

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.4.2>

УДК: 53.097; 621.3

## СИНХРОНИЗАЦИЯ МЕМРИСТИВНЫХ НЕЙРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ

И.М. Кипелкин<sup>1,2</sup>, С.А. Герасимова<sup>1</sup>, А.И. Белов<sup>1</sup>,  
А.Н. Михайлов<sup>1,2</sup>, В.А. Смирнов<sup>2</sup>, В.Б. Казанцев<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет имени Н. И. Лобачевского, 603022, Нижний Новгород, проспект Гагарина, 23

<sup>2</sup> Южный федеральный университет, 347922, Таганрог, ул. Шевченко, 2

Статья поступила в редакцию 16 февраля 2024 г.

**Аннотация.** В статье рассматривается мемристивная нейроморфная система, состоящая из двух аналоговых мемристивных нейронов Фитцхью-Нагумо, соединенных через мемристивное устройство  $Au/Zr/SiO_2/TiN/Ti/SiO_2/Si$ . Такая система, с одной стороны, имитирует биологоправдоподобную динамику ионных каналов нейронов, с другой – межнейронные синаптические соединения. Установлено, что мемристивное устройство, под действием сигнала пресинаптического электрического нейрона обладает свойством синаптической пластичности. Экспериментально получены режимы вынужденной синхронизации с соотношением частот 1:1, 2:1, N:1. Разработанная система достаточно хорошо воспроизводит динамику синаптической связи в нейронных сетях мозга. С прикладной точки зрения, за счет адаптивных свойств мемристора она может быть использована для разработки нейросенсорных устройств.

**Ключевые слова:** мемристор, нейрон, синапс, синхронизация, нейроморфная система.

**Финансирование:** Исследование проводилось при финансовой поддержке Правительства Российской Федерации (Соглашение № 075-15-2022-1123).

**Автор для переписки:** Кипелкин Иван Михайлович, [ivan.kipelkin@yandex.ru](mailto:ivan.kipelkin@yandex.ru)

## Введение

В последние годы были предложены различные электронные модели нейронов и нейронных сетей, которые успешно применяются для реализации нейроморфных интерфейсов и имитации структуры и функций биологических нейронных сетей мозга [1,2]. Ясно, что для построения биологоправдоподобных моделей необходимо учитывать взаимодействие между нейронами, которое имитируется с помощью электронных элементов, способных воспроизводить ключевые характеристики биологических синапсов, включая передачу сигнала и адаптивные перестройки (пластичность) связей, составляющие основу когнитивных функций [3]. В данном контексте, мемристор является одним из подходящих элементов, который можно рассматривать для включения в электронные схемы передачи и обработки сигналов в искусственных нейронных сетях [4,5].

Одним из интересных приложений мемристоров является построение нелинейных осцилляторов на их основе [6-8]. Такие модели привлекают большое внимание в связи с их потенциальным применением для разработки устройств, имитирующих функции мозга [9-11]. В отличие от классических формальных нейронов и нейронных сетей, применяемых при машинном обучении нейросетей, импульсные нейронные осцилляторы (спайковые нейроны) обладают собственной нелинейной динамикой и способны демонстрировать нетривиальные нелинейные эффекты генерации и передачи сигналов. Следовательно, существует необходимость исследовать динамические свойства таких систем [12], одним из которых является синхронизация. Синхронизация – особый вид динамического взаимодействия, который характеризуется одновременной активацией ансамбля нейронов. В нейронауках считается, что эффекты синхронизации нейронных импульсов являются одними из ключевых при осуществлении мозгом различных когнитивных функций, включая запоминание и распознавание информации.

Стоит отметить, что работы последних лет показали высокую эффективность использования мемристорных систем при исследовании синаптической пластичности [13].

В данной работе проведено экспериментальное исследование адаптивного поведения мемристорного устройства, а также связанных мемристорных нейроподобных генераторов [14] с использованием мемристорного устройства в качестве искусственного синапса для изучения различных режимов синхронизации.

