

<https://doi.org/10.21869/2223-1536-2026-16-2-235-247>

УДК 617.3 617.3

Методика оптимизации выбора и хранения информации об электрокардиосигналах сверхвысокого разрешения

Д. О. Шевяков¹ ✉, Е. А. Денисова¹, А. А. Кордюкова¹,
А. С. Афанасенко¹, Б. С. Гуревич¹

¹ Институт аналитического приборостроения Российской академии наук
ул. Ивана Черных, д. 31–33, литера А, г. Санкт-Петербург 198095, Российская Федерация

✉ e-mail: sevakovdaniil@gmail.com

Резюме

Цель исследования. Разработка и апробация специализированной автоматизированной системы для записи, структурированного хранения и анализа данных электрокардиосигналов сверхвысокого разрешения, получаемых в ходе экспериментов по моделированию ишемии миокарда у подопытных животных на базе применения нового метода электрокардиографии сверхвысокого разрешения, – цель исследования.

Методы. Для решения задачи была реализована автоматизированная система, состоящая из модулей записи, хранения и анализа. Модуль записи был специально разработан для сохранения электрокардиосигналов сверхвысокого разрешения и включает возможность визуализации хода эксперимента для контроля состояния биологического объекта. Модуль хранения данных эксперимента представляет собой документоориентированную базу данных и специальное программное обеспечение, позволяющее систематизировать и извлекать по заданным критериям неоднородную информацию. Модуль автоматического анализа выполняет функцию последовательного исполнения программных модулей, специально разработанных для анализа электрокардиосигналов сверхвысокого разрешения.

Результаты. Внедрение разработанной системы хранения и анализа большого количества данных электрокардиосигналов сверхвысокого разрешения, полученных во время проведения экспериментов, позволило существенно оптимизировать исследовательские процессы. Используемый подход позволил ускорить выполнение рутинных операций за счет автоматизации цикла обработки данных от записи и систематизации до анализа. Отсутствие ручного присвоения метаданных, а также последующая валидация исключают неструктурированное хранение информации и ошибки, связанные с человеческим фактором, позволяя проводить недоступный ранее метаанализ.

Заключение. Система обеспечивает надежное хранение и безопасный доступ к большим объемам неоднородной информации, что повышает воспроизводимость, качество и эффективность исследований по ранней диагностике ишемии миокарда по методу электрокардиографии сверхвысокого разрешения.

Ключевые слова: хранение данных; анализ данных; базы данных; биомедицинские данные; электрокардиография сверхвысокого разрешения.

Благодарности: Хотим выразить благодарность Министерству образования и науки Российской Федерации за государственную тему № 1023032800366-6 «Теоретические и экспериментальные исследования по созданию приборов и интеллектуальных информационных систем ранней диагностики рака и других новообразований с использованием технологий радиофотоники, а также патологий сердца и головного мозга на базе инструментальной электрофизиологии сверхвысокого разрешения».

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

© Шевяков Д. О., Денисова Е. А., Кордюкова А. А., Афанасенко А. С., Гуревич Б. С., 2026

Для цитирования: Методика оптимизации выбора и хранения информации об электрокардиосигналах сверхвысокого разрешения / Д. О. Шевяков, Е. А. Денисова, А. А. Кордюкова, А. С. Афанасенко, Б. С. Гуревич // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2026. Т. 16, № 2. С. 235–247. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2026-16-2-235-247>.

Поступила в редакцию 16.04.2026

Подписана в печать 14.05.2026

Опубликована 30.06.2026

A methodology for optimizing the selection and storage of ultra-high-resolution electrocardiogram information

Daniil O. Shevyakov¹ ✉, Elena A. Denisova¹, Anna A. Kordyukova¹,
Arseniy S. Afanasenko¹, Boris S. Gurevich¹

¹ Institute of Analytical Instrumentation of the Russian Academy of Sciences
31-33/A Ivan Chernykh Str., Saint Petersburg 198095, Russian Federation

✉ e-mail: sevakovdaniil@gmail.com

Abstract

Purpose of research. Development and testing of a specialized automated system for recording, structured storage, and analysis of ultra-high-resolution electrocardiogram data obtained during experiments modeling myocardial ischemia in laboratory animals using a new ultra-high-resolution electrocardiography method is the purpose of research.

