

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования

«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИМЕНИ Н. Г. ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра системного анализа и  
автоматического управления

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭМПИРИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ С  
РАДИАЛЬНЫМИ БАЗИСНЫМИ ФУНКЦИЯМИ ДЛЯ  
АНАЛИЗА СИГНАЛОВ РАСПРЕДЕЛЁННЫХ НЕЙРОСЕТЕЙ**

**АВТОРЕФЕРАТ МАГИСТЕРСКОЙ РАБОТЫ**

студента 2 курса 271 группы  
направления 09.04.01 — Информатика, вычислительная техника  
факультета КНиИТ  
Созонова Евгения Алекснадровича

Научный руководитель

д. ф.-м. н., профессор

\_\_\_\_\_

И. В. Сысоев

Заведующий кафедрой

к. ф.-м. н., доцент

\_\_\_\_\_

И. Е. Тананко

Саратов 2024

## ВВЕДЕНИЕ

Анализ биологических процессов и систем методами нелинейной динамики — актуальная и популярная область исследований в настоящее время. Одно из направлений в этой области — анализ связанности по временным рядам активности различных подсистем организма, в том числе головного мозга. Здесь наибольшую актуальность имеет изучение таких процессов, которые либо возникают в результате взаимодействия различных структур мозга, либо распространяются в мозге на значительное расстояние от исходного фокуса. Одним из таких явлений является волна распространяющейся депрессии [1–3] (сокращённо — РД), представляющая собой процесс кратковременной волны резкой клеточной деполяризации. В настоящее время данное явление активно изучается в нейрофизиологии, нейропсихологии и неврологии. Сама по себе волна РД является причиной мигрени, то есть её изучение имеет важное клиническое значение, но часто связана и с другими патологиями, например, эпилепсией. Результаты исследования данного явления потенциально могут объяснить или дать информацию как о различных патологических состояниях центральной нервной системы, так и о принципах работы головного мозга в целом. РД является достаточно яркой и хорошо воспроизводимой реакцией серого вещества центральной нервной системы. РД хорошо детектируется на записях электроэнцефалограмм.

Предполагается, что односторонняя волна РД (то есть волна, распространяющаяся только в одном полушарии, что наиболее типично) способна менять функциональные взаимодействия в коре головного мозга. Для проверки данной гипотезы в данной работе была поставлена задача исследовать влияние волны РД на функциональную связь межполушарных областей коры у крыс.

К настоящему времени для анализа связанности между колебательными системами по их сигналам создано достаточно большое число алгоритмов, среди которых: методы причинности по Грейнджеру [4], в том числе нелинейной, частная направленная когерентность, методы теории информации, включая функцию взаимной информации и энтропию переноса, методы фазовой динамики. Данные методики находят частое применение в нейрофизиологии, а некоторые были прямо создавались в расчёте на обработку биомедицинских данных, как [5]. При этом надо понимать, что каждая из

них в действительности имеет свои пределы применимости, исследованию чего посвящены даже отдельные работы [6]. В данной работе предлагается использовать так называемый метод ядерной причинности по Грейнджеру, в котором в качестве модели используется линейная комбинация радиальных базисных функций значение которых зависит от расстояния точки до центра выбранной функции. Использование радиальных базисных функций для анализа связанности применительно к биоэлектрическим сигналам, в том числе для временных рядов, полученных с помощью электроэнцефалографии впервые было предложено в работах Даниэля Маринацо [7, 8].

**Целью** данной работы является исследование изменения уровня функционально связанности полушарий головного мозга, вызванного прохождением волны распространяющейся депрессии, методом ядерной причинности по Грейнджеру, в котором в качестве модели используются радиальные базисные функции. Для достижения этой цели в работе решаются следующие **задачи**:

- обзор и анализ литературы по физиологии волны распространяющейся депрессии;
- обзор различных типов нелинейных функций и анализ их применимости для построения моделей, используемых в методе причинности по Грейнджеру;
- реализация в виде компьютерной программы двух различных вариантов метода причинности по Грейнджеру;
- считывание, первичный анализ, предварительная обработка экспериментальных данных — записей локальных потенциалов мозга;
- анализ взаимодействия между структурами мозга с использованием реализованных алгоритмов причинности по Грейнджеру;
- статистический анализ и интерпретация полученных оценок связанности.

