

**МИНОБРНАУКИ РОССИИ**  
**Федеральное государственное бюджетное образовательное**  
**учреждение высшего образования**  
**«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ**  
**ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ**  
**Н.Г. ЧЕРНЫШЕВСКОГО»**

Кафедра физики открытых систем

**Разработка и тестирование алгоритмов обнаружения физиологических и патологических паттернов ритмической активности мозга по сигналам локальных потенциалов поля из гиппокампа крыс**

---

наименование темы выпускной квалификационной работы

**АВТОРЕФЕРАТ МАГИСТЕРСКОЙ РАБОТЫ**

Студента 2 курса 2241 группы  
направления 09.04.02 «Информационные системы и технологии»  
профиль подготовки «Искусственный интеллект, математическое моделирование и суперкомпьютерные технологии в разработке информационных систем»

институт физики

Джафарова Анастасия Сергеевна

---

фамилия, имя, отчество

Научный руководитель:  
профессор, д.ф.-м.н., доцент

---

подпись, дата

И.В. Сысоев

Зав. кафедры  
физики открытых систем,  
д.ф.-м.н., профессор

---

подпись, дата

А.А. Короновский

Саратов 2026

**Введение.** Мозг представляет собой сложную многокомпонентную систему, для изучения которой традиционно применяется анализ электрической активности, регистрируемой в виде локальных полевых потенциалов (ЛФП) и электроэнцефалограммы. В силу этических ограничений при работе с человеком в качестве модельного объекта используются млекопитающие, в частности крысы, что позволяет детально исследовать нейронные процессы в гиппокампе — структуре, ответственной за память, пространственную навигацию и эмоциональное поведение. Ключевыми ритмическими паттернами выступают физиологический тета-ритм (4–9 Гц), связанный с когнитивными функциями, и патологические эпилептиформные разряды, характерные для лимбической эпилепсии. Визуальный экспертный анализ многоканальных записей (десятки и сотни часов) является чрезвычайно трудоёмким и субъективным, что обуславливает высокую актуальность автоматизации обнаружения на основе вейвлет-преобразования. Данный метод позволяет проводить частотно-временной анализ, при этом выбор материнского вейвлета определяет точность обнаружения: вейвлет Морле оптимален для тета-ритма, а вейвлет «Мексиканская шляпа» — для эпилептических разрядов.

Целью работы являлась разработка и тестирование алгоритмов автоматизированного обнаружения указанных паттернов в ЛФП гиппокампа крыс. Для этого решались следующие задачи: анализ и предварительная обработка экспериментальных данных, полученных от здоровых крыс и животных с пилокарпин-индуцированной моделью лимбической эпилепсии; формирование эталонных экспертных разметок; программная реализация обнаружения тета-ритма на основе вейвлета Морле и эпилептических разрядов на основе вейвлета «Мексиканская шляпа»; количественная оценка эффективности алгоритмов по метрикам чувствительности и специфичности.

Структура работы соответствует поставленным задачам. Выпускная квалификационная работа состоит из трёх глав. Первая глава носит обзорно-методический характер; в ней изложены теоретические основы непрерывного

вейвлет-преобразования, описаны материнские функции Морле и «Мексиканская шляпа», а также введены статистические метрики оценки качества обнаружения — чувствительность и специфичность. Вторая глава посвящена обнаружению тета-ритма: приведены характеристики экспериментальных данных, процедура их первичной обработки, алгоритм автоматической разметки на основе вейвлета Морле, а также результаты и их статистическая оценка. Третья глава построена аналогичным образом и раскрывает методику обнаружения лимбической эпилепсии с использованием вейвлета «Мексиканская шляпа», включая предобработку записей, алгоритмическую реализацию, количественные результаты и анализ значимости.

Научная новизна исследования заключается в том, что впервые на представительном экспериментальном материале (72 записи общей продолжительностью 145 часов) количественно охарактеризована точность алгоритма на основе вейвлета «Мексиканская шляпа» для выявления эпилептиформных паттернов, а также впервые проведён детальный анализ факторов, снижающих точность обнаружения тета-ритма в условиях высокой зашумлённости. Научная значимость работы состоит в создании и валидации программных инструментов, позволяющих многократно сократить временные затраты на анализ длительных ЛФП-записей, повысить объективность и воспроизводимость обнаружения эпилептических событий при доклиническом тестировании противоэпилептических препаратов.