Methods. To address this problem, an automated system consisting of recording, storage, and analysis modules was implemented. The recording module was specifically designed to store UHR ECS and includes the ability to visualize the experiment progress to monitor the condition of the biological sample. The experimental data storage module consists of a document-oriented database and specialized software that enables systematization and retrieval of heterogeneous information based on specified criteria. The automatic analysis module sequentially executes software modules specifically designed for analyzing UHR ECS.

Results. The introduction of a developed system for storing and analyzing a large amount of ultra-high resolution electro-cardio signal data obtained during experiments made it possible to significantly optimize research processes. The approach used made it possible to speed up the completion of routine operations by automating the data processing cycle from recording and system optimization to analysis. The absence of manual assignment of metadata, as well as subsequent validation, eliminates unstructured information storage and human errors, allowing previously unavailable meta-analysis.

Conclusion. The system ensures reliable storage and secure access to large volumes of heterogeneous data, improving the reproducibility, quality, and effectiveness of studies on the early diagnosis of myocardial ischemia using ultra-high-resolution electrocardiography.

Keywords: data storage; data analysis; databases; biomedical data; ultra-high-resolution electrocardiography

Acknowledgements: We would like to express our gratitude to the Ministry of Education and Science of the Russian Federation for state project No. 1023032800366-6 "Theoretical and experimental research on the creation of devices and intelligent information systems for the early diagnosis of cancer and other neoplasms using radiophotonics technologies, as well as pathologies of the heart and brain based on ultra-high-resolution instrumental electrophysiology."

Conflict of interest: The Authors declares the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

For citation: Shevyakov D.O., Denisova E.A., Kordyukova A.A., Afanasenko A.S., Gurevich B.S. A methodology for optimizing the selection and storage of ultra-high-resolution electrocardiogram information. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie* = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering. 2026;16(2):235–247. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2026-16-2-235-247>.

Received 16.04.2026

Accepted 14.05.2026

Published 30.06.2026

Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering,
Information Science. Medical Instruments Engineering. 2026;16(2):235–247

Введение

Электрокардиография (ЭКГ) по-прежнему остается стандартом в диагностике ишемической болезни сердца (ИБС) и других кардиологических патологий [1]. В связи с этим совершенствование электрокардиографических методов является актуальной задачей для современного здравоохранения [2]. Тенденция к повышению диагностической чувствительности ЭКГ [3] и получению новой значимой информации о ранних стадиях развития ишемии миокарда позволила перейти к разработке нового метода электрокардиографии сверхвысокого разрешения (ЭКГ СВР) [4]. Данный метод предложен и развивается научным коллективом лаборатории «Радио и оптоэлектронных приборов ранней диагностики заболеваний человека» Института аналитического приборостроения РАН. Основной принцип метода ЭКГ СВР заключается в регистрации электрокардиосигналов сверхвысокого разрешения (ЭКС СВР) в более расширенных амплитудных и частотных диапазонах по сравнению с другими известными методами [4]. Такой подход позволяет выявить низкоамплитудные высокочастотные микропотенциалы, несущие важную диагностическую информацию о начальных стадиях патологических изменений в миокарде [5].

Для верификации диагностических возможностей метода ЭКГ СВР на базе Института экспериментальной медицины Центра Алмазова проводятся экспериментальные исследования на животных моделях с искусственно индуцированным коронарным синдромом [6]. В ходе экспериментов ведется многоканальная запись ЭКС СВР с трех отведений и двух каналов регистрации – низкочастотного (НЧ, аналог стандартной ЭКГ) и высокочастотного (в расширенных диапазонах). Полученные данные

составляют большой объем информации, а их рост, разновидность и сложность в обработке требуют внедрения передовых методов к их систематизации и комплексному анализу. Внедрение структурированной модульной системы для записи, хранения и обработки ЭКГ-данных становится критически важным. Такая система должна обеспечивать стандартизацию данных, автоматизацию обработки, воспроизводимость результатов и интеграцию с другими исследовательскими инструментами [7].

Известные платформы для хранения и анализа биомедицинских сигналов, такие как PhysioNet и MIMIC, являются стандартом для работы с клиническими и экспериментальными данными. Однако они заточены либо под относительно стандартизированные клинические форматы, либо под многопараметрические клинические записи. Форматы обмена, такие как OpenXDF, предлагают расширенные возможности для сложных метаданных, но их интеграция в замкнутые исследовательские циклы с уникальной аппаратурой требует дополнительной адаптации.

