DOI: https://doi.org/10.17816/gc623431

Check for updates

Каскад добавления периода в модели нейрон-глиального взаимодействия

Н.В. Барабаш[1, 2] *

[1] Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет имени Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Российская Федерация;

[2] Волжский государственный университет водного транспорта, Нижний Новгород, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

В докладе рассматривается система четырёх обыкновенных дифференциальных уравнений, моделирующая динамику нейрон-глиальной сети в приближении среднего поля [1, 2]:

$$\begin{aligned}(\tau\dot{E}&=-\mathrm{E}+\mathrm{a}\ \ln(1+\mathrm{e}^{1/\mathrm{a}(JuxE+\mathrm{I}_0)}),\\ \dot{x}&=(1-x)/\tau_D-uxE,\\ \dot{u}&=U(y)-u/\tau F+U(y)(1-u)E,\\ \dot{y}&=-y/\tau_y+\beta\sigma(x),\end{aligned} \tag{1}$$

где $E(t)$ — средняя активность; $x(t)$ — доля доступного нейротрансмиттера, высвобождаемого в синаптическую щель с вероятностью $u(t)$; $y(t)$ — доля глиатрансмиттера, высвобождаемого астроцитом. Сигмоидальные функции $U(y)$ и $\sigma(x)$ отвечают изменению базового уровня вероятности $u(t)$ при высвобождении глиатрансмиттера и активации астроцита при высвобождении нейротрансмиттера соответственно. Параметр I_0 <0 соответствует входному тормозящему току и в данной работе выбран в качестве бифуркационного параметра. Остальные параметры положительны и фиксированы. Вид функций, значения параметров, а также подробное описание модели см. в работах [1, 2].

При $U(x)$=const первые три уравнения в системе (1) представляют собой модель Цодыкса–Маркрама, которая описывает явление кратковременной синаптической пластичности [1]. В работе [2] эта модель была дополнена четвёртым уравнением для y, посредством которого было введено влияние астроцитов согласно концепции трёхчастного синапса [3].

Модель (1) демонстрирует большой набор динамических режимов: от покоя и регулярной тонической активности до хаотической пачечной активности. Им соответствуют такие притягивающие множества в фазовом пространстве, как устойчивые состояния равновесия, предельные циклы периода 1, предельные циклы любого периода $n\in\mathrm{N}$ и хаотические аттракторы. Изменение параметра I_0 приводит к бифуркациям этих множеств — исчезновению (или потере устойчивости) одних аттракторов и рождению других, что и определяет смену динамического режима. Таким образом, с точки зрения динамики основной интерес представляют бифуркационные условия и характер родившихся аттракторов.

В докладе численно получена последовательность бифуркаций в системе (1), соответствующая переходу от тонической активности к пачечной с последующим изменением её характера. В частности, показано, что увеличение числа спайков в одной пачке определено каскадом добавления периода (period adding), в котором предельный цикл периода n теряет устойчивость и место «главного» аттрактора занимает родившийся ранее устойчивый цикл периода n+1. Этот каскад заканчивается исчезновением орбиты бесконечного периода в результате бифуркации двойного предельного цикла (седло-узловой бифуркации циклов) и рождением устойчивого цикла периода 1.

Основные свойства каскада были воспроизведены в построенном нами модельном одномерном кусочно-гладком отображении:

$$\bar{z}=\begin{cases}1-z^6, & \text{for } z<0,\\ \mu-1-\mu(z-1)^6, & \text{for } z>0,\end{cases}$$

где $z\in\mathrm{R}^1$, μ — бифуркационный параметр. Полученные для отображения результаты указывают на то, что изменение пачки при увеличении тока I_0 в модели (1) может сопровождаться появлением и исчезновением квазистранных аттракторов (квазиаттракторов), т.е. хаотическим поведением.

Ключевые слова: нейрон; астроцит; тоническая и пачечная активность; бифуркация; добавление периода.

Как цитировать:

Барабаш Н.В. Каскад добавления периода в модели нейрон-глиального взаимодействия // Гены и клетки. 2023. Т. 18, № 4. С. 840–843. DOI: https://doi.org/10.17816/gc623431

Рукопись получена: 22.05.2023 **Рукопись одобрена:** 26.11.2023 **Опубликована online:** 20.01.2024

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Источник финансирования. Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 22-12-00348).
Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Cortes J.M., Desroches M., Rodrigues S., et al. Short-term synaptic plasticity in the deterministic Tsodyks–Markram model leads to unpredictable network dynamics // Proc Natl Acad Sci U S A. 2013. Vol. 110, N 41. P. 16610–16615. doi: 10.1073/pnas.1316071110
2. Barabash N., Levanova T., Stasenko S. Rhythmogenesis in the mean field model of the neuron–glial network // Eur Phys J Spec Top. 2023. Vol. 232. P. 529–534. doi: 10.1140/epjs/s11734-023-00778-9
3. Gordleeva S., Stasenko S., Semyanov A., et al. Bi-directional astrocytic regulation of neuronal activity within a network // Front Comput Neurosci. 2012. Vol. 6. P. 92. doi: 10.3389/fncom.2012.00092

КОНТАКТНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

* Н.В. Барабаш; адрес: 603022, Нижний Новгород, пр-т Гагарина, д. 23; e-mail: barabash@itmm.unn.ru

DOI: https://doi.org/10.17816/gc623431

Period addition cascade in a model of neuron-glial interaction

N.V. Barabash[1, 2] *

[1] National Research Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, Russian Federation, Nizhny Novgorod, Russian Federation;

[2] Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russian Federation

ABSTRACT

We analyze a system of four differential equations that describe the dynamics of a neuron-glial network using the mean field approximation [1, 2]:

$$\begin{cases} \tau\dot{E}=-E+\alpha\ \ln(1+e^{1/\alpha(JuxE+I_0)}), \\ \dot{x}=(1-x)/\tau_D-uxE, \\ \dot{u}=U(y)-u/\tau F+U(y)(1-u)E, \\ \dot{y}=-y/\tau_y+\beta\sigma(x), \end{cases} \quad (1)$$

where $E(t)$ is the average activity, $x(t)$ is the fraction of available neurotransmitter released into the synaptic gap with a probability $u(t)$; $y(t)$ is the fraction of the gliatransmitter released by the astrocyte. Sigmoidal functions $U(y)$ and $\sigma(x)$ correspond to changes in the base probability level $u(t)$ during the release of the gliatransmitter and activation of astrocytes during neurotransmitter release, respectively. The input inhibitory current corresponds to a bifurcation parameter with a negative value of I_0 <0, while the remaining parameters have positive and fixed values. The rest of the parameters are positive and fixed. For a detailed description of the model, including information on the type of functions and parameter values, refer to works [1, 2].

For a constant value of $U(x)$=const, the first three equations in system (1) represent the Tsodyks–Markram model, which explains the short-term synaptic plasticity phenomenon [1]. The model was enhanced with a fourth equation for y in [2], incorporating the influence of astrocytes via the concept of a tripartite synapse [3].

Model (1) illustrates a wide range of dynamic behavior including quiescence, regular tonic activity, and chaotic bursting activity. These behaviors correspond to various sets in the phase space, such as stable equilibrium states, limit cycles of period 1, limit cycles of any period $n\in N$, and chaotic attractors. Changing the I_0 l parameter causes sets to bifurcate, resulting in the loss of stability of certain attractors and the emergence of others, leading to a shift in the dynamic regime. Therefore, in terms of dynamics, the conditions for bifurcation and the characteristics of the newly formed attractors are crucial.

In this presentation, we have obtained a series of numerical bifurcations in system (1) that correspond to the shift from tonic activity to burst activity, resulting in subsequent modifications to the bursts. Specifically, our findings demonstrate that an increase in the number of spikes per burst is determined by a period adding cascade where the aforementioned limit cycle of period n becomes unstable, allowing for a previously established stable cycle of period n+1 to occupy the position of the "main" attractor. This process culminates in the vanishing of the orbit with an endless period due to the saddle-node bifurcation of cycles, followed by the creation of a dependable cycle with a period of 1.

The main properties of the cascade were reproduced in our model one-dimensional piecewise-smooth map

$$\bar{z}=\begin{cases} 1-z^6, & \text{for } z<0, \\ \mu-1-\mu(z-1)^6, & \text{for } z>0, \end{cases}$$

where $z\in R^1$, μ is a bifurcational parameter. The map's results suggest that an increase in current I_0 i in model (1) may lead to the emergence and disappearance of quasi-strange attractors (quasi-attractors), implying chaotic behavior in connection with burst variation.

Keywords: neuron; astrocyte; tonic ad bursting activity; bifurcation; period adding.

To cite this article:
Barabash NV. Period addition cascade in a model of neuron-glial interaction. *Genes & cells.* 2023;18(4):840–843. DOI: https://doi.org/10.17816/gc623431

ADDITIONAL INFORMATION

Funding sources. This study was supported by the Russian Scientific Foundation (grant No. 22-12-00348).

Competing interests. The author declares that he has no competing interests.

Received: 22.05.2023 **Accepted:** 26.11.2023 **Published online:** 20.01.2024

REFERENCES

1. Cortes JM, Desroches M, Rodrigues S, et al. Short-term synaptic plasticity in the deterministic Tsodyks–Markram model leads to unpredictable network dynamics. *Proc Natl Acad Sci U S A.* 2013;110(41):16610–16615. doi: 10.1073/pnas.1316071110

2. Barabash N, Levanova T, Stasenko S. Rhythmogenesis in the mean field model of the neuron-glial network. *Eur Phys J Spec Top.* 2023;232:529–534. doi: 10.1140/epjs/s11734-023-00778-9

3. Gordleeva SY, Stasenko SV, Semyanov AV, et al. Bi-directional astrocytic regulation of neuronal activity within a network. *Front Comput Neurosci.* 2012;6:92. doi: 10.3389/fncom.2012.00092

AUTHOR'S CONTACT INFO

* N.V. Barabash; address: 23 Gagarin avenue, 603022 Nizhny Novgorod, Russian Federation; e-mail: barabash@itmm.unn.ru