### **Методика эксперимента**

Разработанная нейроморфная система состояла из электронной мемристорной схемы генератора Фитцхью – Нагумо (ФХН), неинвертирующего усилителя напряжения, нагрузочного резистора сопротивлением 4.3 кΩ и энергонезависимого мемристорного устройства, образованного тонкопленочной структурой металл-оксид-металл – Au/Zr/SiO<sub>2</sub>/TiN/Ti/SiO<sub>2</sub>/Si.

Описание компонентов: Аналоговый мемристорный нейрон ФХН образован путем объединения четырех основных компонентов: релаксационного RL контура, блока делителя напряжения, блока усилителя и блока нелинейности на основе лабораторного энергонезависимого мемристорного устройства. Структура аналогового мемристорного нейрона ФХН [14], а также энергонезависимых мемристорных устройств подробно описаны в [15,16]. Мемристорный генератор ФХН был разработан и смоделирован в Micro-cap, распайка выполнена в «SPRINT LAYOUT». Генератор обладает основными характеристическими особенностями нейрона, такими как наличие порога возбудимости и возможность переключения между режимами возбуждения и автоколебаний.

Эта система функционирует следующим образом: мемристорный нейрон ФХН генерирует нейроподобный сигнал, воздействующий на мемристорное устройство запуская процесс окислительно-восстановительных свойств филамента в диэлектрическом слое мемристорного устройства. Путем

изменения сопротивления переменного резистора мы управляли амплитудой одного из устройств, чтобы достичь вынужденной синхронизации между двумя генераторами (рис. 1).

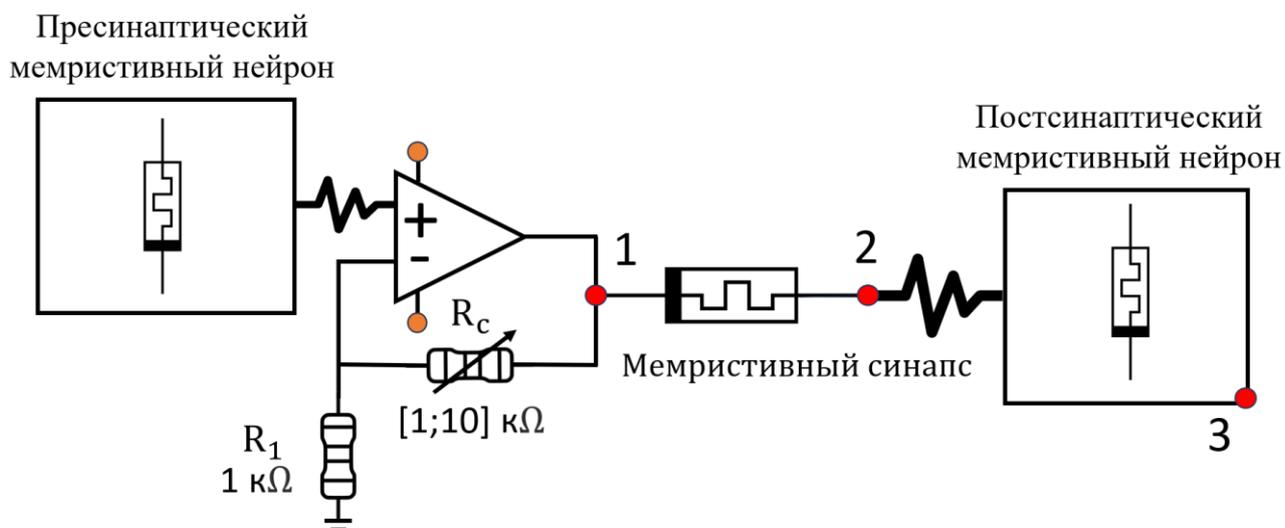


Рис. 1. Блок-схема эксперимента по взаимодействию между пресинаптическим мемристивным нейроном и постсинаптическим мемристивным нейроном через мемристивное устройство Au/Zr/SiO<sub>2</sub>/TiN/Ti/SiO<sub>2</sub>/Si/grass.  $R_c$  – потенциометр, характеризующий силу связи. В пресинаптическом нейроне в качестве нелинейного элемента использовалась структура Au/Ta/ZrO<sub>2</sub>(Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)/Pt/Ti/glass. В постсинаптическом – Au/Ru/ZrO<sub>2</sub>(Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)/Pt/Ti/glass.