Научной проблемой, решаемой в данной работе, является отсутствие готовых решений, полностью учитывающих специфику протоколов экспериментов с ЭКГ СВР на животных, а именно: необходимость жесткой синхронизации «сырых» сигналов высокого и низкого разрешения, экспериментальных аннотаций в реальном времени, сложной иерархии метаданных и последующих результатов специализированной обработки. Разрабатываемая система позволит обеспечить не только хранение, но и автоматизированный анализ в рамках конкретной исследовательской методологии.

Использование структурированной системы записи, обработки и хранения

данных позволит значительно упростить процесс сохранения и дальнейшей обработки результатов экспериментов [7]. Автоматизация рутинных процессов, включая занесение экспериментальных данных в базу данных (БД), сохранение записей в стандартизированном формате, фильтрацию и обработку данных, генерацию и сравнение итоговых результатов, позволит минимизировать влияние человеческого фактора на этапах регистрации и систематизации информации [8]. Ключевым преимуществом такого подхода является единообразие обработки данных на всех этапах исследования, что обеспечивает сопоставимость и воспроизводимость результатов [9]. Кроме того, централизованное хранение информации позволит оперативно извлекать данные по заданным критериям, проводить комплексный анализ, корре-

лировать параметры ЭКС СВР с другими биомедицинскими показателями.

Материалы и методы

Разработанная методика оптимизации рабочего цикла с данными ЭКС СВР основана на трех ключевых принципах: автоматизация присвоения метаданных на этапе записи для исключения человеческого фактора; использование базы данных с гибкой схемой для аккомодации неоднородных и опциональных данных экспериментов; централизация хранения и обработки в единой программной среде для устранения асинхронности и обеспечения воспроизводимости.

Для решения поставленной задачи разработана структурная схема системы отображения, записи, обработки и хранения данных об ЭКС СВР (рис. 1).

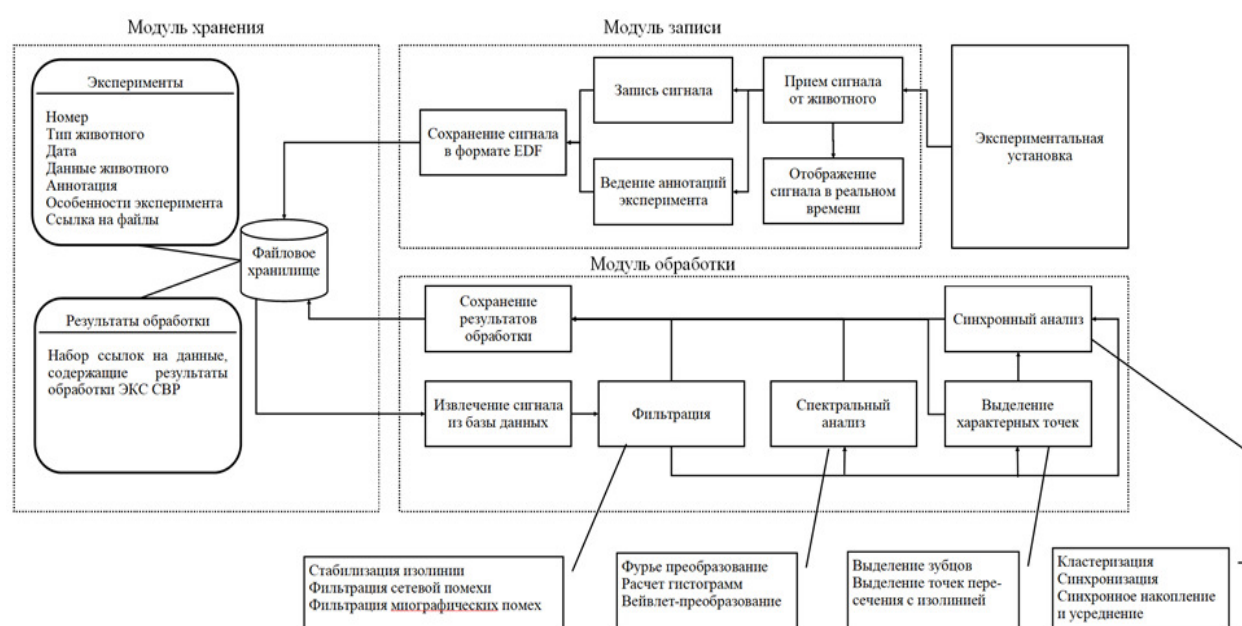


Рис. 1. Структурная схема системы отображения, записи, хранения и обработки электрокардиосигналов сверхвысокого разрешения