**Структура и объем работы.** Магистерская работа состоит из введения, 4 разделов, заключения, списка использованных источников и приложений. Общий объем работы — 64 страницы, из них 52 страницы — основное содержание, включая 45 рисунков и заключение. Список использованных источников информации содержит — 54 наименования.

## КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Первый раздел «Обзор работ посвящённых радиальным базисным функциям и волнам распространяющейся депрессии»** посвящён обзору работ посвящённых радиальным базисным функциям, моделям на их основе и текущих результатов исследования РД волн.

В подразделе 1.1 описывается понятие радиальных базисных функций, общий вид (см. формулу 1) и приведена часть наиболее часто используемых РБФ.

$$\varphi(\mathbf{x}) = \sqrt{\sigma^2 + \|\mathbf{x} - \mathbf{c}\|^2} \quad (1)$$

В подразделе 1.2 описывается такое явление как волна распространяющейся депрессии и текущие результаты исследования этого феномена. Приведены примеры записей с РД волной и примеры потенциальных последствий возникающих после её прохождения.

**Второй раздел «Модели на основе радиальных базисных функций»** посвящён моделям на основе РБФ и методам их обучения, методу причинности по Грейнджеру и его модификациям.

В подразделе 2.1 описываются модели на основе радиальных базисных, общий вид которых представлен в формуле 2, краткая история их возникновения и методам обучения моделей на их основе. Приведены 2 пути обучения моделей на их основе. Также, приведены преимущества и недостатки моделей на основе РБФ в сравнении с прочими.

$$f(\mathbf{x}, \mathbf{w}) = \sum_{i=0}^{k-1} w_i \varphi_i(\mathbf{x}), \quad (2)$$

В подразделе 2.2 описывается алгоритм обучения моделей на основе РБФ и подробно все применяемые методы, в частности метод наименьших квадратов, метод кластеризации C-mean, метод градиентного спуска. Кратко алгоритм обучения выглядит следующим образом:

1. задаются статические параметры модели:  $K$  — количество РБФ,  $\tau$  — дальность прогноза,  $l$  — лаг модели (см. [9]);
2. методом кластеризации  $K$ -средних находятся начальные расположения центров  $\mathbf{c}_i$ ;

3. радиусы центров  $\sigma_i$  берутся как половина расстояния до ближайшего соседа;
4. коэффициенты весов  $w_i$  рассчитываются с помощью метода наименьших квадратов;
5. при необходимости можно провести уточнение параметров (в частности, радиуса) с помощью метода градиентного спуска.

Подраздел 2.3 посвящён классическому алгоритму причинности по Грейнджеру, рассмотрена методика расчёта показателя связанности и описаны ограничения классического алгоритма.

Подраздел 2.4 описывает модификацию метода причинности по Грейнджеру в которой в качестве модели используются модели на основе РБФ.

Подраздел 2.5 описывает модификацию метода причинности по Грейнджеру в котором используются полиномиальные функции.

**Третий раздел «Описание экспериментальных данных и методы их пред-обработки»** содержит описание эксперимента, условия содержания животных, методы записи биопотенциалов и методы предобработки сигналов.

Подраздел 3.1 содержит информацию об используемых животных, описывается используемое оборудование и приводится подробное описание эксперимента.

Подразделы 3.2-3.5 посвящены методам предобработки сигналов.

**Четвёртый раздел «Применение ядерной причинности по Грейнджеру для анализа уровня связанности между полушариями головного мозга во время волны распространяющейся депрессии»** посвящён использованию ядерной причинности по Грейнджеру для анализа уровня связанности полушарий головного мозга крыс. В качестве базисной функции используется радиальная базисная функция Гаусса:

$$\varphi(\mathbf{x}) = e^{-\|\mathbf{x}-\mathbf{c}\|^2/(2\sigma^2)} \quad (3)$$

Подраздел 4.1 содержит информацию о используемом количестве радиальных базисных функций.

В подразделе 4.2 Описывается процесс выбора оптимальной ширины окна для анализа динамики изменения показателя PI. И параметры модели для подбора. В результате была выбрана ширина окна 20 секунд, дающая опти-

мальный временной масштаб и позволяющая сопоставить результаты мерами аналогичными по задаче методу причинности по Грейнджеру.

