

На правах рукописи



Кириленко Николай Евгеньевич

**МЕТОД ЧАСТОТНО-ВРЕМЕННОЙ ЛОКАЛИЗАЦИИ
АПРИОРНО НЕОПРЕДЕЛЕННЫХ ПАТТЕРНОВ В СОСТАВЕ
ЗАШУМЛЕННЫХ СИГНАЛОВ НЕЙРОКОМПЬЮТЕРНОГО ИНТЕРФЕЙСА**

Специальность: 2.3.1. Системный анализ, управление и обработка
информации, статистика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Таганрог – 2025

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Южный федеральный университет» в научно-исследовательском технологическом центре нейротехнологий.

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент
Щербань Игорь Васильевич,
ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет» (ЮФУ),
ведущий научный сотрудник Научно-исследовательского
технологического центра нейротехнологий
(г. Ростов-на-Дону)

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Щербаков Максим Владимирович,
ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный
технический университет» (ВолГТУ), заведующий
кафедрой «Системы автоматизированного
проектирования и поискового конструирования»
(г. Волгоград)

кандидат технических наук, доцент
Головской Василий Андреевич,
ФГКВОУ ВО «Краснодарское высшее военное орденов Жу-
кова и Октябрьской Революции Краснознаменное училище
имени генерала армии С.М. Штеменко»,
начальник кафедры защиты информации от
несанкционированного доступа (г. Краснодар)

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный
университет» (ЮЗГУ, г. Курск)


Защита диссертации состоится «26» июня 2025 г. в 11:00 на заседании объединенного со-
вета по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой
степени доктора наук 99.2.107.02 на базе ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет» и
ФГБОУ ВО «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени
М.И. Платова» по адресу: 347922, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44, корп. «Г», ауд. Г-439.

С диссертацией можно ознакомиться в зональной научной библиотеке ЮФУ по адресу:
344103, г. Ростов-на-Дону, ул. Зорге, 21Ж, а также на библиотечном портале ЮФУ:
<https://hub.sfedu.ru/diss/show/1338087/>.

Отзыв на автореферат, заверенный гербовой печатью организации, просим направлять
ученому секретарю объединенного диссертационного совета 99.2.107.02 по адресу:
347922, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2025 г.

Ученый секретарь
объединенного диссертационного
совета 99.2.107.02,
доктор технических наук, доцент



Н. Е. Сергеев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования и степень её разработанности. Технология интерфейсов «мозг-компьютер» (ИМК), обеспечивающая взаимодействие через невербальные и мышечные каналы управления, сегодня активно находит свое применение не только в научных исследованиях и медицинской практике, но также и в игровых технологиях, управлении робототехникой, а также в разработке систем нейрорегуляции для космических задач. Подобные с системы нейрокоммуникации эффективны даже при тяжелых двигательных расстройствах, вызванных нейродегенеративными заболеваниями или травмами спинного мозга, открывая возможности для адаптивного взаимодействия с внешними устройствами в условиях ограниченной мобильности пользователя. Неинвазивный способ реализации каналов нейрокоммуникации на основе интерпретации сигналов электроэнцефалограммы (ЭЭГ) обеспечивает связь с внешним миром парализованных или обездвиженных пациентов. Подобные ИМК могут обеспечить управление внешними устройствами в реальном масштабе времени. Важным преимуществом ИМК является то, что исчерпывающих знаний о механизмах обработки моторной и когнитивной информации популяциями нейронов и мозгом в целом не требуется, а достаточным является лишь определение корреляций между нейрональной активностью и намерением человека реализовать соответствующее движение.

Несмотря на то, что ИМК активно разрабатывается на протяжении ряда последних лет, проблема обеспечения требуемой его эффективности все еще является актуальной. В первую очередь, для надежной классификации команд нейрорегуляции необходимо существенное повышение точности детектирования и идентификации паттернов ЭЭГ. Точная локализация по оси времени границ паттернов невербальной и мышечной коммуникации человека предопределяет правильность идентификации и точность классификации команд нейрорегуляции. Высокоточная классификация паттернов, в итоге, обуславливает требуемую эффективность ИМК. Под паттерном при этом понимается уникальная биоэлектрическая активность головного мозга, сопряженная с произвольной двигательной или идеомоторной деятельностью человека, отражаемая в соответствующей совокупности пространственных, временных и частотных характеристик сигналов ЭЭГ. Сигналы ЭЭГ представляют собой многомерную последовательность многократных измерений биоэлектрической активности мозга человека в одноименные моменты времени на большом количестве электродных пар. На каждой электродной паре измеряется напряжение между определенной областью головного мозга и референтным электродом. Разность потенциалов между электродными парами отражает динамику изменения биоэлектрической активности различных пространственных областей головного мозга.

Для детектирования и идентификации паттернов в составе сигналов ЭЭГ широко используются статистические, вероятностные методы, методы теории оптимального оценивания и идентификации, теории информации. Наиболее значимый вклад в развитие инструментария поиска пространственных и временных паттернов в составе зашумленных многомерных сигналов внесли такие ученые, как Нажесткин И. А., Кутепов И. Е., Дик О. Е., Huang Q., Runnova A., Camaioni M., Varadits M., Dehais F. и другие. В работах Лебедева

Н. Н., Суворова А. В., Брагина А. Д., Cao L, Cheng N., Nakanishi M., Camaioni M. развиты методы, построенные на основе теории оптимального оценивания и идентификации.

Весомый вклад в развитие методов локализации ЭЭГ-паттернов на основе перехода в частотно-временной континуум посредством использования преобразования Фурье внесли Woo S., Chen K., Rashid N., Tajadini B. Методы поиска структурных особенностей в составе многомерных сигналов, где переход в частотно-временную форму осуществляется посредством непрерывного или дискретного вейвлет-преобразования, развиты в работах Li M. A., Han J. F., Gupta V., Zeng W., Saday A., Khan K. A., а также других ученых.

Тем не менее, нерешенность на сегодняшний день проблемы высокоточной классификации ЭЭГ паттернов команд нейроуправления в ИМК объясняется следующим. Свойства биоэлектрических паттернов определяются текущим психофизиологическим состоянием человека, а также тем, к какому типу движения ведётся подготовка – реальному или мысленному, произвольному или баллистическому (спонтанному). Поэтому их энергетические спектры изменчивы во времени и априорно неизвестны. Кроме того, модальные частоты различных ритмов мозга могут демонстрировать весьма высокую вариативность и изменчивость, в том числе, в связи с развитием эффектов утомления человека или монотонии. Это обуславливает непредсказуемую вариативность во времени частотных границ паттернов. Также следует учитывать, что высокая зашумленность сигналов ЭЭГ не только шумами электронных трактов измерительной и регистрирующей аппаратуры, но и шумами, связанными с принципиально неизвестными исследователю физическими, а, в ряде случаев, и физиологическими процессами, обуславливает так называемые артефакты – паттерны спонтанной активности мозга, частотные спектры которых могут быть близкими к спектрам искомым паттернов. Также важным фактором является то, что паттерн характеризуется частотно-пространственно-временными параметрами, и в ряде случаев, не может быть точно представлен в виде характерной осцилляции или набора осцилляций, а определяется как характерное структурное изменение многомерной ЭЭГ.

Соответственно, реализация новых методов и средств, обеспечивающих высокую точность классификации команд нейроуправления в составе многомерных сигналов ЭЭГ ИМК, является **важной и актуальной задачей**. В работе рассмотрен новый метод решения этой задачи, основанный на точном определении частотно-временных границ паттернов биоэлектрической активности мозга человека. Вследствие априорной неопределенности границ паттернов мысленных команд управления – выборки для их классификации содержат, в том числе, неинформативную фоновую активность. Неинформативная фоновая активность, которая содержится в выборках примеров для алгоритмов классификации, не имеет отношения к командам нейроуправления, что снижает точность классификации алгоритмов машинного обучения. Соответственно, решение задачи частотно-временной локализации паттернов команд нейроуправления, для формирования репрезентативной выборки, позволит повысить точность классификации.

Объектом исследования диссертационной работы являются зашумленные многомерные сигналы электроэнцефалограммы мозга человека, связанные с технологией нейроуправления в интерфейсе «мозг-компьютер».

Предметом исследования являются методы и алгоритмы частотно-временной локализации априорно неопределенных паттернов биоэлектрической активности мозга человека в составе зашумленных сигналов многомерных ЭЭГ, отражающих реализацию человеком команд нейроуправления.

Цель работы заключается в повышении точности классификации команд нейроуправления нейрокомпьютерного интерфейса на основе решения задачи определения частотных и временных границ паттернов в составе многомерных сигналов ЭЭГ.

В рамках диссертационной работы для реализации поставленной цели необходимо решить следующие **основные задачи**:

1. провести системный анализ методов поиска и идентификации априорно неопределенных структур неизвестных временных флуктуаций частотных осцилляторов разной интенсивности в составе зашумленных многомерных временных последовательностей;
2. разработать критерии оптимальности для поиска границ энергетического частотного спектра паттерна биоэлектрической активности, в условиях его маскирования шумами различной природы, с близкими или частично совпадающими энергетическими спектрами;
3. разработать и исследовать новые алгоритмы поиска временных границ ЭЭГ паттернов биоэлектрической активности мозга человека с априорно неизвестными параметрами;
4. разработать новый метод частотно-временной локализации априорно неопределенных паттернов в составе зашумленных сигналов нейрокомпьютерного интерфейса, включающий в себя разработанные алгоритмы и критерии оптимальности;
5. провести экспериментальную апробацию разработанного метода частотно-временной локализации паттернов команд нейроуправления в составе многомерных сигналов ЭЭГ, обосновать решение задачи повышения точности их классификации в ИМК.