Fig. 1. Structural diagram of the system for displaying, recording, storing and processing ultra-high-resolution electrocardiogram signals

Разработанная система состоит из трех модулей: отображения / записи, хранения и обработки. В модуле отображения / записи регистрируемые с объ-

екта исследования сигналы с трех отведений и двух каналов транслируются на экране ПК, что позволяет контролировать правильность подключения всех

элементов электрофизиологического технического оснащения эксперимента, а также проверять корректность записи во всех отведениях. В дальнейшем потребность постоянного отображения ЭКС СВР на мониторе обусловлена необходимостью в контроле изменения их характеристик. Одновременно с отображением и записью самого сигнала в данном модуле предусмотрено внесение в специальное окно аннотаций данных об этапах эксперимента, его особенностях и внештатных ситуациях [10]. Запись сигнала с экспериментального блока и аннотации производится с использованием специально разработанного программного модуля. Отображение сигналов в реальном времени реализовано с помощью EDF-браузера – специализированного инструмента для просмотра и анализа медицинских сигналов в формате .edf. Выбор данного инструмента обоснован его ключевыми функциями: поддержкой различных операционных систем (Windows/macOS/Linux); возможностью одновременного просмотра до 64 сигнальных каналов; функциями настройки цветовых схем и масштабирования; встроенными фильтрами разных типов и др. Записанные edf-файлы и соответствующие аннотации сохраняются в модуле хранения.

Модуль хранения состоит из файлового хранилища, а также взаимодействующей с ней базы данных экспериментов с метаданными и результатами последующей обработки. Специфическая неоднородность структуры метаданных экспериментов накладывает определенные ограничения при выборе системы управления базой данных (СУБД). Информация об экспериментах может содержать уникальные значения, например описание внештатных ситуа-

ций, произошедших во время проведения эксперимента. Некоторые записи могут, наоборот, не иметь типичной для набора данных информации, например, если животное погибло в процессе проведения эксперимента. Таким образом, необходимо использовать СУБД, которая поддерживает хранение неоднородных данных, при этом предоставляя возможность эффективно извлекать информацию по заданным параметрам [11]. Была выбрана документоориентированная NoSQL СУБД – MongoDB, обладающая гибкой схемой, возможностью работы с вложенными документами или массивам, а также масштабируемостью (возможностью хранения больших объемов данных от множества экспериментов) [12]. Файловое хранилище представляет собой несортированную систему хранения, взаимодействие с которой осуществляется через набор ссылок на файлы записей экспериментов. Эти ссылки сохраняются в коллекциях БД и привязываются к конкретным экспериментам [13].

Для обеспечения эффективного совместного доступа к данным различных медицинских и исследовательских команд было решено разместить файловое хранилище и базу данных на удаленном сервере. Такой подход позволит централизованно хранить данные, а также управлять ими. Резервное копирование данных для последующего хранения на защищенном сервере позволит избежать утери данных вследствие случайного удаления кем-то из пользователей. Также хранение данных на удаленном сервере позволит разграничить доступ к информации в зависимости от роли пользователя.

Как было отмечено ранее, сама база данных содержит две коллекции: экспе-

рименты и результаты обработки. Коллекция экспериментов включает в себя набор метаданных, описывающих условия, методы и параметры эксперимента. Они играют ключевую роль в воспроизводимости исследований, анализе данных и последующей экстраполяции результатов на человека. Все метаданные подразделяются на категории: общая информация об эксперименте (цель исследования – изучение острой ишемии, оценка реперфузионного повреждения, изучение субклинического атеросклероза и т. д.; авторы и учреждения; дата и место проведения; номер протокола комиссии по биоэтике), характеристики подопытных животных (вид и линия – например крысы Wistar, мыши C57BL/6, свиньи и т. д.; пол, вес и физиологическое состояние; условия содержания и рацион), архивные данные (сырые записи ЭКС СВР, фильтрованные записи ЭКС СВР, аннотации). Перечисленные метаданные являются обязательными для заполнения. К опциональной информации можно отнести данные об особенностях проведения эксперимента или описание непредвиденных случаев, произошедших в процессе проведения эксперимента, например выход из строя датчиков или включения дополнительного оборудования.