Для проведения всех экспериментов использовался осциллограф С7-334 «АльфаТрек». Характеристики переключения мемристивной структуры снимались при комнатной температуре и нормальном атмосферном давлении с использованием анализатора полупроводниковых приборов Agilent B1500A компании Keysight со скоростью сканирования 8 В/с. Амплитуда сигнала, создаваемого пресинаптическим нейроном, изменялась в диапазоне от 0,5 до 6,5 Вольт.

## Результаты эксперимента

В процессе эксперимента мы исследовали влияние нейроподобного сигнала различной амплитуды напряжения на параметры переключения мемристивного устройства. Такое исследование необходимо для определения интервалов синхронизации в ходе дальнейшего исследования. Для этого мы

соединили устройство с генератором сигнала по схеме, которая показана на рисунке 1, через точки 1 и 2. Сигнал от генератора подается на верхний электрод (Au) мемристивной структуры, а сигнал с нижнего электрода (Ti) проходит через нагрузочное сопротивление на второй канал осциллографа. Одновременно с этим сигнал от генератора отображается на первом канале осциллографа.

В рамках исследования было обнаружено, что значение амплитуды выходного сигнала генератора влияет на способность мемристивной структуры переключаться из состояния с высоким сопротивлением (СВС) в состояние с низким сопротивлением (СНС), а также переходить в состояние более высоким сопротивлением. Адаптивное поведение устройства определяется изменением его сопротивления, которое в свою очередь зависит от параметров электрического воздействия (рис. 2).

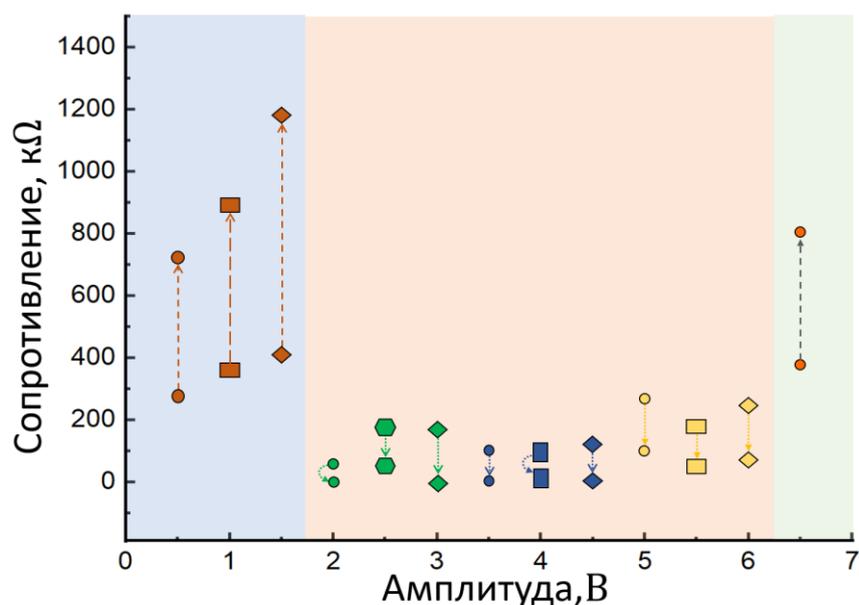


Рис. 2. Зависимость сопротивления мемристивного устройства Au/Zr/SiO<sub>2</sub>/TiN/Ti/SiO<sub>2</sub>/Si от выходного сигнала пресинаптического нейрона ФХН. Каждый многогранник указывает на определенный уровень напряжения, а стрелки на изменения сопротивления устройства.