В подразделе 4.3 непосредственно описываются результаты расчётов изменения уровня функциональной связанности методов ядерной причинности по Грейнджеру. Приводятся как результаты полученные для отдельных особей, так и усреднённые результаты по выборке из 10 особей, представленные на следующем рисунке:

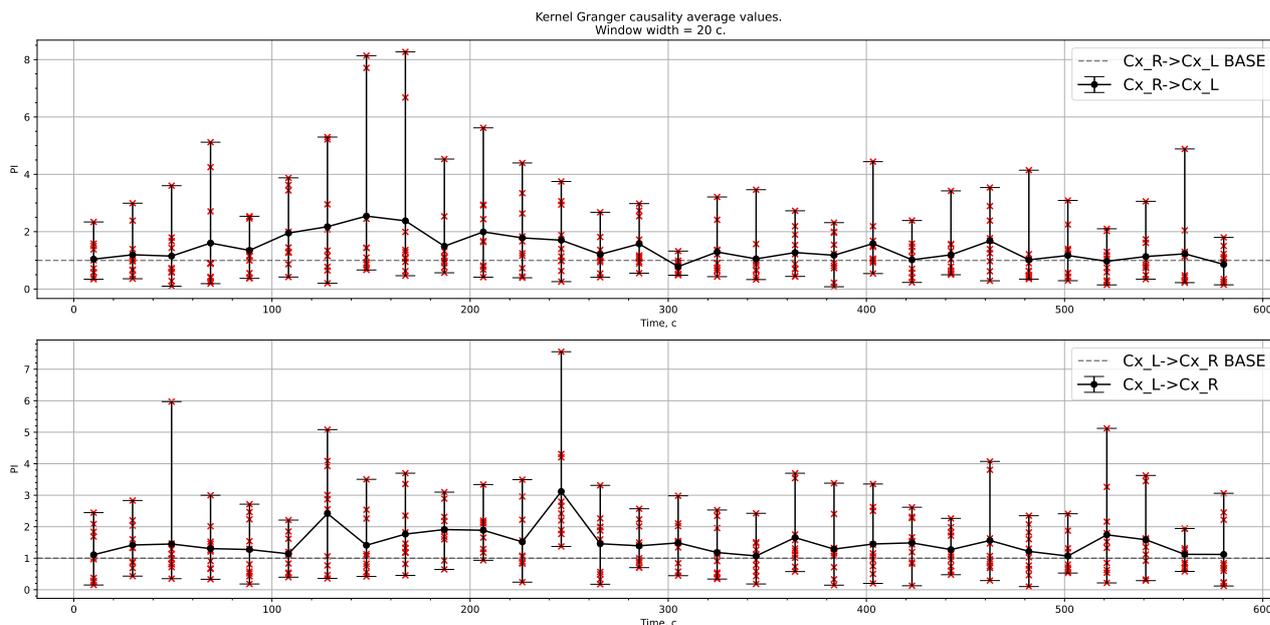


Рисунок 1 – Нормированное значение  $PI$  по 10 записям содержащих волну РД. Планки погрешностей — минимальные и максимальные значения  $PI$  в соответствующих окнах. Пунктирными горизонтальными линиями изображены усредненные значения, соответствующие фону представленной меры. Точками показаны индивидуальные значения для каждой отдельной особи

В разделе 4.4 приводится критерий оценки результатов. Для анализа результатов формируется гипотеза, такая, что для рассмотренных интервалов эмпирическое среднее является математическим ожиданием выборки значений оценки ( $N = 10$ ) ядерной и полиномиальной причинности по Грейнджеру. Вероятность того, что каждое значение из выборки будет меньше, чем среднее —  $\frac{1}{2}$ . Вероятность того, что 10 значений будут меньше —  $\left(\frac{1}{2}\right)^{10}$ . Такой уровень значимости как правило называют поточечным и он требует корректировки из-за множественного тестирования: в данном случае проводится  $L = 30$  последовательных независимых измерений. С учётом поправки

Бонферрони уровень значимости получается равен  $p = 30 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{10} \approx 0,03$ .

В результате, исходя анализа результатов(см. рисунок 1), делает вывод а наличие изменения уровня связанности после прохождения волны РД, однако этот рост является статистически незначимым.

Раздел 4.5 посвящён сравнение метода ядерной причинности по Грейнджеру с методом полиномиальной причинности по Грейнджеру. В результате сравнения результатов представленных на рисунках 2 и 3 можно отметить достаточно больше количество пиков в обоих случаях. Так же общий вид графиков оказывается достаточно близок у двух разных реализация метода причинности по Грейнджеру главным образом из-за того, что высокие явные пики  $PI$  оказываются как правило расположены на одних и тех же временных интервалах.