Коллекция результатов обработки представляет собой набор записей, каждая из которых содержит ссылки на различные результаты обработки экспериментов. Следует отметить, что фильтрация является частью последующей обработки, однако ее результаты хранятся в коллекции экспериментов для более удобного доступа к ЭКС СВР. Все дальнейшие процедуры проводятся как для сырых, так и для фильтрованных сигнала-

лов, а результаты сохраняются в соответствующие файлы.

Основным методом последующей обработки ЭКС СВР является проведение их спектрального анализа, включающего Фурье-преобразование, расчет гистограмм и вейвлет-преобразование. Результаты спектрального анализа хранятся в виде файла, содержащего рассчитанные оценки спектральной плотности мощности на различных этапах эксперимента. Снижение спектральной плотности мощности ЭКС СВР в ВЧ-канале при моделировании патологии является основным диагностическим маркером ее раннего развития. В связи с этим данные значения являются обязательными для хранения в БД. Помимо числовых значений результатами спектральной обработки также являются и наборы изображений, которые также заносятся в модуль хранения.

Результаты выделения характерных точек ЭКС СВР из НЧ-канала содержат файл с массивом временных отсчетов, соответствующих PQRS-пикам, полученными с помощью инструментов, описанных в работе [14]. Данная процедура в первую очередь необходима для выявления характерных изменений сегмента ST (элевацию или депрессию), которые служат общепризнанными маркерами ишемии, поэтому полученные значения также обязательно вносятся в БД.

Данные, содержащие результаты проведения синхронного анализа представляют собой файлы, содержащие набор кардиоциклов, которые разделены на кластеры и масштабированы [15]. Эти данные необходимы для дальнейшего анализа тонкой структуры высокочастотных составляющих ЭКС СВР и хранятся в виде файлов в формате .csv.

Результаты и их обсуждение

Внедрение автоматизированной системы хранения и обработки стало важным пунктом в процессе оптимизации работы с большими массивами биомедицинских данных ЭКС СВР, получаемых в процессе проведения экспериментальных исследований. Система позволила не только ускорить отдельные операции, но и в корне преобразить весь цикл записи, систематизации и анализа поступающих данных.

В процессе записи эксперимента происходит автоматическое присвоение метаданных, таких как дата, место проведения эксперимента и особые условия. По завершении процедуры эксперимента происходит валидация данных, проверка их на целостность и сохранение в структурированную базу данных. Такой подход исключает возможность неструктурированного сохранения информации, а также устраняет необходимость в трудоемких процессах ручной систематизации поступающих данных.

Одним из ключевых решений в разработке системы является переход от локального хранения информации на удаленное хранилище. Эта мера позволяет реализовывать принцип централизованного управления данными. За счет этого пропадет необходимость дублирования базы данных на каждом устройстве, участвующем в обработке. Такой подход позволяет не только экономить дисковое пространство, но и обеспечивает повышение уровня информационной безопасности, обеспечивая сохранения данных в одном централизованном, контролируемом и защищенном окружении.

Важным достижением является существенное уменьшение времени от

момента фиксации данных в ходе эксперимента до появления записи в удобном для дальнейшего анализа формате. Устранение процедуры физического переноса информации между рабочими устройствами позволяет исключить задержки, связанные с человеческим фактором и пропускной способностью каналов копирования. Также пропала необходимость вносить изменения в базу данных на каждом устройстве, где она хранится. Все это позволяет подготавливать данные к дальнейшей обработке в режиме, приближенном к реальному времени.

Реализация возможности удаленного доступа к базе данных позволяет существенно улучшить научное взаимодействие. Это позволяет обеспечить территориальную независимость научной деятельности, предоставляя возможность осуществлять анализ данных с любого устройства, имеющего подключение к интернету.

Применение системы ролевого доступа позволяет детально проработать полномочия взаимодействия с данными для каждой группы пользователей от младшего персонала, обладающего только возможностью просмотра информации до ведущих исследователей, обладающих возможностью модификации данных и изменения процедуры обработки. Такая точечная настройка прав доступа обеспечивает целостность и конфиденциальность данных, исключая возможность несанкционированного доступа, модификации или удаления данных, в т. ч. вследствие человеческой ошибки.

Рассмотрим пример использования системы разными группами исследователей (рис. 2).