Диссертационная работа направлена на разработку новых методов и средств определения частотных и временных границ априорно неизвестных паттернов биоэлектрической активности мозга человека в составе сигналов многомерных ЭЭГ и, таким образом, повышения точности классификации команд нейроуправления в составе нейрокомпьютерного интерфейса.

Научной новизной обладают следующие результаты работы:

- 1) **предложен метод частотно-временной локализации априорно неопределенных паттернов в составе зашумленных сигналов нейрокомпьютерного интерфейса**, отличающийся от известных методов тем, что обладает свойством робастности к неизвестной вариативности текущего функционального состояния человека и к типу подготавливаемого человеком движения – реальному или мысленному, произвольному или баллистическому (п. 4 паспорта специальности, стр. 43–49 диссертации);

2) предложены новые критерии оптимальности для поиска границ энергетического частотного спектра паттерна биоэлектрической активности, рассчитываемого для трансформант непрерывного вейвлет преобразования и трансформант преобразования Фурье сигнала ЭЭГ, отличающиеся от имеющихся тем, что применимы в условиях маскирования паттерна шумами с близкими или частично совпадающими энергетическими спектрами (п. 3 паспорта специальности, стр. 52–57 диссертации);

3) разработаны алгоритмы для нейрокомпьютерного интерфейса, отличающиеся от имеющихся тем, что реализуют разработанный (п. 5 паспорта специальности, стр. 59–77 диссертации).

Новые результаты, полученные в ходе выполнения диссертационного исследования, соответствуют паспорту научной специальности 2.3.1 «Системный анализ, управление и обработка информации, статистика».

Теоретическая значимость работы заключается в развитии теории цифровой обработки зашумленных сигналов, разработке нового метода частотно-временной локализации паттернов в составе многомерных зашумленных сигналов, синтезе новых критериев оптимального поиска границ локального частотного диапазона структурных особенностей в составе зашумленных сигналов, разработке новых алгоритмов.

Практическая значимость результатов работы заключается в разработке программно-алгоритмического обеспечения, реализующего новый метод частотно-временной локализации ЭЭГ-паттернов биоэлектрической активности мозга человека, повышении точности классификации команд нейроуправления в ИМК.

Методы исследования и достоверность полученных результатов. Основные результаты диссертационной работы базируются на положениях теории алгоритмов, теории оптимального оценивания, теории информации и математической статистики и прошли экспериментальную проверку с применением технологий объектно-ориентированного программирования в LabVIEW, Statistica, MATLAB, Python.

Положения, выносимые на защиту:

1. предложенный в работе новый метод частотно-временной локализации априорно неопределенных паттернов в составе зашумленных сигналов нейрокомпьютерного интерфейса, позволяющий повысить точность классификации команд нейроуправления в компьютерном интерфейсе (пункт 4 паспорта специальности 2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации, статистика);

2. предложенные новые критерии оптимального поиска границ локального частотного диапазона, максимально соответствующего частотному диапазону искомого паттерна биоэлектрической активности мозга человека, позволяющий определять временные границы паттернов команд нейроуправления (пункт 3 паспорта специальности 2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации, статистика);

3. разработанное алгоритмическое и программное обеспечение для нейрокомпьютерного интерфейса, позволяющее повысить точность классификации команд нейроуправления в компьютерном интерфейсе (пункт 5 паспорта специальности 2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации, статистика);

Достоверность и обоснованность полученных теоретических и практических результатов обеспечивается из корректного использования и непротиворечивостью фундаментальным положениям теории алгоритмов, теории оптимального оценивания, математического аппарата теории информации, непротиворечивостью полученных результатов к общепринятым подходам анализа сигналов и теории оптимального оценивания, подтверждением теоретических выводов и предположений, полученными результатами имитационного моделирования.

Реализация и внедрение результатов работы. Результаты диссертационной работы реализованы при непосредственном участии автора в научно-исследовательских работах: по гранту Российского Научного Фонда N20-19-00627 на тему "Разработка стимул-независимой модели интерфейса "Мозг-компьютер" для реабилитации людей с ограниченными возможностями", 2020-2022 г.; по проекту в интересах развития кооперации российских высших учебных заведений и организаций, реализующих комплексные проекты по созданию высокотехнологичного производства, на тему "Создание программного комплекса для управления человеческим капиталом на основе нейротехнологий для предприятий высокотехнологичного сектора Российской Федерации", Постановление Правительства РФ N218.

Апробация работы. Научные результаты полученные в рамках диссертационной работы и основные положения были представлены следующих научно-технических конференциях: XVIII международной научно-практической конференции «Приоритетные направления развития науки и технологий», 16.10.2020, г. Тула; X международной научно-практической конференции «ИНФОКОМ», 16-18 мая 2017 г. Ростов-на-Дону; XII международной научно-практической конференции «ИНФОКОМ», 29-30 апреля 2019, г. Ростов-на-Дону; 17 Международной молодежной научно-практической конференции «Фундаментальные исследования, методы и алгоритмы прикладной математики в технике, медицине и экономике», 6-7 сентября 2018, г. Новочеркасск; международной научно-практической конференции «Концепции фундаментальных и прикладных научных исследований», 9.12.2017 г., г. Уфа; международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы науки на современном этапе развития», 18 ноября 2015 г., г. Екатеринбург.

Исследования были направлены на оценку качества, работоспособности, а также на универсальность и практическую применимость разработанных критериев оптимального выбора, методов и методик частотно-временной локализации паттернов в составе зашумленных сигналов.

Публикации. Основное содержание диссертации отражено в 22 публикациях, включая: 4 статьи в научных журналах, входящих в перечень ВАК РФ рецензируемых научных изданий, соответствующих требованиям к публикациям основных результатов кандидатских диссертаций на соискание учёной степени кандидата наук (в том числе с квартилем K1); 1 публикация в зарубежном издании, входящем в международную реферативную базу данных и систему цитирования *Scopus* (с квартилем Q2); 1 монография; 6

публикаций в сборниках трудов конференций, в том числе зарубежных и международных; 6 свидетельств о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Личный вклад соискателя заключается в постановке задачи исследования, проведении численных исследований, результатов натуральных экспериментов, обобщении полученных результатов, в разработке метода частотно-временной локализации паттернов в составе ЭЭГ, в разработке алгоритмов, в разработке программного обеспечения, реализующего разработанный метод.

Структура и краткое содержание диссертации по главам. Структура диссертации включает введение, четыре главы, заключение и приложения. Объем работы составляет 129 страницы, которые содержат 31 рисунок, 3 таблицы и 3 приложения. Список литературы содержит 126 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность исследований, представленных в диссертационной работе, изложены цель диссертационной работы. Также во введении перечислены основные задачи исследований, научная новизна и практическая значимость полученных результатов, отмечены основные положения, выносимые на защиту.

Первая глава диссертационной работы посвящена системному анализу методов поиска и локализации паттернов различной интенсивности с априорно неизвестными параметрами в зашумленных многомерных временных последовательностях ЭЭГ, используемых в нейроинтерфейсах. В рамках исследования рассмотрено, как современный математический аппарат на основе оконного преобразования Фурье, пространственной фильтрации осциллирующих компонентов, а также дискретного или непрерывного вейвлет-преобразований обеспечивает переход от временного представления многомерных данных к частотно-временному. Это позволяет осуществлять поиск паттернов с применением критериальных функций.

Продемонстрированы примеры эффективного использования классических подходов для автоматизированного обнаружения специфических паттернов, ассоциированных с эпилептическими очагами головного мозга. Рассмотрены исследования, в которых энергия сигнала ЭЭГ применяется для оценки синхронизации/десинхронизации с целью выделения паттернов, используемых в качестве управляющих команд в интерфейсах «мозг-компьютер» (ИМК). Однако установлено, что особенности визуализации ЭЭГ-паттернов ограничивают возможности традиционных методов их автоматического обнаружения.

Вариативность искомых ЭЭГ-паттернов и априорная неопределенность их параметров обуславливают необходимость разработки адаптивных подходов для автоматизированного детектирования управляющих команд ИМК, извлекаемых из спонтанной активности ЭЭГ. При этом задачи, связанные с детектированием, интерпретацией и классификацией специфических ЭЭГ-паттернов, сопровождающих произвольную двигательную и идеомоторную активность, остаются нерешенными. В заключении к первой главе

обосновано, что достижение требуемого качества нейрокомпьютерного интерфейса возможно при реализации метода, основанного на локализации по оси времени ЭЭГ-паттернов биоэлектрической активности мозга человека

Вторая глава диссертации посвящена разработке метода частотно-временной локализации паттернов на основе вейвлет-энтропии с применением непрерывного вейвлет-преобразования, а также разработке критерия оптимального выбора диапазона масштабов базисной вейвлет-функции.