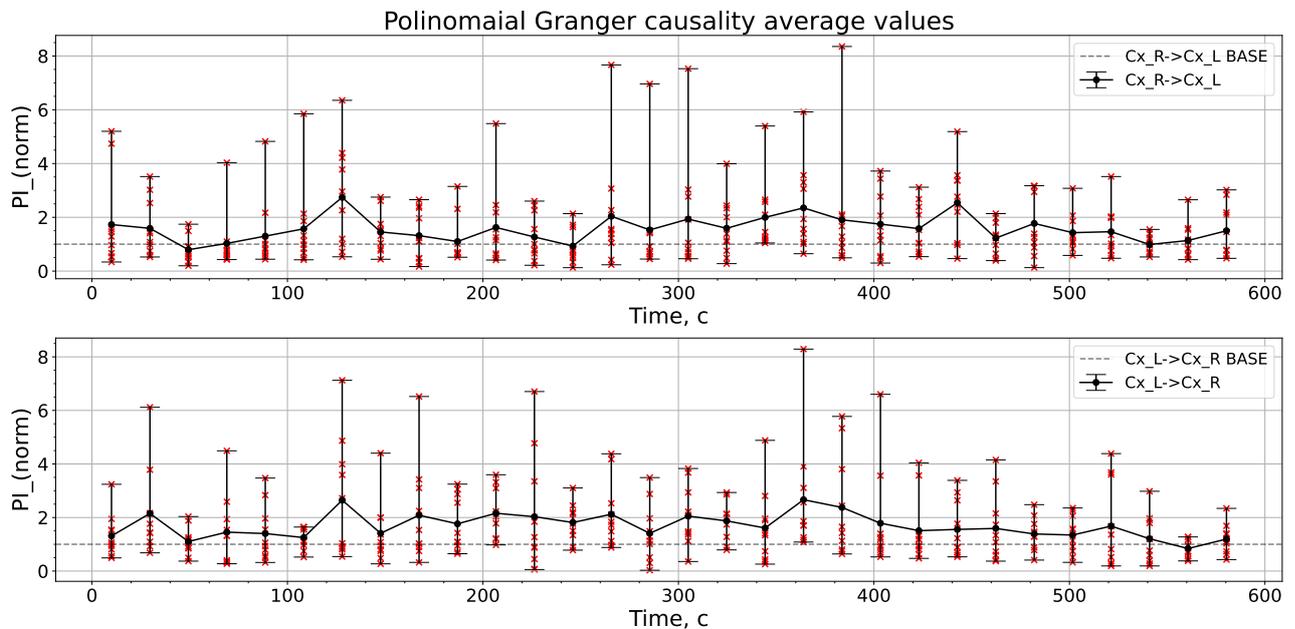


Рисунок 2 – Нормированное среднее значение  $PI$  рассчитанное методом полиномиальной причинности по Грейнджеру для 10 сигналов, содержащих волну РД. Планки погрешностей — минимальные и максимальные значения  $PI$  в соответствующих окнах. Пунктирными горизонтальными линиями изображены усредненные значения, соответствующие фону представленной меры.