Из рисунка 2 следует, что изменение амплитуды выходного сигнала в интервале от 0.5 до 1.8 В приводит к тому, что мемристивное устройство переходит в более высокоомное состояние. Это связано с тем, что устройству недостаточно напряжения для осуществления переключения. Аналогичный эффект наблюдается, когда амплитуда выходного напряжения превышает 6 В,

при этом структура переходит в состояние экстремального сопротивления и больше не реагирует на каждый всплеск. Таким образом, если напряжение слишком мало (менее 1.8 В) или слишком высоко (более 6 В), то проводящие каналы в оксидной пленке не разрушаются, и, следовательно, устройство не переключается.

При увеличении амплитуды сигнала от 2 до 5.5 В происходит переключение устройства из СВС ( $\sim 220$  к $\Omega$ ) в СНС ( $\sim 25$  к $\Omega$ ). Важно отметить, что значения сопротивления при начальном и конечном состояниях устройства могут сильно различаться из-за свойственной ему стохастической природы процесса переключения. Переключение в менее проводящее состояние мемристивного устройства с оксидной пленкой из SiO<sub>2</sub> можно охарактеризовать разрывом связей Si-O-Si под действием электрического поля, сопровождающегося образованием нейтральных кислородных вакансий. Миграция заряженных междоузельных ионов кислорода обеспечивает окисление и восстановление проводящих нитей [15].

Следовательно, полученные результаты экспериментов указывают на адаптивное поведение мемристивного устройства Au/Zr/SiO<sub>2</sub>/TiN/Ti/SiO<sub>2</sub>/Si, а соединение мемристивных генераторов – имитировать свойство пластичности.

Далее производя электроформовку мемристивных структур и откалибровав генераторы, мы провели исследование их поведения в составе электронного синапса, используя мемристивное устройство Au/Zr/SiO<sub>2</sub>/TiN/Ti/SiO<sub>2</sub>/Si (рис. 3). Эксперимент проводился по схеме, изображенной на рисунке 1, где показания, считываемые осциллограммам, снимались с точек 1 и 3. Первый нейрон ФХН изначально был переведен в режим автоколебаний, а второй – в возбудимый.