Выполнена математическая формализация задачи частотно-временной локализации в составе нейроинтерфейсов специфических априорно неизвестных многомерных ЭЭГ-паттернов, отражающих реализацию человеком речевой или двигательной активности. Регистрируемая в одноименные моменты времени $t \in [t_0; T]$ на J сенсорах многомерная ЭЭГ имеет вид многомерной временной функции результатов многократной последовательности измерений $X(t) = (x_1(t) \ x_2(t) \ \dots x_j(t) \ \dots \ x_J(t))^T$, где T – знак транспонирования; J – количество сенсоров, $j=1, 2, \dots, J$ – номер сенсора, t_0 – начальный момент времени наблюдений. Вследствие дискретности процедуры измерений ЭЭГ $X(t)$ на интервале времени наблюдений T с постоянным шагом по времени Δt и, соответственно, частотой дискретизации $f_{\Delta} = 1/\Delta t$, далее рассматривается конечная многомерная последовательность результатов многократных измерений

$$\{\bar{X}\}_{k=1}^K = \left(\{x_{1,k}\}_{k=1}^K, \{x_{2,k}\}_{k=1}^K, \dots, \{x_{j,k}\}_{k=1}^K, \dots, \{x_{J,k}\}_{k=1}^K \right)^T, \text{ где } k - \text{ номер отсчета } k = 1, 2, \dots, K;$$

$$\{x_{j,k}\}_{k=1}^K - j\text{-я компонента многомерной ЭЭГ.}$$

Согласно концепции применения традиционных методов с использованием спектральной энтропии и вейвлет-энтропии на основе дискретного вейвлет-преобразования (ДВП), критериальная функция для выбора границ паттерна вычисляется в скользящем временном окне $l=1, 2, \dots, L$, минимум которой свидетельствует о наличии наибольшей неравномерности спектральной плотности мощности (СПМ). Также концепция предполагает, что возникновение паттерна соответствует формированию нерегулярных составляющих в исследуемом сигнале, и, следовательно, равномерность СПМ понижается. Во второй главе показано, что традиционный способ перехода к частотно-временному представлению сигнала на основе ДВП в решаемой задаче неэффективен в силу того, что не позволяет получить достаточно высокое частотное разрешение. Избыточность непрерывного вейвлет-преобразования (НВП), связанная с непрерывным изменением параметров масштаба a и сдвига b базисной-вейвлет-функции, позволяет в решаемой задаче достичь требуемой точности представления трансформант НВП. При этом стоит отметить, что параметр a – масштаб базисного вейвлета на временной оси — обратно пропорционален центральной частоте используемого вейвлета. Параметр b в данном случае является параметром сдвига базисной функции по временной оси, и по сути, представляет собой шаг по времени, который в случае используемого НВП соответствует шагу дискретизации

$\Delta t = 1/f_d$. В исследовании в качестве базисной функции использовался вейвлет Добеши 14 (db14).

Сформулирована критериальная функция и критерий оптимальности для поиска локального диапазона масштабов (частот) базисной вейвлет-функции $[a^{\min}; a^{\max}]$, соответствующего частотному диапазону искомого паттерна.

При соблюдении условия о возможности последующего восстановления сигнала из его трансформант проводится дискретизация параметров $a = a_\alpha, b = b_\beta$, где $\alpha = 0, 1, \dots, (N_\alpha - 1)$, $\beta = 0, 1, \dots, (N_\beta - 1)$, N_α, N_β – диапазоны дискретизации, и вместо интегрального вейвлет-преобразования далее используется его оценка $W(a_\alpha, b_\beta)$, вычисляемая на дискретном множестве значений аргументов масштаба a_α и сдвига b_β для конечной последовательности измерений ЭЭГ $\{x_k\}_{k=1}^N$.

Согласно разработанной критериальной функции, используется дискретная оценка локального спектра энергии $E_l^{CWT}(a_\alpha, b_\beta) = |W_l(a_\alpha, b_\beta)|^2$, отражающая распределение энергии $\{x_k\}_{k=1}^N$, которая рассчитывается по дискретным параметрам "масштаб-время" в скользящем временном окне $l=1, 2, \dots, L$.

Критерий оптимального выбора локального диапазона масштабов $[\hat{a}^{\min}; \hat{a}^{\max}]$ базисной вейвлет-функции имеет вид

$$\min_{a_\alpha} \{h^{CWT}(a_\alpha)\}, \quad h^{CWT}(a_\alpha) = -\sum_{l=1}^L \tilde{p}_l(a_\alpha) \log_2(\tilde{p}_l(a_\alpha)), \quad a_\alpha \in [a^{\min}; a^{\max}],$$

где $\tilde{p}_l(a_\alpha) = E_l^{CWT}(a_\alpha, b_\beta) / \bar{e}(a_\alpha)$ – вероятности распределений вейвлет-энергий для каждого масштаба в отдельности; $\bar{e}(a_\alpha) = \sum_{l=0}^L E_l^{CWT}(a_\alpha, b_\beta)$ – полная вейвлет-энергия на всем временном интервале наблюдений $\{x_k\}_{k=1}^N$ для каждого из масштабов. Схема вычисления критериальной функции $h^{CWT}(a_\alpha)$, используемой при поиске оптимального локального диапазона масштабов базисной вейвлет-функции, представлен на рисунке 1.

Согласно рисунку 1, предложенная критериальная функция вычисляется во всем диапазоне масштабов (частот) $[a^{\min}; a^{\max}]$, после чего, в качестве локального диапазона масштабов $[\hat{a}^{\min}; \hat{a}^{\max}]$ выбираются окрестности минимума $\min_{a_\alpha} \{h^{CWT}(a_\alpha)\}$. Физический смысл критериальной функции заключается в том, что она отражает неравномерность отдельных спектральных составляющих исследуемого сигнала на оси времени. Минимальное значение критериальной функции соответствует тем спектральным коэффициентам, которые обладали наибольшей неравномерностью во времени. Возникновение паттерна

сопровождается изменением структуры исследуемого сигнала, а следовательно, и спектральных составляющих, исходя из этого предложена критериальная функция отражающая неравномерность спектральных составляющих на оси времени.

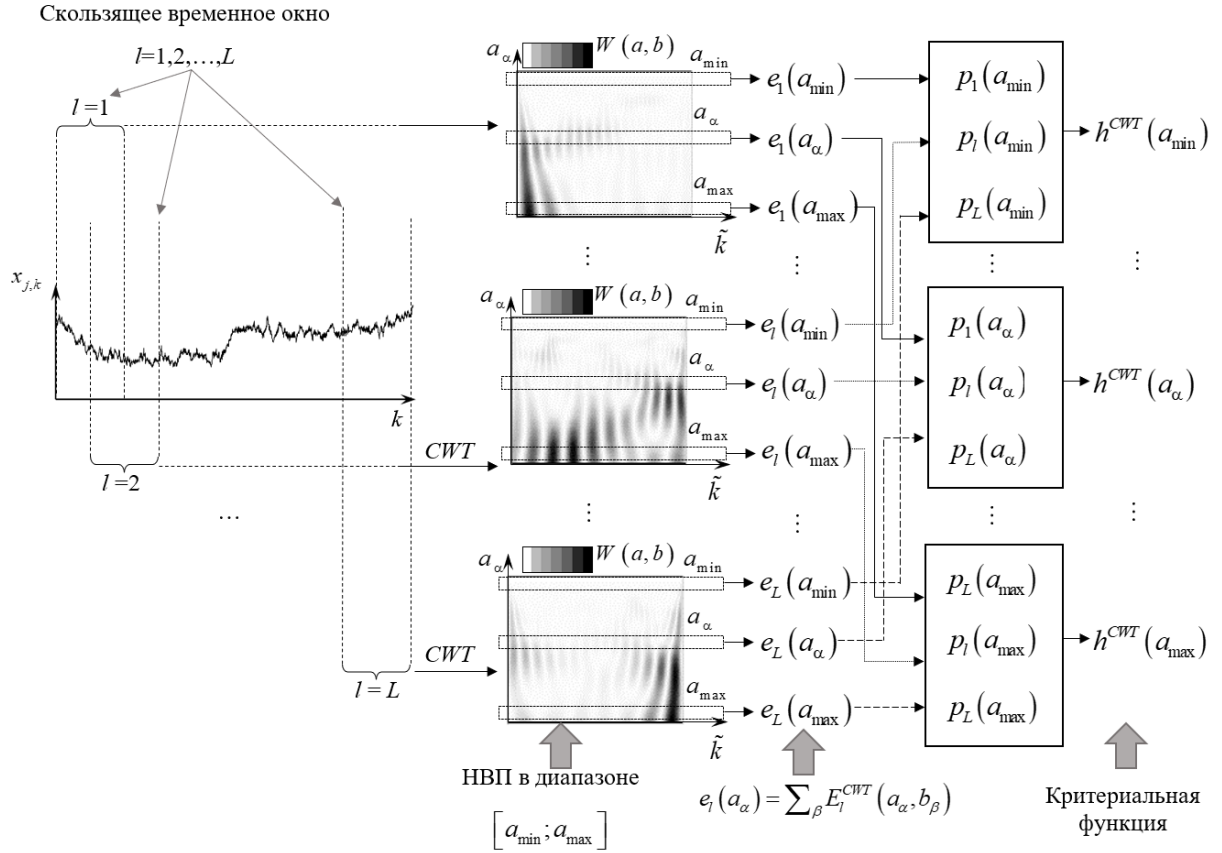


Рисунок 1 – Схема вычисления критериальной функции поиска оптимального локального диапазона масштабов НВП

Учитывая тот факт, что вейвлет-энтропия отражает неравномерность энергетических составляющих во временном окне l , то выбор локального диапазона масштабов (частот), обладающего наибольшей неравномерностью, позволяет повысить точность и чувствительность функции для поиска временного интервала. Локальный диапазон масштабов (частот), соответствующий частотному составу паттерна в таком случае, является оптимальным в смысле неравномерности.