**Основное содержание работы.** Первая глава работы посвящена теоретическим основам частотно-временного анализа нестационарных нейрофизиологических сигналов. Традиционное преобразование Фурье и его оконный вариант (STFT) не позволяют одновременно локализовать во времени медленные ритмические процессы и короткие импульсные события, что критически важно при анализе локальных полевых потенциалов гиппокампа. Альтернативой служит непрерывное вейвлет-преобразование (CWT), которое оперирует семейством функций, полученных из материнского вейвлета  $\psi(t)$

масштабированием и сдвигом. Выбор конкретной формы материнской функции определяется морфологией целевых компонент сигнала: чем выше сходство вейвлета с искомым паттерном, тем больший отклик достигается при совпадении.

Для выделения квазигармонического тета-ритма (4–9 Гц), представляющего собой продолжительные осцилляции с постепенно меняющейся частотой, использован комплексный вейвлет Морле:

$$\psi_{Morlet}(t) = \pi^{-1/4} e^{i\omega_0 t} e^{-t^2/2}, \quad (2)$$

где  $\omega_0$  — безразмерная центральная частота, обеспечивающая оптимальный баланс временного и частотного разрешения. Благодаря комплексному характеру вейвлета Морле одновременно даёт информацию об амплитуде и мгновенной фазе колебаний, что открывает возможность исследования фазовой синхронизации между отведениями.

Для обнаружения импульсных эпилептиформных разрядов, характеризующихся крутым фронтом нарастания и короткой длительностью, напротив, предпочтительнее вещественный вейвлет «Мексиканская шляпа» — взятая с обратным знаком вторая производная гауссиана:

$$\psi_{MexH}(t) = \frac{2}{\sqrt{3} \pi^{1/4}} (1 - t^2) e^{-t^2/2}. \quad (3)$$

График функции имеет центральный положительный пик, окружённый двумя симметричными отрицательными лепестками, причём площадь под кривой равна нулю. Такая биполярная форма морфологически близка к профилю быстрых разрядов, спайков и острых волн, а равенство нулевого момента эффективно подавляет низкочастотный дрейф изолинии, обеспечивая устойчивость к медленным артефактам.

Объективная оценка качества автоматического обнаружения требует применения формальных статистических метрик; поскольку задача сводится к бинарной классификации (наличие либо отсутствие целевого события), базовым

инструментом служит матрица ошибок, на основе которой рассчитываются два взаимодополняющих показателя — чувствительность и специфичность, чей совместный анализ позволяет охарактеризовать способность алгоритма находить искомые паттерны и одновременно избегать ложных срабатываний на фоновой активности и артефактах. Чувствительность определяется как доля правильно обнаруженных алгоритмом временных интервалов, содержащих целевую активность, относительно общего числа таких интервалов, идентифицированных экспертом. Специфичность вычисляется как доля верно классифицированных интервалов, не содержащих искомую активность, среди всех сегментов, отнесённых экспертом к фоновой категории.

Вторая глава посвящена обнаружению тета-ритма. Исходными данными служили фоновые записи локальных потенциалов гиппокампа, полученные в нейрофизиологическом эксперименте на крысах. Для данного анализа были отобраны фоновые записи ЭЭГ, зарегистрированные через две недели после хирургической имплантации электродов, из общей когорты сформирована выборка из 13 животных до какого-либо фармакологического воздействия. Для каждой крысы выполнена непрерывная 48-часовая запись внутричерепной ЭЭГ от двух отведений гиппокампа — основной структуры генерации тета-ритма.

Алгоритм обнаружения включал предварительный отбор по амплитуде. После нормализации временного ряда проводилась сегментация на основе длительности более 30 секунд и амплитудного порога, равного 1,5 от медианы всего ряда. Это позволяло выделить низкоамплитудные интервалы, достаточные для последующего частотно-временного анализа.

Окончательное выделение эпизодов тета-ритма выполнялось с использованием вейвлет-преобразования, которое обеспечивает анализ локальных частотных характеристик сигнала во времени. В качестве базисной функции был выбран комплексный вейвлет Морле, оптимальный для анализа колебательных процессов, чье аналитическое представление приведено в формуле (1).

