
9. Eskov V. M. Hierarchical respiratory neuron networks // Modelling, Measurement and Control C. 1995. Vol. 48. № (1–2). P. 47–63.
10. Eskov V. M., Gudkov A. B., Bazhenova A. E., Kozupitsa G. S. The tremor parameters of female with different physical training in the Russian North // Human Ecology. 2017. № 3. P. 38–42.
11. Eskov V. V., Gavrilenko T. V., Eskov V. M., Vochmina Yu. V. Phenomenon of statistical instability of the third type systems – complexity // Technical Physics. 2017. Vol. 62. № 11. P. 1611–1616.
12. Eskov V. M., Eskov V. V., Vochmina Y. V., Gorbunov D. V., Ilyashenko L. K. Shannon entropy in the research on stationary regimes and the evolution of complexity // Moscow University Physics Bulletin. 2017. № 72 (3). P. 309–317. DOI: 10.3103/S0027134917030067.
13. Filatova D. U., Veraksa A. N., Berestin D. K., Streltsova T. V. Stochastic and chaotic assessment of human's neuromuscular system in conditions of cold exposure // Human Ecology. 2017. № 8. P. 15–20.
14. Khadartsev A. A., Nesmeyanov A. A., Eskov V. M., Filatov M. A., Pab W. Fundamentals of chaos and self-organization theory in sports // Integrative medicine international. 2017. Vol. 4. P. 57–65.
15. Zilov V. G., Eskov V. M., Khadartsev A. A., Eskov V. V. Experimental confirmation of the effect of "Repetition without repetition" N. A. Bernstein // Bulletin of experimental biology and medicine. 2017. Vol. 1. P. 4–8.