На основе найденного оптимального диапазона масштабов $\hat{a}_\alpha \in [\hat{a}^{\min}; \hat{a}^{\max}]$ базисной вейвлет-функции вычисляется вейвлет-энтропия, вычисляемая с помощью НВП

$$\tilde{H}^{CWT}(l) = -\sum_{\hat{a}_\alpha} \hat{p}_a(l) \log_2(\hat{p}_a(l)),$$

где $\hat{p}_a(l) = E_a(l) / \bar{E}(l)$ – вероятность распределения вейвлет-энергии сигнала по масштабам a_i , рассчитываемая для каждого l -го ($l=1, 2, \dots, n$) временного окна,

$E_{\hat{a}_\alpha}(l) = \sum_{b_\beta} E_l^{CWT}(a_\alpha, b_\beta)$ – суммарная вейвлет-энергия для a_α в l -ом временном окне,

$\bar{E}(l) = \sum_{\hat{a}_\alpha} E_{\hat{a}_\alpha}$ – суммарная вейвлет-энергия во всем локальном диапазоне масштабов

$\hat{a}_\alpha \in [\hat{a}_\alpha^{\min}; \hat{a}_\alpha^{\max}]$ базисной вейвлет-функции, и из условия $\min_l \{\tilde{H}^{CWT}(l)\}$ определяются временные границы паттерна биоэлектрической активности в составе непрерывно регистрируемой ЭЭГ.

Также для реализации нейроинтерфейсов с использованием низко производительных процессорных систем были разработаны критерии поиска оптимального локального диапазона частот, позволяющие повысить точность определения границ паттернов при использовании спектральной энтропии, и в отличие от критериев, описанных во второй главе диссертации, использует быстрое преобразование Фурье, что существенно снижает вычислительную мощность алгоритмов.

Таким образом, во второй главе был предложен новый метод частотно-временной локализации паттернов с априорно неизвестными параметрами, а также критерии оптимальности для выбора частотного диапазона и временного интервала в составе разработанного метода.

Третья глава диссертации посвящена разработке алгоритмов и программной реализации предложенного метода и критериев оптимальности. Алгоритм частотно-временной локализации априорно неопределенных паттернов в составе зашумленных сигналов нейрокомпьютерного интерфейса представлен на рисунке 2.

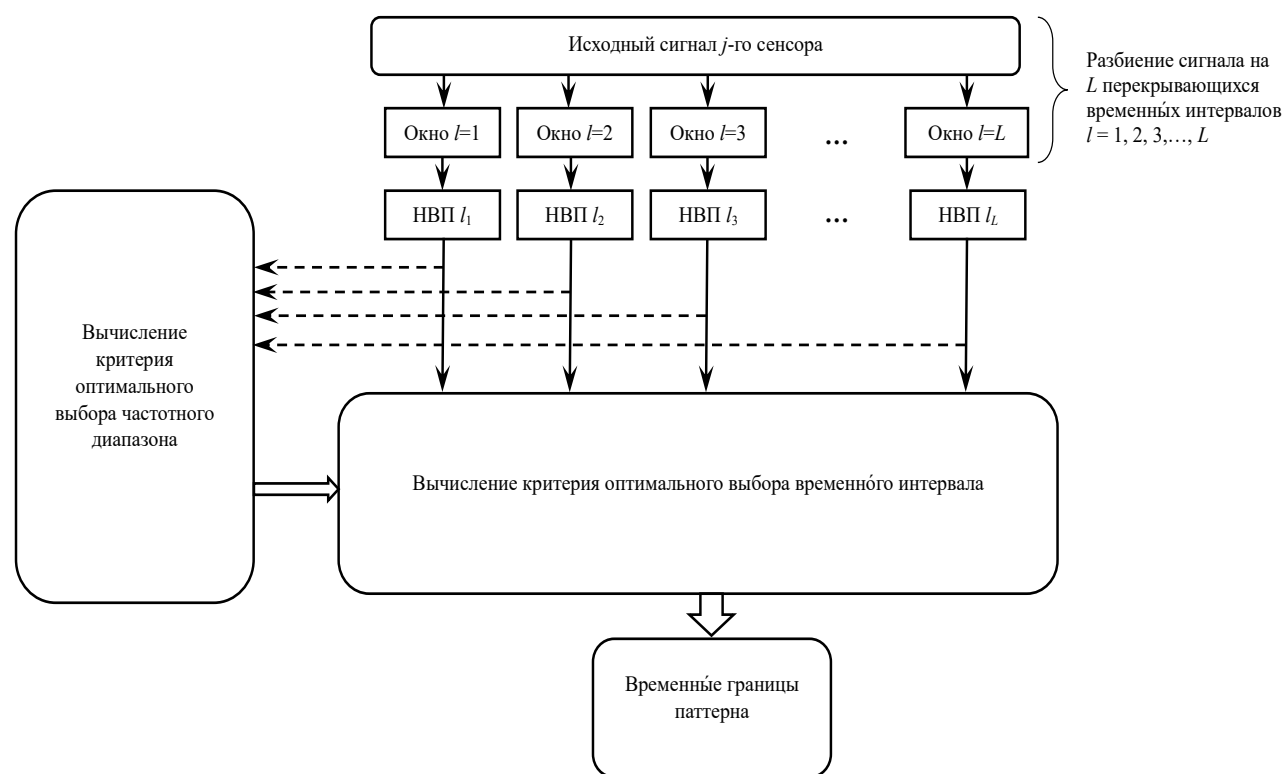


Рисунок 2 – Функциональная схема алгоритма частотно-временной локализации паттернов на основе НВП

Также в третьей главе представлена программная реализация алгоритма частотно-временной локализации априорно неопределенных паттернов в составе зашумленных

сигналов нейрокompьютерного интерфейса (рисунок 3) в виде виртуального прибора с использованием среды графического программирования LabVIEW.

Основными этапами вычисления алгоритма является инициализация входных параметров, вычисление критерия оптимального выбора локального диапазона частот (масштабов базисной вейвлет функции) (рисунок 3) и вычисление вейвлет энтропии НВП в полученном локальном диапазоне частот (рисунок 4). Основные функции и процедуры в составе виртуального прибора, реализующего разработанный алгоритм, представлены в виде суб-приборов.

Вычисление границ локального частотного диапазона в режиме по умолчанию осуществляется пользователем на основе экспертной оценки графика критериальной функции в окрестностях минимума.

Помимо вышперечисленного, в третьей главе диссертации представлены алгоритмы частотно-временной локализации с использованием трансформант Фурье. Для разработанных алгоритмов проведена апробация с использованием сложных аддитивных смоделированных паттернов. Проведено сравнение точности частотно-временной локализации паттернов с использованием алгоритмов на основе традиционных методов.

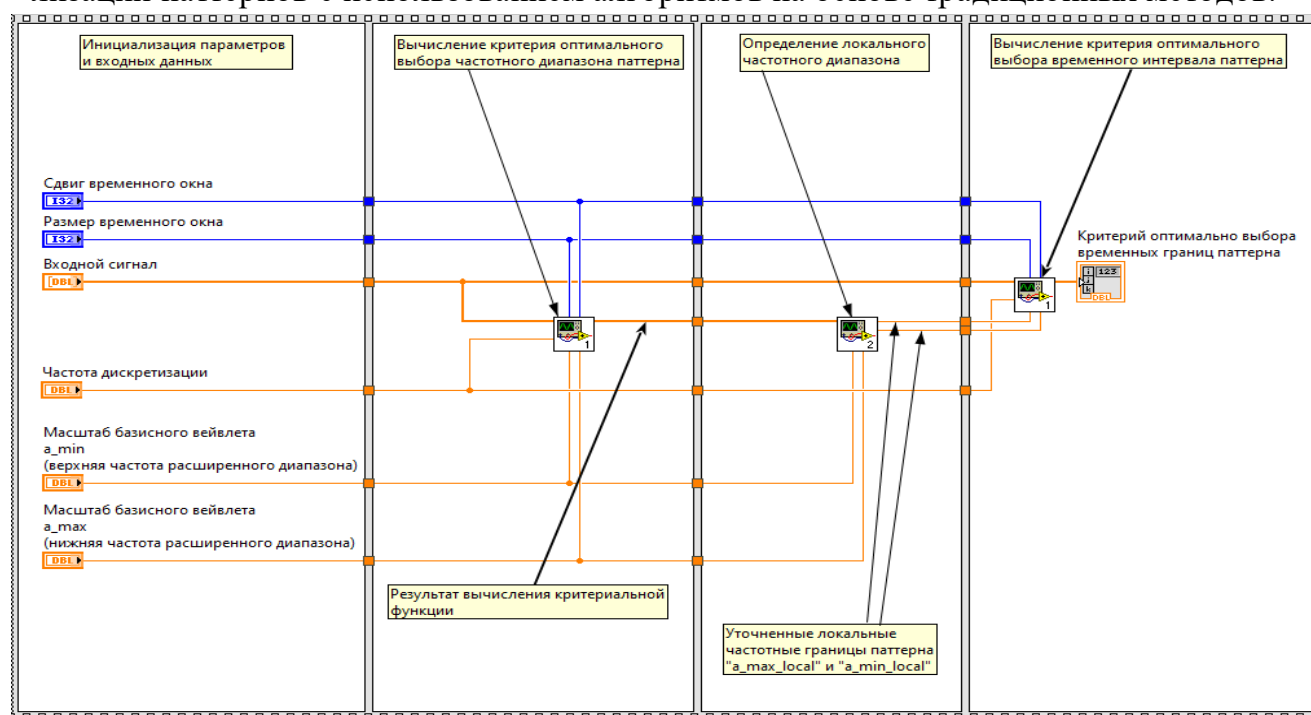


Рисунок 2 – Блок-диаграмма виртуального прибора частотно-временной локализации паттернов на основе НВП

По результатам моделирования, показано, что разработанные алгоритмы частотно-временной локализации априорно неопределенных паттернов в составе зашумленных сигналов имеют более чувствительны и обладают высокой точностью по сравнению с алгоритмами на основе традиционных методов.