где центральная частота  $\omega_0 = 6$ , оптимальное разрешение в диапазоне 4–8 Гц. Каждый сегмент, отобранный на первом этапе, анализировался в неперекрывающихся 20-секундных окнах с вычислением средней мощности коэффициентов. Критериями для выделения тета-ритма являлись: пик максимальной мощности в диапазоне 4–8 Гц, устойчивость колебаний и превышение порога средней мощности 0,1. Решение о наличии ритма принималось при выполнении всех трёх условий не менее чем в трёх окнах.

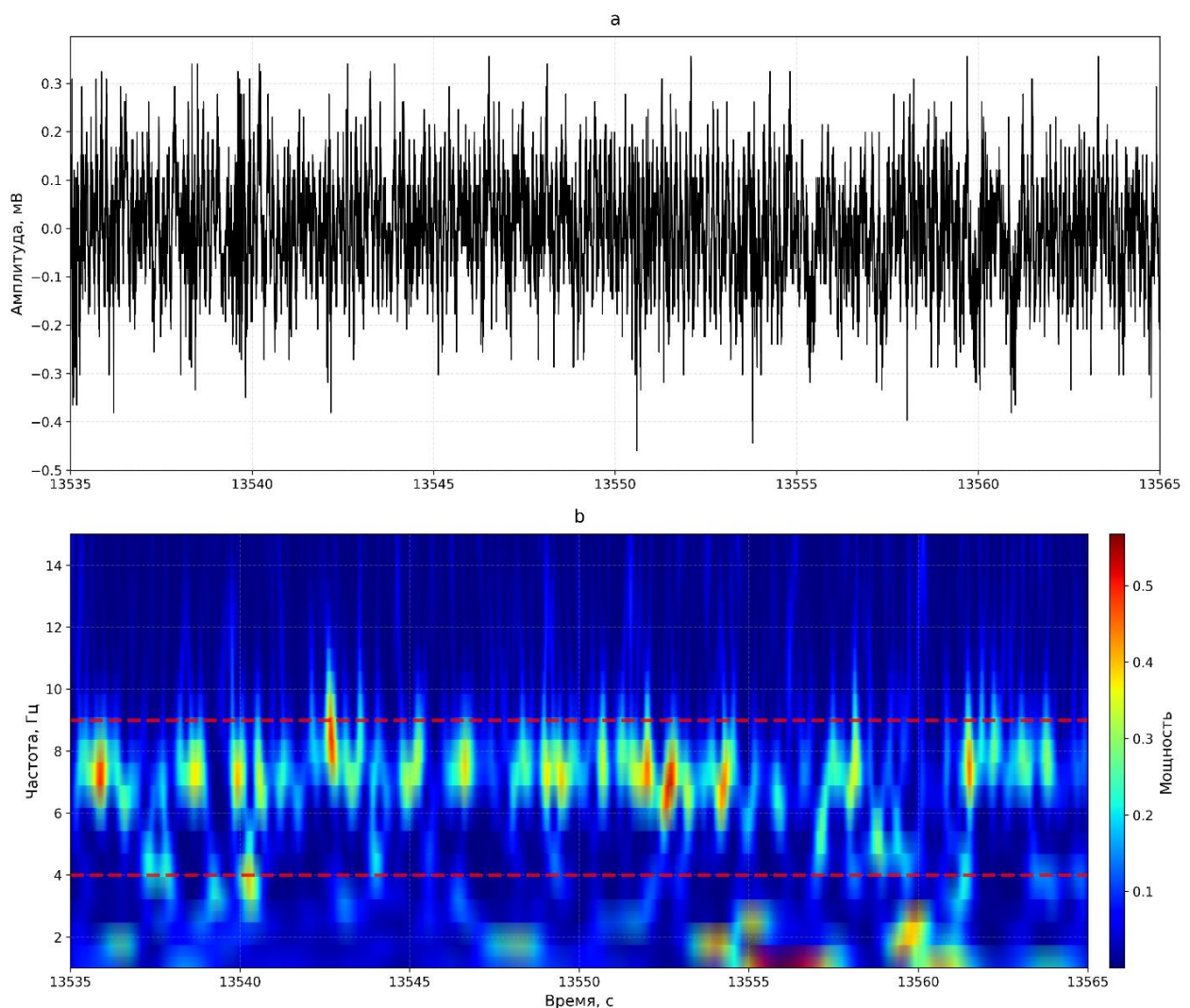


Рис. 1 – Сигнал правого гиппокампа. а - временной ряд, б - вейвлет спектрограмма сигнала.