№	Дата	Патология	Место	Животное	Серия	Пол	Найти
Номер протокола	Дата	Исследуемая патология	Место	Животное	Серия	Пол	Файлы
7_1	04.05.2023	Трансмуральная ишемия	Кабинет 405	Крыса	К-1226	М	Запись Анализ Протокол
9_2	25.09.2023	Трансмуральная ишемия	Кабинет 405	Крыса	К-1134	М	Запись Анализ Протокол
P_3	26.06.2023	Субэндокардиальная ишемия	Кабинет 412	Свинья	С-1522	М	Запись Анализ Протокол
K_5	26.06.2023	Контроль	Кабинет 405	Крыса	К-1226	М	Запись Анализ Протокол

а

№	Дата	Патология	Место	Животное	Серия	Пол	Найти	
Номер протокола	Дата	Исследуемая патология	Место	Животное	Серия	Пол	Файлы	Управление
7_1	04.05.2023	Трансмуральная ишемия	Кабинет 405	Крыса	К-1226	М	Запись Анализ Протокол	Изменить параметры анализа Повторить анализ Изменить данные Удалить данные
9_2	25.09.2023	Трансмуральная ишемия	Кабинет 405	Крыса	К-1134	М	Запись Анализ Протокол	Изменить параметры анализа Повторить анализ Изменить данные Удалить данные
P_3	26.06.2023	Субэндокардиальная ишемия	Кабинет 412	Свинья	С-1522	М	Запись Анализ Протокол	Изменить параметры анализа Повторить анализ Изменить данные Удалить данные
K_5	26.06.2023	Контроль	Кабинет 405	Крыса	К-1226	М	Запись Анализ Протокол	Изменить параметры анализа Повторить анализ Изменить данные Удалить данные

б

Рис. 2. Интерфейс системы для (а) группы с правами администратора и (б) группы без прав администратора

Fig. 2. The system interface for (a) a group with administrator rights and (b) a group without administrator rights

Для количественной оценки эффективности системы были определены следующие метрики: скорость выполнения запросов к БД по ключевым метаданным (например, выборка всех экспериментов по виду животного), которая не превышает 150 мс; степень сокращения ручных операций при подготовке данных к анализу, оцененная как отношение времени, затрачиваемого вручную в старой схеме работы, к времени в новой схеме. Надежность хранения обеспечивается схемой репликации данных на удаленном сервере и ежедневным резервным копированием.

Внедрение автоматизированной процедуры анализа, включающей систематизацию и сохранение результатов в базу данных, позволило достичь существенного сокращения времени на цикл обработки данных – на 40% от момента

регистрации сигнала до момента получения интерпретируемых результатов, с 3,5 до 2 ч в среднем по результатам обработки 80 экспериментов. Подобное увеличение производительности обусловлено устранением ключевой причины задержки – асинхронности в модификации и использовании аналитических модулей.

Ранее необходимость ручного обмена данными между множеством рабочих станций и инструментов, которые разрабатывались в разное время разными научными коллективами, создавала существенные задержки в исследовательском процессе, особенно в многозадачных и взаимозависимых процедурах. Новая система, являющаяся унифицированной программной средой, объединяет эти разрозненные модули и обеспечивает их последовательное исполнение.

Критически важным является не только сохранение конечных результатов анализа, но и систематический сбор и сохранение метаданных процедур обработки, которые включают временные метки выполнения операций, возникающие исключения и ошибки, а также параметры конфигурации алгоритмов. Такой подход формирует не только базу

данных результатов анализа, но и позволяет создать полноценный каталог исследовательского процесса, включающий особенности обработки каждого эксперимента.

Запись из каталога, включающая в себя метаданные из каталога, представлена ниже (рис. 3).

Информация об эксперименте			
Номер протокола	Дата эксперимента	Исследуемая патология	Место
7_1	04.05.2023	Трансмуральная ишемия	Кабинет 405
Информация о животном			
Вид	Пол	Серия	Вес
Крыса	М	К-1226	316 гр.
Сведения об исполнителе		Дополнительные сведения о животном	
Должность	Организация	Подготовка	Диета
В.н.с.	НМИЦ Алмазово	Резекция желудка	Стандартная
Результаты анализа			
Падение СГМ		Точность выделения характерных точек	
В %	Абсолютное	98.9%	
32.6	3.1		
Коэффициент увеличения падения после синхронного анализа		Точность выделения кардиоциклов с использованием вейвлет-анализа	
1.98		97.9%	
Отношение сигнал/шум до и после фильтрации			
До		После	
9		31	