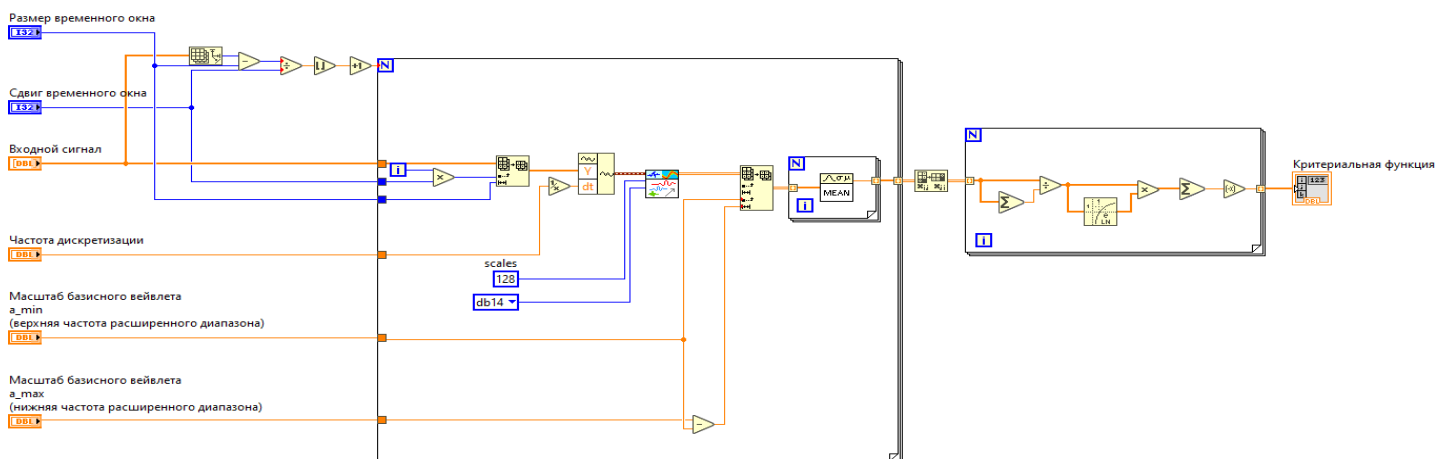


Рисунок 3 – Блок-диаграмма виртуального суб-прибора «Вычисление критерия оптимального выбора частотного диапазона паттерна»

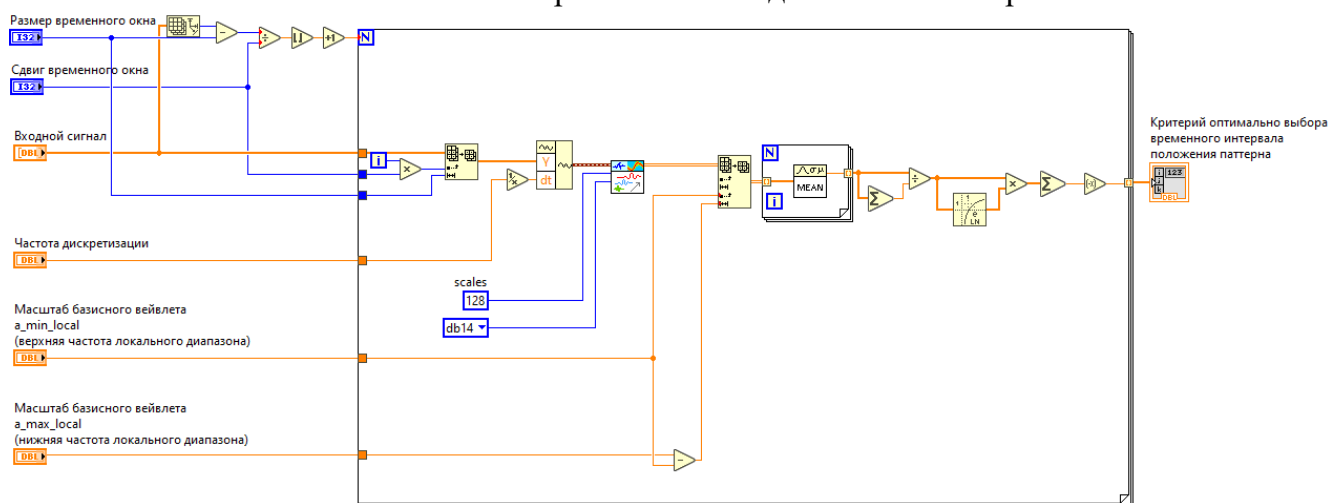


Рисунок 4 – Блок-диаграмма виртуального суб-прибора «Вычисление критерия оптимального выбора временного интервала паттерна»

В четвертой главе диссертации представлены результаты экспериментальных исследований, подтвердивших корректность принятых решений при разработке метода. В экспериментальных исследованиях приняли участие 24 здоровых добровольца (16 мужчин и 8 женщин), средний возраст которых составил 21.5 года.

В одной экспериментальной сессии добровольцы в произвольном темпе выполняли реальные движения правой, левой руками. Движения верхними конечностями чередовались с состоянием покоя, когда обследуемый находился некоторое время с открытыми глазами без движений. При этом сигналы ЭЭГ фиксировались непрерывно, включая фазы покоя и подготовки к совершению акта движения. В рамках исследования использовались отрезки экспериментальных данных, которые содержали в себе 1 секунду покоя перед предъявлением движения, а также 1 секунду после начала движения.

Регистрацию ЭЭГ осуществляли относительно ушных референтных электродов (референт объединенный) с использованием электроэнцефалографа «Энцефалан-131-03» от $J=17$ стандартных каналах (F7, F8, F3, Fz, F4, C3, Cz, C4, P3, Pz, P4, O1, O2, T3, T4, T5, T6) в соответствии с международной системой "10×20". Частота дискретизации ЭЭГ составляла 250 Гц. Параллельно в области поверхностных мышц, сгибающих предплечье в

локтевом суставе и поверхностных сгибателей пальцев записывалась электромиограмма (ЭМГ).

Исследование было направлено на поиск временных границ премоторного паттерна, который отражает процесс формирования мозгом человека, команды на выполнение движения рукой. При этом, из литературных источников известно, что конечная граница премоторного паттерна соответствует, непосредственно началу движения, которое в свою очередь отражено на ЭМГ. Начальная граница паттерна варьируется в диапазоне от 100 мс до 500 мс до начала движения. В процессе исследования, в первую очередь была проведена оценка точности определения конечной границы премоторного паттерна, которую возможно определить инструментально. Также проведено сравнение с традиционным методом поиска паттернов.