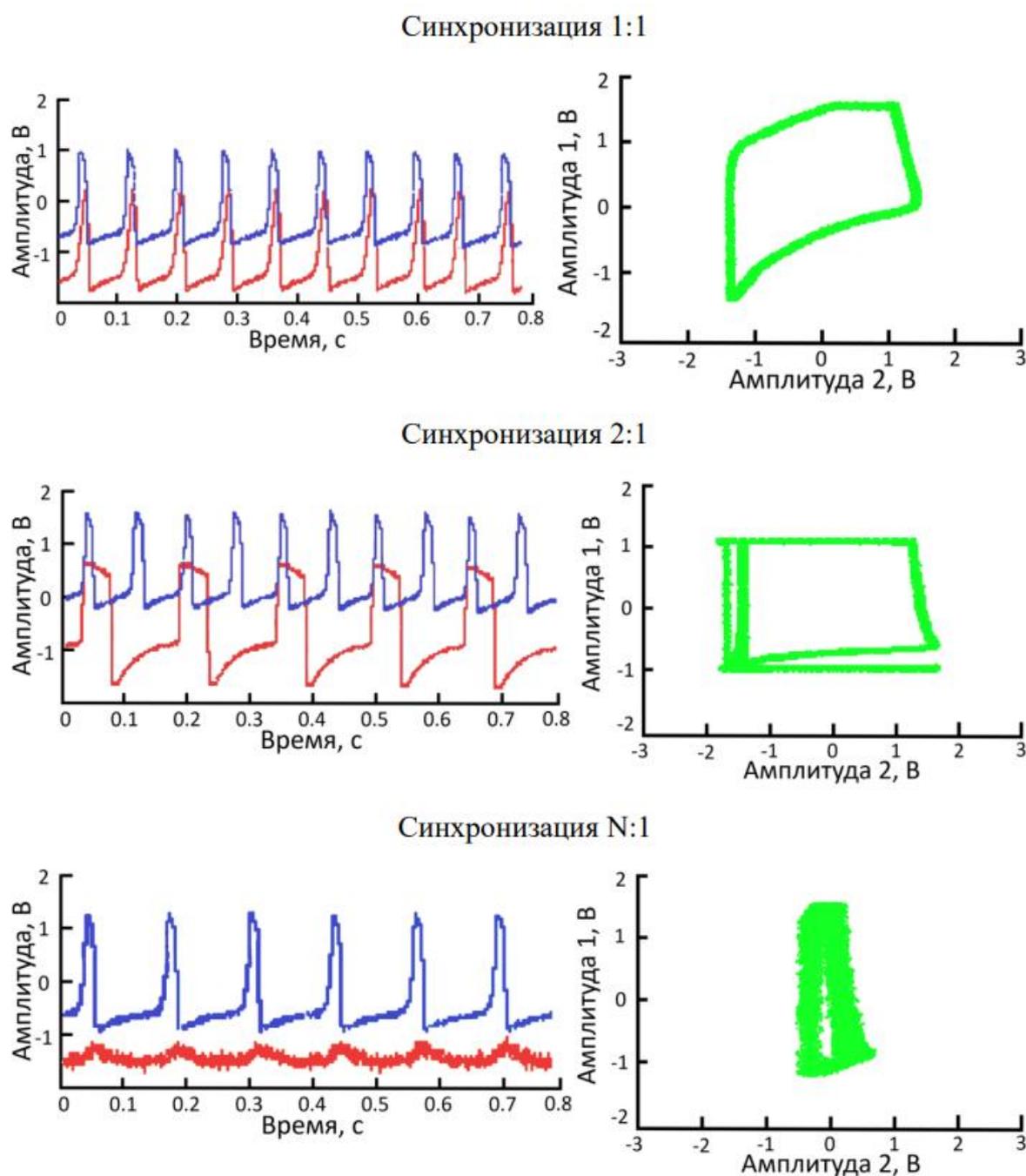


Рис. 3. Амплитудные характеристики и соответствующие им фазовые портреты взаимодействующих генераторов через мемристивное устройство  $\text{Au/Zr/SiO}_2/\text{TiN/Ti/SiO}_2/\text{Si}$ , при синхронизации 1:1, 2:1 и N:1. Красный цвет – амплитуда постсинаптического нейрона, синий цвет – амплитуда пресинаптического нейрона.

В данном эксперименте наблюдается, что при повышении амплитуды колебаний постсинаптического нейрона с 0.4 до 3 В, генераторы синхронизируются с отношением частот: 1:1, 2:1, N:1, где N – количество импульсов, которые передает пресинаптический нейрон в ответ на генерацию постсинаптического нейрона. Синхронизация двух мемристивных генераторов ФХН посредством

мемристивного устройства устанавливалась следующим образом: при приложении напряжения на мемристивное устройство Au/Zr/SiO<sub>2</sub>/TiN/Ti/SiO<sub>2</sub>/Si происходит переключение из СВС в СНС, что в свою очередь ведет к установлению связи нейроподобной системы. Постсинаптический нейрон переходил в автоколебательный режим, при этом колебания генераторов синхронизировались. Интервалы для амплитуды пресинаптического нейрона (1.6-2.9 В) и сопротивления мемристивного устройства (12-27 кΩ) указывают на достижение различных режимов синхронизации мемристивных нейроподобных генераторов, в соответствии с исследованиями выше.

## **Заключение**

В настоящей работе продемонстрировано экспериментальное применение тонкопленочной структуры металл-оксид-металл при изучении явления синхронизации. Объединив два мемристивных нейрона Фитцхью-Нагумо с помощью мемристивного устройства Au/Zr/SiO<sub>2</sub>/TiN/Ti/SiO<sub>2</sub>/Si, мы получили новую нейроморфную систему и детально проанализировали ее динамическое поведение. Мы получили различные режимы синхронизации, включая 1:1, 2:1, N:1, а также фазовые траектории системы.