На рисунке 1 проиллюстрирован пример применения вейвлет анализа к фрагменту реальной записи локальных полевых потенциалов гиппокампа.

Представлены исходный сигнал и соответствующая ему вейвлет-скалограмма. Пунктирными линиями выделены диапазон частот тета ритма. Как видно из рисунка, области повышенной мощности в целевом частотном диапазоне 4–9 Гц на скалограмме хорошо соответствуют эпизодам искомой активности.

Для алгоритма обнаружения тета-ритма на основе вейвлета Морле по данным 13 экспериментальных животных средняя чувствительность составила 83,8%, специфичность — 86,4%, что подтверждает пригодность метода для автоматизированного анализа. Итоговые результаты представлены в таблице 1.

Результаты исследования опубликованы в работах [A1, A2].

Таблица 1. Значения чувствительности и специфичности алгоритма обнаружения тета-ритма.

Номер животного	Чувствительность, %		Специфичность, %	
	HipL	HipR	HipL	HipR
1	70,9	67,2	95,1	96,6
2	91,3	84,8	92,9	92,7
3	88,8	91,1	98,6	95,6
4	97,0	96,7	91,9	92,0
5	96,1	95,1	96,1	95,6
6	87,7	86,2	93,4	91,1
7	52,5	79,3	77,5	88,9
8	63,3	17,7	51,4	50,0
9	75,3	90,4	92,4	96,6
10	94,9	96,2	92,5	87,8
11	95,8	92,4	92,0	91,3
12	95,4	91,6	91,8	93,0
13	81,7	66,7	72,8	91,8
Среднее	85,1	82,5	85,4	87,4

Третья глава посвящена алгоритму обнаружения лимбической эпилепсии. В качестве модели использованы крысы линии Wistar с пилокарпин-индуцированной лимбической эпилепсией. Проанализированы 72 многоканальные записи локальных полевых потенциалов (LFP) общей продолжительностью 145 часов (частота дискретизации 1000 Гц), полученные от 8 животных. Эпилептические приступы зарегистрированы лишь в трети случаев.

Сигналы подвергались полосовой фильтрации (0,5–100 Гц) и нормировке амплитуд. Для исключения артефактов применялся анализ квартилей: границами служили 5-й и 95-й процентиля. Участки с амплитудой ниже 5-го или выше 95-го процентиля отбраковывались. Для каждой записи индивидуально подбиралось амплитудное пороговое значение (удвоенная медиана сигнала) для предварительного выделения участков с предположительной эпилептической активностью.

На следующем этапе использовалось непрерывное вейвлет-преобразование с материнским вейвлетом «мексиканская шляпа», на основе формулы (2). Анализировались масштабы 1–30, где лимбическая активность проявляется наиболее часто. Поиск всплесков с высокой мощностью и регулярной структурой позволял автоматически выделять начало и конец.

На рисунке 2 представлен пример применения разработанного алгоритма к фрагменту записи, содержащему эпилептический разряд. На вейвлет-скалограмме отчетливо видна компактная область высокой мощности в диапазоне масштабов 1–30, совпадающая по времени с эпилептическим событием. Пунктирными вертикальными полосами отмечены определенные алгоритмом начало и конец события на фрагменте исходного сигнала.