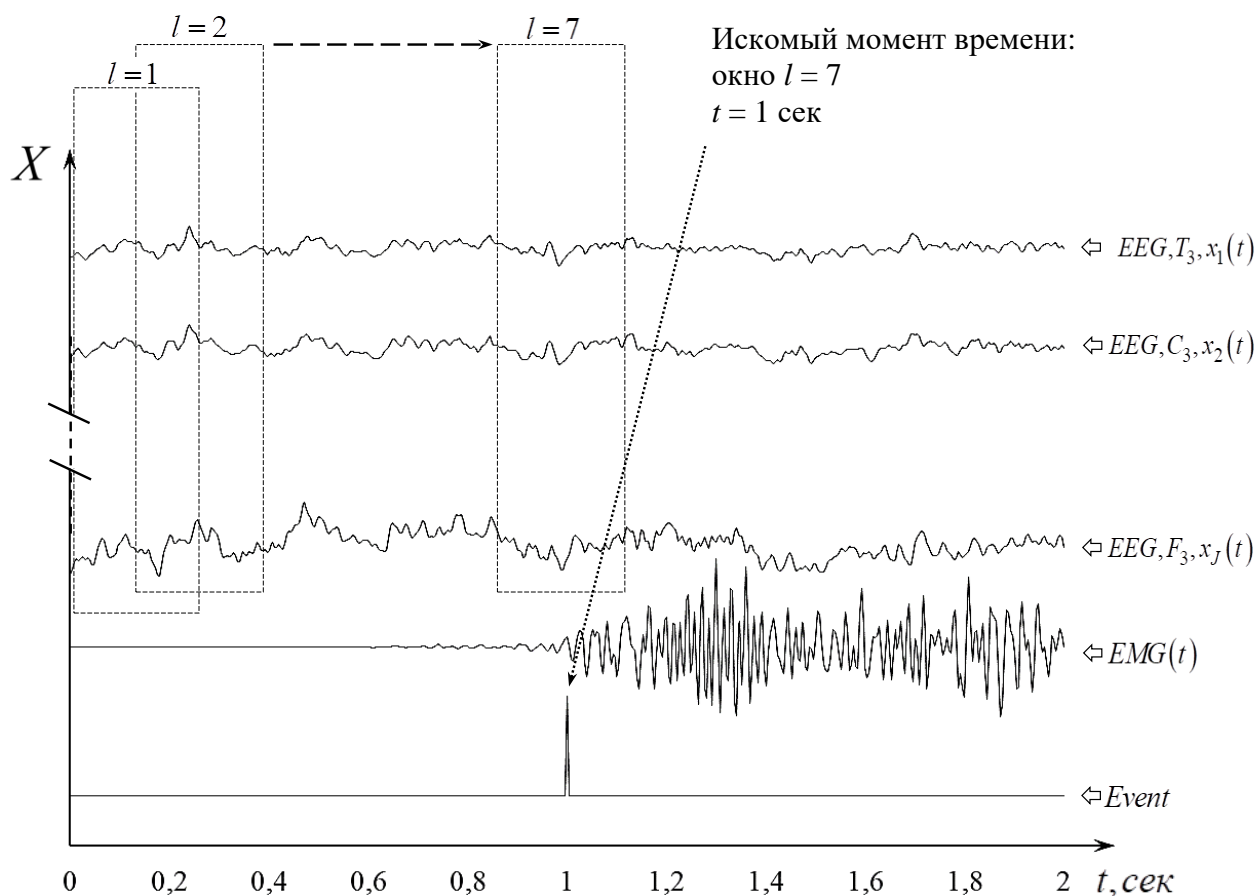


Рисунок 2 – Фрагмент отдельных каналов ЭЭГ и канала ЭМГ

На рисунке 2 представлен фрагмент экспериментальных данных, отражающий внешний вид активности типовых каналов ЭЭГ – Т3, С3, F3 ($EEG, T3 \ x_1(t)$, $EEG, C3 \ x_2(t)$, $EEG, F3 \ x_J(t)$, рисунок 2) при предъявлении движения. Также на рисунке представлена ЭМГ, которая отражает, фактически, начало выполнения движения человеком ($EMG(t)$, рисунок 2). Помимо этого, на рисунке 2 схематично обозначена процедура выделения временных окон $l=1, 2, \dots, L$ в используемом отрезке данных. Положение конечной границы премоторного паттерна обозначается единичным импульсом (событием $Event(t)$, на рисунке 2), которое регистрируется при достижении амплитуды колебаний ЭМГ 10 мкВ.

Очевидно, что по характеру сигналов ЭЭГ ($EEG, T3 \ x_1(t), EEG, C3 \ x_2(t), EEG, F3 \ x_j(t)$) принципиально невозможно визуально определить временные границы премоторного паттерна биоэлектрической активности мозга человека.

В качестве входных данных для алгоритмов, реализующих разработанный метод и традиционный метод, использовались только данные с каналов ЭЭГ. В свою очередь, ЭМГ и метка использовались лишь после всех вычислений для проверки точности определения положения паттерна.

В традиционном методе вычисление проводится в расширенном диапазоне частот (масштабов базисной вейвлет-функции), который полностью покрывает площадь под кривой СПМ искомого ЭЭГ-паттерна. Известно, что СПМ ЭЭГ-паттернов двигательной активности сосредоточена в диапазоне частот $f_i \in [11; 18]$ Гц, что соответствует масштабам $a_\alpha \in [8; 50]$ для вейвлета Добеши-14 (db14), используемого в расчётах.

Согласно алгоритмам, реализующим разработанный метод, в первую очередь необходимо вычислить локальный частотный диапазон и/или локальный диапазон масштабов базисной вейвлет-функции, которые являются оптимальными в смысле неравномерности СПМ. На рисунке 5 показаны примеры результата вычисления критериальных функций для рассматриваемого случая. Спектральная и вейвлет-энтропия в составе традиционного метода при этом вычислялась в расширенном диапазоне частот (масштабов).

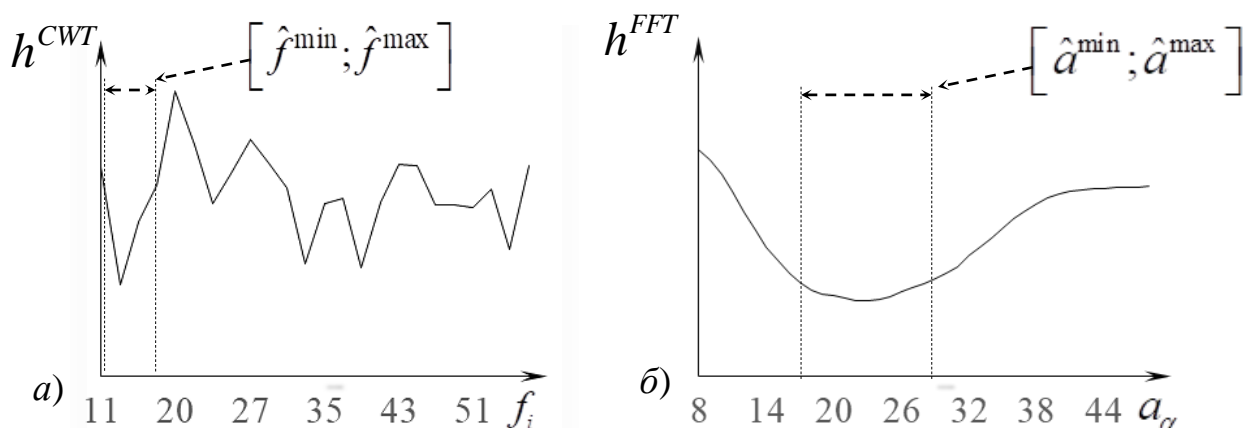


Рисунок 3 – Примеры критериальных функций $h^{FFT}(f_i)$ (а) и

$h^{CWT}(a_\alpha)$ (б) разработанных критериев оптимальности

На рисунке 3 пунктирными линиями показаны выбранные диапазоны частот (рисунок 3, а) и масштабов базисной вейвлет-функции (рисунок 3, б), которые являются оптимальными в смысле неравномерности СПМ и получены с помощью критериев $\min_{f_i} \{h^{FFT}(f_i)\}$ и $\min_{a_\alpha} \{h^{CWT}(a_\alpha)\}$ соответственно. Выбранные диапазоны используются для последующего вычисления спектральной энтропии и вейвлет-энтропии в рамках разработанного метода. Так, для функции спектральной энтропии $\tilde{H}^{FFT}(l)$ согласно критерию $\min_{f_i} \{h^{FFT}(f_i)\}$ выбран диапазон частот $\hat{f}_i \in [11; 18]$ Гц, а для функции вейвлет-энтропии

$\tilde{H}^{CWT}(l)$, согласно критерию $\min_{a_\alpha} \{h^{CWT}(a_\alpha)\}$ выбран диапазон масштабов $\hat{a}_\alpha \in [17; 29]$.

Стоит отметить, что выбранные диапазоны оптимальны только для отрезка экспериментальных данных, приведенного на рисунке 2. Для других примеров оптимальные диапазоны отличаются и варьируются в рамках пределов СПМ искомого паттерна.

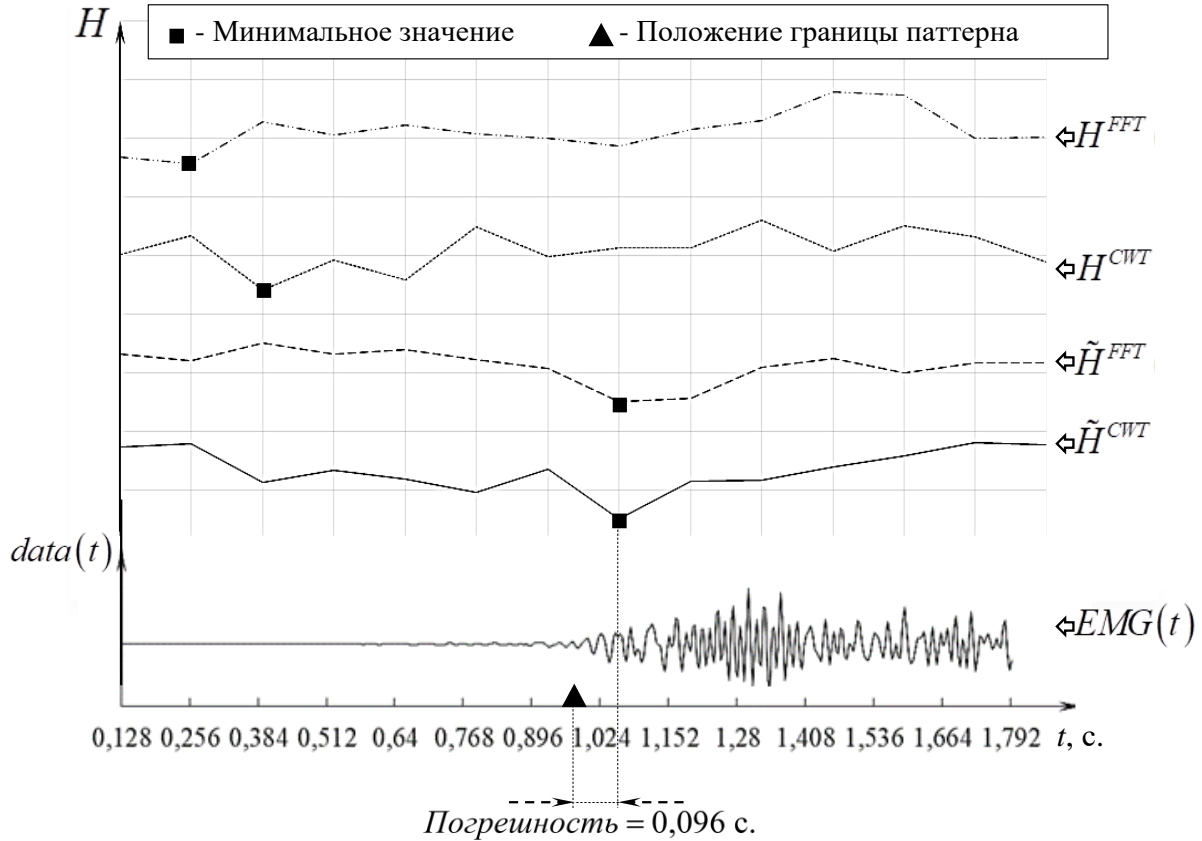


Рисунок 4 – Пример определения временной границы окончания премоторного ЭЭГ-паттерна в одной сессии