Относительная компактность и высокая чувствительность делают предлагаемую систему очень перспективным инструментом для нейросенсорных устройств, где требуется высокая пропускная способность [17].

**Финансирование:** Исследование проводилось при финансовой поддержке Правительства Российской Федерации (Соглашение № 075-15-2022-1123).

## **Литература**

1. Broccard F. D. et al. Neuromorphic neural interfaces: from neurophysiological inspiration to biohybrid coupling with nervous systems //Journal of neural engineering. – 2017. – Т. 14. – №. 4. – С. 041002.

2. Sarkar T. et al. An organic artificial spiking neuron for in situ neuromorphic sensing and biointerfacing //Nature Electronics. – 2022. – Т. 5. – №. 11. – С. 774-783.
3. Kazakov V. V. et al. Digital storing and representation of spectral data of negative ions //AIP Conference Proceedings. – AIP Publishing, 2018. – Т. 2052. – №. 1.
4. Chua L. Memristor-the missing circuit element //IEEE Transactions on circuit theory. – 1971. – Т. 18. – №. 5. – С. 507-519.
5. Gaba S. et al. Ultralow sub-1-nA operating current resistive memory with intrinsic non-linear characteristics //IEEE Electron Device Letters. – 2014. – Т. 35. – №. 12. – С. 1239-1241.
6. Walters B. et al. A Review of Graphene-Based Memristive Neuromorphic Devices and Circuits //Advanced Intelligent Systems. – 2023. – Т. 5. – №. 10. – С. 2300136.
7. Pershin Y. V., Di Ventra M. Memristive circuits simulate memcapacitors and meminductors //arXiv preprint arXiv:0910.1583. – 2009.
8. Buscarino A. et al. Memristive chaotic circuits based on cellular nonlinear networks //International Journal of Bifurcation and Chaos. – 2012. – Т. 22. – №. 03. – С. 1250070.
9. Gerasimova S. A. et al. Memristive neural networks for predicting seizure activity // Современные технологии в медицине. – 2023. – Т. 15. – №. 4 (eng). – С. 30-37.
10. Stasenko S. V., Mikhaylov A. N., Kazantsev V. B. Model of Neuromorphic Odorant-Recognition Network //Biomimetics. – 2023. – Т. 8. – №. 3. – С. 277.
11. Zhao H. et al. Memristor-based signal processing for edge computing //Tsinghua Science and Technology. – 2021. – Т. 27. – №. 3. – С. 455-471.
12. Gerasimova S. A. et al. Living-Neuron-Based Autogenerator // Sensors. – 2023. – Т. 23. – №. 16. – С. 7016.
13. Stasenko S. V., Mikhaylov A. N., Kazantsev V. B. Control of Network Bursting in a Model Spiking Network Supplied with Memristor-Implemented Plasticity //Mathematics. – 2023. – Т. 11. – №. 18. – С. 3888.

14. Kipelkin I. et al. Mathematical and Experimental Model of Neuronal Oscillator Based on Memristor-Based Nonlinearity // Mathematics. – 2023. – Т. 11. – №. 5. – С. 1268.
15. Mikhaylov A. N. et al. One-board design and simulation of double-layer perceptron based on metal-oxide memristive nanostructures // IEEE Transactions on Emerging Topics in Computational Intelligence. – 2018. – Т. 2. – №. 5. – С. 371-379.
16. Koryazhkina M. N. et al. Resistive state relaxation time in ZrO<sub>2</sub> (Y)-based memristive devices under the influence of external noise // Chaos, Solitons & Fractals. – 2022. – Т. 162. – С. 112459.
17. Maraj J. J. et al. Sensory Adaptation in Biomolecular Memristors Improves Reservoir Computing Performance //Advanced Intelligent Systems. – 2023. – С. 2300049.

**Для цитирования:**

Кипелкин И.М., Герасимова С.А., Белов А.И., Михайлов А.Н., Смирнов В.А., Казанцев В.Б. Синхронизация мемристивных нейроподобных генераторов. // Журнал радиоэлектроники. – 2024. – №. 4. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.4.2>