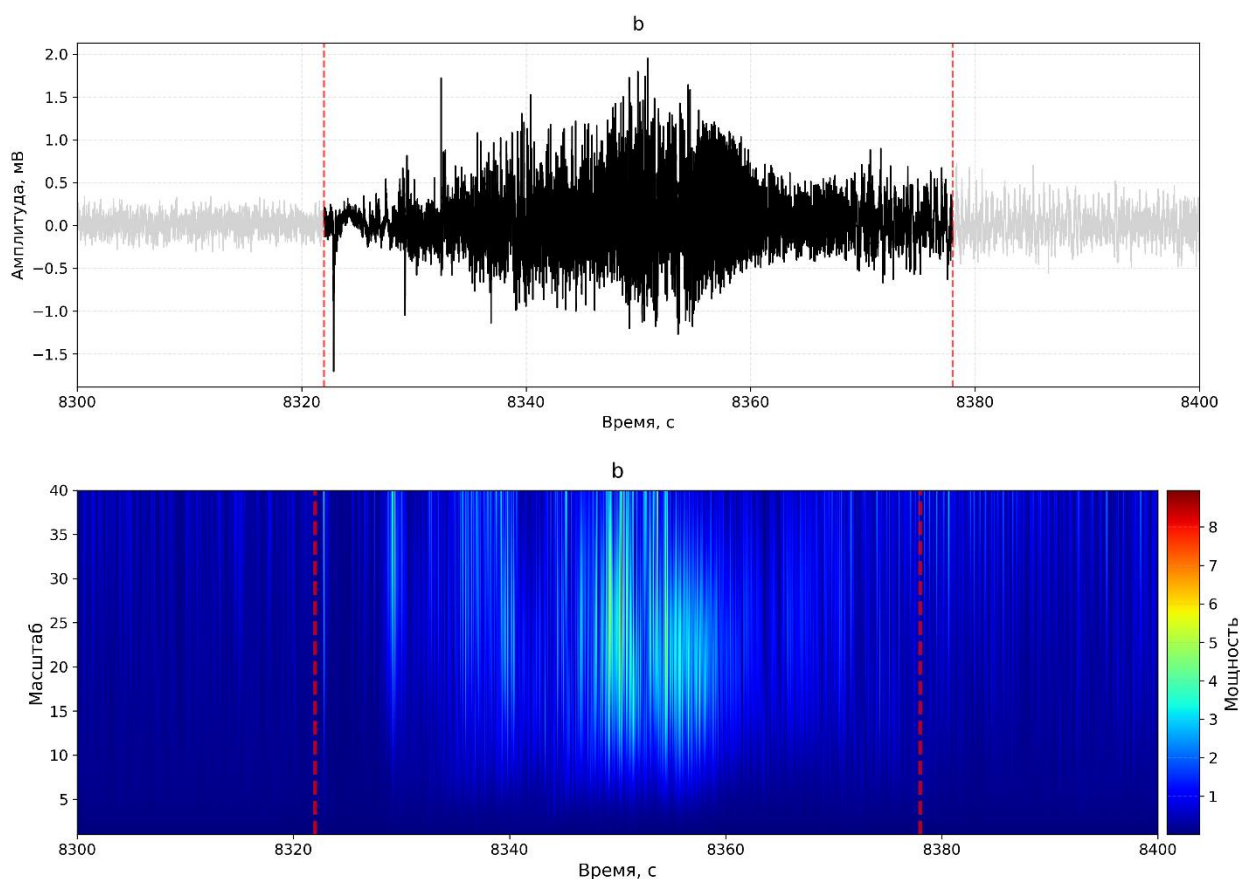


Рис. 2 - Сигнал левого гиппокампа, а - временной ряд. b - вейвлет спектрограмма, пунктирными линиями выделены границы лимбической активности.

Для алгоритма обнаружения лимбической эпилепсии на основе вейвлета «Мексиканская шляпа» результаты представлены в таблице 2 и составили в среднем 95% чувствительности и 67% специфичности. При этом значения по отведениям оказались сниженными, особенно специфичность (например, у животного 1 из-за артефактов). Наименьшие показатели наблюдались в правом гиппокампе, что объясняется сложной пространственно-временной организацией эпилептической активности и эффектом объёмного проведения. Наиболее чётко эпилепсия регистрировалась в левом гиппокампе и лобной доле коры правого полушария.

Результаты исследования опубликованы в работах [А3- А8].

Таблица 2. Значения чувствительности и специфичности алгоритма обнаружения лимбической эпилепсии

Номер животного	Чувствительность, %		Специфичность, %	
	HipL	HipR	HipL	HipR
1	88,9	83,3	52,2	11,7
2	91,7	83,3	64,2	63,9
3	100,0	100,0	32,5	70,0
4	100,0	100,0	83,3	83,3
5	100,0	100,0	100,0	100,0
Среднее	96,12	93,32	66,44	65,78

**Заключение.** Решена актуальная задача разработки и тестирования алгоритмов автоматизированного обнаружения физиологического тета-ритма и патологических эпилептических разрядов по сигналам локальных полей гиппокампа крыс. Для обнаружения тета-ритма (4–9 Гц) использовано непрерывное вейвлет-преобразование с материнской функцией Морле. На фоновых записях от 13 крыс (48 часов) алгоритм показал среднюю чувствительность 83,8% и специфичность 86,4%, что подтверждает его пригодность для автоматизированного анализа. Выявлено снижение качества обнаружения при высоком уровне артефактов, что указывает на необходимость тщательной предобработки сигналов.