На рисунке 4 показан пример сравнения эффективности определения временной границы окончания премоторного паттерна биоэлектрической активности (отмечен ▲ на временной оси, рисунок 4) в одной сессии одного добровольца. Минимальные значения критериальных функций (отмечены символом ■, рисунок 4) на временной оси, при успешном детектировании паттернов должны соответствовать положению искомого ЭЭГ паттерна.

Традиционные методы и их критериальные функции $H^{FFT}(l)$ и $H^{CWT}(l)$ на основе расчета спектральной энтропии или вейвлет-энтропии не позволяют корректно найти границу окончания премоторного ЭЭГ-паттерна. В свою очередь, критериальные функции $\tilde{H}^{FFT}(l)$ и $\tilde{H}^{CWT}(l)$ (рисунок 4), предложенные в диссертационном исследовании, принимают минимальное значение во временном окне, которое соответствует положению искомого паттерна. Стоит отметить, что для критериальных функций в составе разработанного метода, в проведенных экспериментах погрешность составила 96 мс и обусловлена

размером и сдвигом скользящего временного окна. В то же время погрешность определения этой же границы указанными выше традиционными методами составила 744 мс и 616 мс соответственно.

Подобным образом были проведены вычисления для экспериментальных записей всех добровольцев и всех реализаций премоторных паттернов, которые в сумме составили более чем 1200 примеров. По результатам проведенных вычислений получено, что погрешность определения границ премоторных паттернов для разработанного метода на основе НВП составила не более 102 мс, для вариации разработанного метода с использованием преобразования Фурье, погрешность составила не более 150 мс. В свою очередь, погрешность определения конечной границы премоторного паттерна на основе традиционных методов составила не более 824 мс и 930 мс, для метода на основе НВП и трансформант Фурье, соответственно.

Таким образом, получено, что использование разработанного метода на основе НВП и его вариация с использованием трансформант Фурье позволили повысить точность определения конечной границы премоторного паттерна в составе ЭЭГ.

На заключительном этапе экспериментальных исследований была выполнена оценка точности определения границ премоторных паттернов, посредством разработанного метода в задаче классификации типов премоторных паттернов, решение которой позволит повысить точность работы нейроинтерфейса.

Классифицировались два целевых состояния, а именно, «Покой» и «Подготовка к выполнению движения» (премоторный паттерн). Класс «Покой» во всех случаях представлял собой фрагменты экспериментальных записей ЭЭГ фоновой активности головного мозга человека в состоянии покоя. Класс «Подготовка к выполнению движения» представлял собой экспериментальные записи ЭЭГ, содержащие отрезки специфических премоторных ЭЭГ-паттернов, границы которых найдены посредством традиционного метода и разработанного метода. Всего было сформировано четыре набора данных для алгоритмов машинного обучения, которые отличались только методом определения границ премоторных паттернов, соответствующих классу «Подготовка к выполнению движения».

Для решения задачи классификации ЭЭГ-паттернов были применены стандартные модели на основе опорных векторов (SVM), градиентного бустинга деревьев принятия решений (GBDT), случайного леса (Random forest) и регуляризованных линейных моделей с обучением стохастическим градиентным спуском (SGD) библиотеки Python.Scikit-learn.

Точность бинарной классификации классов «Покой» и «Подготовка к выполнению движения» для традиционного метода на основе традиционного метода на основе НВП и спектральной энтропии составила 72,3% и 68,6%, соответственно. Для разработанного метода на основе НВП и его вариации с использованием трансформант Фурье точность составила 98,6% и 96,6%, соответственно.

Аналогично случаю с премоторными паттернами, было проведено исследование, направленное на повышение точности классификации паттернов, связанных с вербальной

речевой активностью. Согласно анализу результатов, также было получено, что при использовании разработанного метода, средняя точность классификации вербальных речевых паттернов в составе ЭЭГ, по сравнению с традиционными методами была увеличена на 45%, и достигла 80%.

Полученные результаты окончательно подтвердили, что выборки, сформированные с использованием разработанного метода, являются репрезентативными, так как точность классификации существенно повысилась и, соответственно, была подтверждена корректность разработанного метода частотно-временной локализации ЭЭГ-паттернов и разработанного алгоритмического и программного обеспечения, так как существенно повысилась эффективность определения временных границ искомых паттернов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований, в диссертационной работе получены следующие основные результаты:

1. предложенный в работе новый метод частотно-временной локализации ЭЭГ-паттернов биоэлектрической активности мозга человека отличается от традиционных методов тем, что обладает свойством робастности к априорно неизвестной вариативности текущего функционального состояния человека и к типу подготавливаемого человеком движения – реальному или мысленному, произвольному или баллистическому (пункт 4 паспорта специальности 2.3.1. «Системный анализ, управление и обработка информации, статистика»);

2. предложенные новые критерии оптимального поиска границ локального частотного диапазона, максимально соответствующего частотному диапазону искомого паттерна биоэлектрической активности мозга человека, отличаются тем, что применимы в условиях его маскирования шумами с близкими или частично совпадающими энергетическими спектрами (пункт 3 паспорта специальности 2.3.1. «Системный анализ, управление и обработка информации, статистика»);

3. разработанное алгоритмическое и программное обеспечение для нейрокомпьютерного интерфейса реализует синтезированный метод (пункт 5 паспорта специальности 2.3.1. «Системный анализ, управление и обработка информации, статистика»);

4. полученные результаты экспериментальной апробации разработанного метода частотно-временной локализации априорно неопределенных паттернов в составе сигналов ЭЭГ подтвердили возможность повышения точности классификации команд нейроуправления в ИМК (пункт 12 паспорта специальности 2.3.1. «Системный анализ, управление и обработка информации, статистика»).

5. результаты диссертационной работы были использованы для разработки нейроинтерфейсов в рамках выполнения научно-исследовательских работ: по гранту Российского Научного Фонда N20-19-00627 на тему "Разработка стимул-независимой модели интерфейса "Мозг-компьютер" для реабилитации людей с ограниченными возможностями", 2020-2022 г.; по проекту в интересах развития кооперации российских высших

учебных заведений и организаций, реализующих комплексные проекты по созданию высокотехнологичного производства, на тему "Создание программного комплекса для управления человеческим капиталом на основе нейротехнологий для предприятий высокотехнологического сектора Российской Федерации", Постановление Правительства РФ N218.

Наиболее значимым и ценным результатом проведенного исследования является применение разработанного метода и детальное определение частотно-временных границ паттернов ЭЭГ. Новый метод позволил повысить точность классификации команд нейроуправления.

Наряду с этим, полученные результаты позволяют утверждать, что разработанный метод частотно-временной локализации ЭЭГ-паттернов способен эффективно и надёжно определять временные границы переходов функционального состояния мозговых структур из холостого хода (Idle activity or Default mode) к реализации актуальной задачи. Указанные переходы между состояниями являются важными событиями для принятия решения о наличии целевого паттерна ЭЭГ, потенциально пригодного для управления в контуре системы «Мозг-компьютер» или «Мозг-Мозг».

Полученные результаты могут быть применены в задачах частотно-временной локализации априорно неопределенных паттернов в составе зашумленных сигналов нейрокомпьютерного интерфейса.