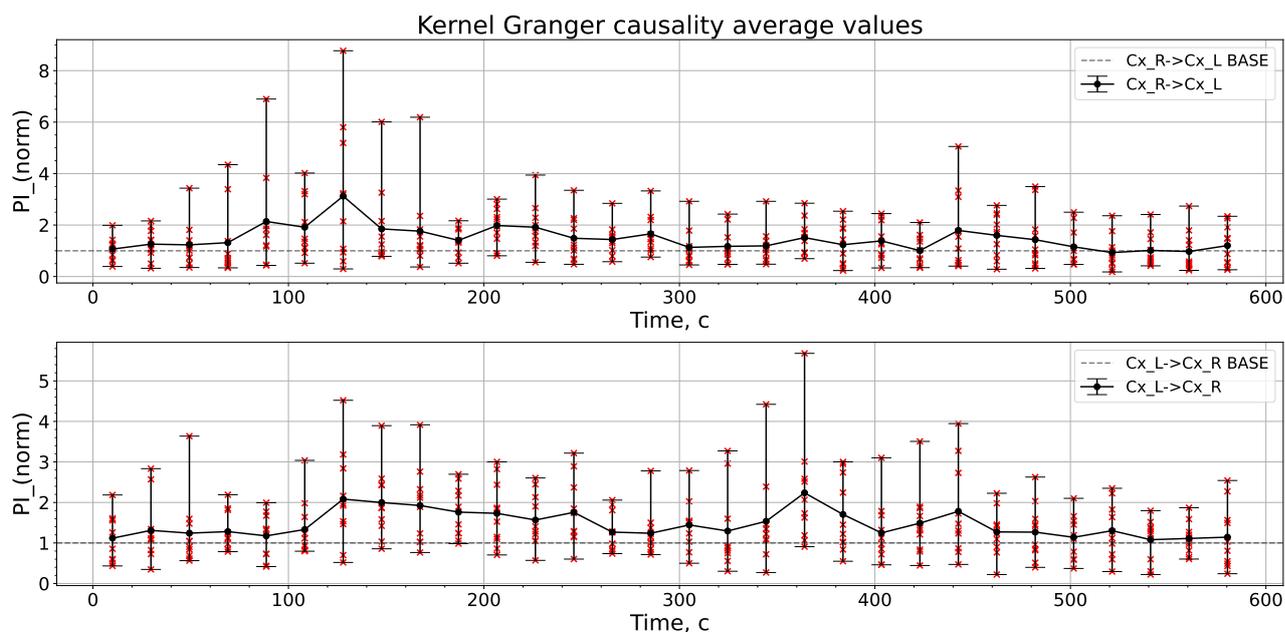


Рисунок 3 – Нормированное среднее значение  $PI$  рассчитанное методом ядерной причинности причинности по Грейнджеру для 10 сигналов, содержащих волну РД. Планки погрешностей — минимальные и максимальные значения  $PI$  в соответствующих окнах. Пунктирными горизонтальными линиями изображены усредненные значения, соответствующие фону представленной меры.

Также, индивидуальное распределение  $PI$  для каждой из особей очень различно: для каждой крысы фактически наблюдается свой сценарий эволюции связанности. В обоих случаях, не наблюдается статистически значимого отличия  $PI$  от фонового уровня. Данные результаты могут свидетельствовать о том, что метод причинности по Грейнджеру оказывается недостаточно чувствителен к данному рода сигналам и не обнаруживает изменения уровня связанности в отличие от метода расчёта взаимной информации и энтропии переноса.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для достижения цели, в ходе работы была изучена различная литература посвящённая причинности по Грейнджеру, её модификациям, таким как ядерная и полиномиальная причинность по Грейнджеру. Были изучены радиальные базисные функции и алгоритмы обучения моделей на их основе, в частности, метод наименьших квадратов, метод градиентного спуска и метод кластеризации C-means. Также, изучались статьи описывающие такое явление как РД-волна. Для работы с экспериментальными данными были изучена литература посвященная методам обработки сигналов, таким как, фильтрация с помощью преобразования Фурье, методы детрендрования, в частности метод скользящего среднего. Также, был предложен способ борьбы с единичными резкими скачками потенциала. Для интерпретации полученных результатов, была изучена литература посвящённая статистическому анализу и методам, позволяющим работать с небольшой статистической выборкой.

Для построения моделей с помощью РБФ, обработки сигналов описанными выше методами и расчёта уровня связанности методом причинности по Грейнджеру, были созданы соответствующие программы, реализующие каждый из алгоритмов. В качестве инструмента для реализации алгоритмов был выбран язык программирования Python. Методы предобработки экспериментальных данных были выделены в отдельный модуль и размещены под свободной лицензией на Github. Также, была разработана программа для конвертации данных из специального служебного формата, в более удобный для работы формат.

В работе, подробно, были рассмотрены так называемые радиальные базисные функции, которые широко применяются в моделировании и аппроксимации временных рядов, в том числе биологических потенциалов, например электроэнцефалограмм. Они были применены в качестве модели для метода причинности по Грейнджеру. Такая модификация называется ядерной причинностью по Грейнджеру, который в свою очередь является одним из методов оценки связанности между различными процессами, в том числе биологическими. Данный алгоритм можно применять для анализа связанности по временным рядам активности различных подсистем организма, в том числе головного мозга.