Для выявления эпилептических разрядов в пилокарпин-индуцированной модели лимбической эпилепсии разработан алгоритм на основе вейвлета «Мексиканская шляпа». На 72 записях от 8 животных (около 145 часов) средняя чувствительность составила 95%, специфичность — 67%. Низкая специфичность обусловлена ложноположительными срабатываниями на артефактах и фоновой активности, что требует последующей экспертной верификации. Вариабельность специфичности по отведениям связана с

локализацией эпилептогенного очага.

Вейвлет-преобразование является эффективным инструментом автоматизации анализа локальных полевых потенциалов. Разработанные алгоритмы многократно сокращают время обработки длительных записей и обеспечивают объективную количественную оценку. Они рекомендуются для предварительного скрининга данных в нейрофизиологических лабораториях, особенно при длительном мониторинге и оценке фармакологических препаратов. Перспективно дальнейшее развитие методов с интеграцией машинного обучения для повышения специфичности.

### **Список работ по теме диссертации**

А1. Джафарова А. С. детектирование тета-ритма в гиппокампе одного из полушарий мозга по сигналам локальных потенциалов крыс с использованием вейвлет-преобразования/ А. С. Джафарова, А. А. Грищенко, Е. М. Сулейманова, М. В. Корнилов // Молодёжная петербургская школа-конференция инженеров-педагогов: сборник материалов научной конференции. – Санкт-Петербург, 2026. – С. 23–25.

А2. Грищенко А.А., Джафарова А.С., Долинина А.Ю., Сулейманова Е.М., Сысоев И.В. Алгоритм автоматической разметки тета-ритмов с использованием вейвлет-преобразования Морле // Информационные технологии и технические средства управления (ICST-2025) : материалы IX Международной научной конференции, Гомель, 07–11 октября 2025 г. – Москва : Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2025. – С. 27–29.

А3. Джафарова А. С. Автоматизированный подход к анализу паттернов при лимбической эпилепсии у крыс / А. С. Джафарова, А. А. Грищенко, Е. М. Сулейманова, М. В. Корнилов // Информационные технологии и технические средства управления (ICST-2025) : материалы IX Международной научной конференции. – Москва, 2025. – С. 42–43.

А4. Джафарова А. С. Алгоритм автоматической разметки приступов у крыс-

моделей лимбической эпилепсии под воздействием пилокарпина / А. С. Джафарова, А. А. Грищенко, Е. М. Сулейманова // Прикладная математика и информатика: современные исследования в области естественных и технических наук : сборник материалов XI Международной научно-практической конференции (школы-семинара) молодых ученых. – Тольятти, 2025. – С. 251–254.

А5. Джафарова А. С. Вейвлет-анализ для классификации двух типов разрядов у крыс-моделей лимбической эпилепсии / А. С. Джафарова, А. А. Грищенко, Е. М. Сулейманова, М. В. Корнилов // Молодёжная петербургская школа-конференция инженеров-педагогов: сборник материалов научной конференции. – Санкт-Петербург, 2025. – С. 22–24.

А6. Джафарова А. С. Автоматическое обнаружение длительных лимбических разрядов лимбической эпилепсии в записях электроэнцефалограммы / А. С. Джафарова, А. А. Грищенко, Е. М. Сулейманова, Л. В. Виноградова, М. В. Корнилов, И. В. Сысоев // Сборник тезисов 28-й Пущинской школы-конференции молодых ученых с международным участием «Биология – наука XXI века». – Пущино, 2025. – С. 587–588.

А7. Грищенко А. А. Анализ связанности разных полушарий мозга у крыс-моделей эпилепсии / А. А. Грищенко, А. С. Джафарова, Е. М. Сулейманова, М. В. Корнилов // Молодёжная петербургская школа-конференция инженеров-педагогов : сборник материалов научной конференции. – Санкт-Петербург, 2025. – С. 18–19.

А8. Grishchenko A. A. Nonlinear analysis of interhemispheric connectivity in the pentylenetetrazol rat model of spike-wave discharges / A. A. Grishchenko, A. S. Dzhafarova, E. M. Suleymanova, M. V. Sysoeva, I. V. Sysoev // Cybernetics and Physics. – 2025. – Vol. 14, № 2. – P. 116–126.