В перспективе дальнейшей разработки темы исследования может предполагаться модификация метода посредством автоматизации выбора частотного диапазона, за счет введения дополнительных критериев. Синтезированные с помощью метода системы, могут стать более эффективными в части повышения точности работы нейрокомпьютерного интерфейса на основе решения задачи поиска границ по оси времени паттернов в составе многомерной ЭЭГ биоэлектрической активности мозга человека.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в научных изданиях, входящих в Перечень ВАК

1. Щербань, И. В. Эффективные критериальные функции спектральной энтропии для поиска высокочастотных паттернов в составе зашумленных электрограмм / И. В. Щербань, Н. Е. Кириленко, О. Г. Щербань // Информационно-управляющие системы. – 2018. – № 2(93). – С. 8-17. – DOI 10.15217/issn1684-8853.2018.2.8. (ВАК, K1)

2. Щербань, И. В. Метод поиска неизвестных высокочастотных осцилляторов в составе зашумленных сигналов на основе непрерывного вейвлет-преобразования / И. В. Щербань, Н. Е. Кириленко, С. О. Красников // Автоматика и телемеханика. – 2019. – № 7. – С. 122-133. – DOI 10.1134/S0005231019070055. (ВАК)

3. Синтез адаптивного фильтра для автоматической детекции и локализации по оси времени премоторных ЭЭГ-паттернов мозга человека / О. Г. Щербань, Д. М. Лазуренко, И. В. Щербань, Н. Е. Кириленко // Информационные технологии. – 2021. – Т. 27, №. 9. – С. 484–493. – DOI 10.17587/it.27.484-493. (ВАК, K1)

4. Метод локализации пространственно-временных паттернов на последовательности биомедицинских изображений / И. В. Щербань, В. С. Федотова, Н. Е. Кириленко [и др.] // Информационные технологии. – 2024. – Т. 30, №. 1. – С. 42-49. – DOI 10.17587/it.30.42-49. (ВАК, K1)

Статьи в научных изданиях, входящих в Scopus, Web of Science, RSCI

5. Method for automatic detection of movement-related EEG pattern time boundaries / I. V. Shcherban, D. M. Lazurenko, O. G. Shcherban [et al.] // Soft Computing. – 2024. – Vol. 28, No. 5. – P. 4489-4501. – DOI 10.1007/s00500-023-08837-y. (Scopus Q2).

Статьи в журналах, индексируемых в РИНЦ

6. Кириленко, Н. Е. Выбор оптимальной базисной вейвлет-функции для непрерывного вейвлет-преобразования / Н. Е. Кириленко, И. В. Щербань, А. А. Костоготов // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2016. – №. 5. – С. 45-48.

7. Решение задачи поиска осцилляторных паттернов в составе зашумленных сигналов / Н. Е. Кириленко, С. О. Красников, К. Д. Бадыштова, И. В. Щербань // Труды Северо-Кавказского филиала Московского технического университета связи и информатики. – 2017. – №. 1. – С. 236-238.

8. Кириленко, Н. Е. Разработка алгоритма энтропийного анализа сигналов с неопределенными статистическими характеристиками / Н. Е. Кириленко, И. В. Щербань, О. Г. Щербань // Вестник современных исследований. – 2018. – №. 12.5(27). – С. 155-158.

9. Кубах, Е. В. Алгоритмы частотного анализа биомедицинских электрограмм / Е. В. Кубах, И. В. Щербань, Н. Е. Кириленко // Труды Северо-Кавказского филиала Московского технического университета связи и информатики. – 2019. – №. 1. – С. 228-231.

Публикации в сборниках трудов конференций

10. Щербань, И. В. Виртуальный прибор выбора оптимальной базисной вейвлет-функции в реальном времени / И. В. Щербань, Н. Е. Кириленко, Е. В. Кубах // Концепции фундаментальных и прикладных научных исследований : сборник статей по итогам Международной научно-практической конференции, 09 декабря 2017 г. : [в 6 ч.]. Ч. 3. / Агентство международных исследований. – Стерлитамак: Агентство международных исследований, 2017. – С. 179-182

11. Кириленко, Н. Е. Разработка критерия для энтропийного анализа зашумленных сигналов с неопределенными статистическими характеристиками / Н. Е. Кириленко // Фундаментальные исследования, методы и алгоритмы прикладной математики в технике, медицине и экономике : материалы 17-ой Международной молодежной научно-практической конференции, 6–7 сентября 2018 г. – Новочеркасск : Лик, 2018. – С. 25-31.

12. Кириленко, Н. Е. Обоснование выбора SSA в качестве метода декомпозиции сигнала в задачах поиска осцилляторных паттернов / Н. Е. Кириленко, Е. В. Кубах // Сборник научных трудов "Транспорт: наука, образование, производство": ("Транспорт-2019"). Т. 1: Технические науки / Министерство транспорта Российской Федерации, Федеральное агентство железнодорожного транспорта [и др.]. – Ростов-на-Дону: Ростовский государственный университет путей сообщения, 2019. – С. 156-161.

13. Кириленко, Н. Е. Идентификация фокальной активности макросматика на основе использования аппарата Mel - кепстральных коэффициентов / Н. Е. Кириленко, И. В. Щербань, С. О. Красников // Актуальные проблемы науки на современном этапе развития: сборник статей Международной научно-практической конференции, 18 ноября 2015 г.: [в 2 ч.]. Ч. 2 / Международный центр инновационных исслед. "Омега Сайнс"; [отв. ред.: Сукиасян Асатур Альбертович]. – Екатеринбург: Омега Сайнс, 2015. – С. 106-108.

14. Development of Algorithms to Detect EEG Patterns Specific for Arbitrary Motor Activity of a Human in the BCI Applications / I. V. Shcherban, D. M. Lazurenko, D. G. Shaposhnikov, N. E. Kirilenko // Advances in Neural Computation, Machine Learning, and Cognitive Research V. NEUROINFORMATICS 2021: Selected Papers from the XXIII International Conference on Neuroinformatics, October 18-22, 2021, Moscow, Russia. Studies in Computational Intelligence. – Springer Nature, 2022. – Vol. 1008 SCI. – P. 75-80. – DOI 10.1007/978-3-030-91581-0_10

15. Метод детекции ЭЭГ-паттернов мозга человека в условиях мысленной вербализации / О. М. Бахтин, И. В. Щербань, Н. Е. Кириленко, О. Г. Щербань // Приоритетные направления развития науки и технологий: доклады XXVIII Международной научно-практической конференции. – Тула: Инновационные технологии, 2021. – С. 88-92

Монографии

16. Методы поиска структурных особенностей ЭЭГ для стимул-независимой модели интерфейса "мозг-компьютер": монография / [Щербань И. В., Н. Е. Кириленко, О. Г. Щербань и др.]; Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южный федеральный университет», НИТЦ нейротехнологий. – Ростов-на-Дону; Таганрог: Издательство Южного федерального университета, 2022. – 133 с. – ISBN 978-5-9275-4270-3.

Патенты/свидетельства (при наличии)

17. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016663167 Российская Федерация. Программа идентификации специфических паттернов в составе электрических сигналов на основе выделения и анализа MEL-кепстральных частотных коэффициентов: № 2016661114: заявл. 18.10.2016: опубл. 29.11.2016 / И. В. Щербань, Н. Е. Кириленко, О. Г. Щербань; правообладатель федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южный федеральный университет» (Южный федеральный университет).

18. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017610478 Российская Федерация. Программа аутентификации пользователя на основе вейвлет-анализа речевых сигналов, регистрируемых с использованием микрофона: № 2016662311: заявл. 15.11.2016: опубл. 11.01.2017 / И. В. Щербань, Н. Е. Кириленко, П. В. Лобзенко; правообладатель Ордена Трудового Красного Знамени федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский технический университет связи и информатики» (МТУСИ)

19. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017614416 Российская Федерация. Программа поиска осцилляторных паттернов в составе электрических сигналов на основе энтропийного подхода: № 2017611374: заявл. 20.02.2017: опубл.

14.04.2017 / И. В. Щербань, Н. Е. Кириленко, С. О. Красников; правообладатель Ордена Трудового Красного Знамени федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский технический университет связи и информатики» (МТУСИ).

20. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017616868 Российская Федерация. Программа поиска частотного диапазона паттерна на основе расчета амплитудной вейвлет-функции регистрируемого сигнала: № 2017611401: заявл. 20.02.2017: опубл. 19.06.2017 / И. В. Щербань, Н. Е. Кириленко, С. О. Красников; правообладатель Ордена Трудового Красного Знамени федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский технический университет связи и информатики» (МТУСИ)

21. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024687021 Российская Федерация. Программа построения и визуализации перистимульных диаграмм экспериментальных записей фокальной биоэлектрической активности обонятельной луковицы крысы при предъявлении целевых веществ: № 2024686622: заявл. 06.11.2024: опубл. 13.11.2024 / Н. Е. Кириленко, П. О. Косенко, В. А. Газеев, М. К. Мирошниченко; правообладатель федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южный федеральный университет»

22. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024691362 Российская Федерация. Программа построения и визуализации пространственно-временных диаграмм интенсивности фокальной биоэлектрической активности обонятельной луковицы крысы при предъявлении целевых веществ: № 2024690652: заявл. 05.12.2024: опубл. 20.12.2024 / Н. Е. Кириленко, П. О. Косенко, В. А. Газеев, М. К. Мирошниченко; правообладатель федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южный федеральный университет».

Личный вклад автора.

Личный вклад соискателя в опубликованных в соавторстве работах состоит: в разработке метода частотно-временной локализации паттернов в составе ЭЭГ [1-22], в разработке критериев оптимальности [15,18], в разработке алгоритмов [3-6], в постановке задачи исследования [1, 2], проведении численных исследований результатов натуральных экспериментов, обобщении полученных результатов [11-19], в разработке программного обеспечения, реализующего разработанный метод [7-10].

Подписано в печать 17.04.2025 г.
Бумага офсетная. Формат 60×84 1/16. Тираж 120 экз.
Усл. печ. лист. 1,0. Уч.-изд. 1,0. Заказ № 9950.

Отпечатано в отделе полиграфической, корпоративной и сувенирной продукции
Издательско-полиграфического комплекса КИБИ МЕДИА ЦЕНТРА ЮФУ. 344090, г.
Ростов-на-Дону, пр. Стачки, 200/1, тел (863) 243-41-66.