В данной работе была исследовано изменение функциональной связанности между двумя полушариями головного мозга с помощью метода ядерной причинности по Грейнджеру, дополнительно к этому был произведён расчёт изменения уровня функциональной связанности методом полиномиальной причинности по Грейнджеру. Для этого были рассмотрены и обработаны (проведены фильтрация, детрендирование, удаление артефактов) записи локальных потенциалов мозга десяти крыс, у которых односторонняя волна РД вызывалась хирургическим вмешательством. Исследовались сигналы как непосредственно после вызова РД (600 с), так и в фоне (по 800 с). В результате, было выявлено увеличение уровня связанности в направлении как от здорового (неповреждённого) полушария к повреждённому, так и в обратном направлении. При этом статистическая значимость данных изменений была довольно низка. Одна из проблем статистического анализа заключается в том, что динамика связанности сильно различается у разных животных: результаты могут быть значимы для одного животного, но не значимы по ансамблю реализаций для нескольких.

Результаты исследования были представлены на Всероссийских конференциях «Нелинейные дни в Саратове для молодых — 2023», проводившейся в Саратове, и «Нелинейная динамика в когнитивных исследованиях — 2023», проводившейся в Нижнем Новгороде. Тезисы работ были опубликованы в сборниках трудов этих конференций [10, 11].

#### **Основные источники информации:**

- 1 *Gorji, Ali*. Spreading depression: a review of the clinical relevance / Ali Gorji // *Brain Research Reviews*. — 2001. — Vol. 38, no. 1-2. — P. 33–60.
- 2 *Somjen, George G*. Mechanisms of spreading depression and hypoxic spreading depression-like depolarization / George G Somjen // *Physiological reviews*. — 2001. — Vol. 81, no. 3. — P. 1065–1096.
- 3 *Koroleva, V. I*. Reduced incidence of cortical spreading depression in the course of pentylenetetrazol kindling in rats / V. I. Koroleva, L. V. Vinogradova, J. Bures // *Brain Research*. — 1993. — Vol. 608, no. 1. — P. 107–114.
- 4 *Granger, C. W. J*. Investigating causal relations by econometric models and cross-spectral methods / C. W. J. Granger // *Econometrica*. — 1969. — Vol. 37, no. 3. — P. 424–438.

- 5 *Baccala, LA.* Partial directed coherence: a new concept in neural structure determination / LA Baccala, K Sameshima // *Biol. Cybern.* — 2001. — Vol. 84. — P. 463–474.
- 6 *Smirnov, D.A.* Quantifying causal couplings via dynamical effects: A unifying perspective / D.A. Smirnov // *Physical Review E.* — 2014. — Vol. 90. — P. 062921.
- 7 *Marinazzo, D.* Kernel method for nonlinear granger causality / D. Marinazzo, M. Pellicoro, S. Stramaglia // *Physical Review Letters.* — 2008. — Vol. 100, no. 14. — P. 144103.
- 8 *Marinazzo, D.* Kernel-granger causality and the analysis of dynamical networks / D. Marinazzo, M. Pellicoro, S. Stramaglia // *Physical Review E.* — 2008. — Vol. 77, no. 5. — P. 056215.
- 9 *Сысоева, М. В.* Математическое моделирование динамики энцефалограммы во время эпилептического припадка / М. В. Сысоева, И. В. Сысоев // *Письма в ЖТФ.* — 2012. — Т. 38, № 3. — С. 103–110.
- 10 *Созонов, Е. А.* Использование эмпирических моделей с радиальными базисными функциями для анализа сигналов распределённых нейросетей / Е. А. Созонов, И. В. Сысоев, Е. М. Сулейманова, Л. В. Виноградова // *Нелинейные дни в Саратове для молодых — 2023 : материалы XXX Всероссийской научной конференции / Под ред. Короновского А. А. — Саратов: Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского, 2023. — Т. 17. — С. 122–123.*
- 11 *Созонов, Е. А.* Использование эмпирических моделей с радиальными базисными функциями для выявления связей между полушариями мозга при распространяющейся депрессии / Е. А. Созонов, И. В. Сысоев, Е. М. Сулейманова, Л. В. Виноградова // *Нелинейная динамика в когнитивных исследованиях — 2023 : Труды VIII Всероссийской конференции / Под ред. Антонца В. А., Парина С. Б., Яхно В. Г. — Нижний Новгород: Институт прикладной физики Российской академии наук, 2023. — С. 148–150.*