Рис. 3. Демонстрация данных эксперимента в интерфейсе пользователя

Fig. 3. Demonstration of experimental data in the user interface

Накопление такой полной информации позволяет проводить недоступный ранее метаанализ. Становится возможным выявлять статистически важные зависимости между особенностями проведения эксперимента и отклонением результатов анализа от ожидаемых. Также появляется возможность выявлять особенности работы алгоритмов для их дальнейшей модификации под

определённые условия. Все это позволяет не только определять систематические погрешности, но и проводить достаточно точную калибровку параметров процедур анализа, а также определять границы применимости различных алгоритмов. В конечном итоге становится проще формулировать точные выводы и углублять интерпретацию полученных результатов.

Выводы

Разработанная методика и ее программная реализация с использованием технологий облачного хранения и анализа данных решает задачи стандартизации результатов обработки, автоматизацию процессов работы с данными и централизацию хранения данных и результатов их

обработки. Разработанная система позволяет эффективно хранить и управлять большими объемами неоднородной информации, обеспечивает ее сохранность и безопасный доступ. Все это повышает воспроизводимость, качество и скорость научных исследований в области ранней диагностики ишемии миокарда.

Список литературы

1. 2019 ESC Guidelines for the diagnosis and management of chronic coronary syndromes / J. Knuuti, W. Wijns, S. Achenbach [et al.] // *European Heart Journal*. 2020. Vol. 41, N 3. P. 407–477. <https://doi.org/10.1093/eurheartj/ehz425>.
2. Revisiting the diagnostic and prognostic significance of high-frequency QRS analysis in cardiovascular diseases: a comprehensive review / S. Qiu, T. Liu, Z. Zhan, X. Li, X. Liu, X. Xin [et al.] // *Postgraduate Medical Journal*. 2024. Vol. 100, N 1189. P. 785–795. <https://doi.org/10.1093/postmj/qgae064>.
3. Berbari E. J. High-resolution electrocardiography // *Critical Reviews in Biomedical Engineering*. 1988. Vol. 16, N 1. P. 67–103. PMID: 3293914.
4. Accuracy of advanced versus strictly conventional 12-lead ECG for detection and screening of coronary artery disease, left ventricular hypertrophy and left ventricular systolic dysfunction / T. T. Schlegel, W. B. Kulecz, A. H. Feiveson [et al.] // *BMC Cardiovascular Disorders*. 2010. Vol. 10. P. 28. <https://doi.org/10.1186/1471-2261-10-28>.
5. Amit G., Granot Y., Abboud S. Quantifying QRS changes during myocardial ischemia: Insights from high frequency electrocardiography // *Journal of Electrocardiology*. 2014. Vol. 47, N 4. P. 505–511. <https://doi.org/10.1016/j.jelectrocard.2014.03.006>.
6. Ultra-High-Resolution Electrocardiography Enables Earlier Detection of Transmural and Subendocardial Myocardial Ischemia Compared to Conventional Electrocardiography / K. V. Zaichenko, A. A. Kordyukova, D. L. Sonin, M. M. Galagudza // *Diagnostics*. 2023. Vol. 13, N 17. P. 2795. <https://doi.org/10.3390/diagnostics13172795>.
7. The FAIR Guiding Principles for scientific data management and stewardship / M. D. Wilkinson, M. Dumontier, I. J. Aalbersberg, G. Appleton, M. Axton, A. Baak [et al.] // *Scientific Data*. 2016. Vol. 6, N 1. P. 1–9. <https://doi.org/10.1038/sdata.2016.18>.
8. The practical implementation of artificial intelligence technologies in medicine / J. He, S. L. Baxter, J. Xu, J. Xu, X. Zhou, K. Zhang // *Nature Medicine*. 2019. Vol. 25, N 1. P. 30–36. <https://doi.org/10.1038/s41591-018-0307-0>.
9. Ioannidis J. P. A, Khoury M. J. Evidence-based medicine and big genomic data // *Human Molecular Genetics*. 2018. Vol. 27, N R1. P. R2–R7. <https://doi.org/10.1093/hmg/ddy065>.
10. Cunha-Oliveira T., Ioannidis J. P. A., Oliveira P. J. Best practices for data management and sharing in experimental biomedical research // *Physiological Reviews*. 2024. Vol. 104, N 3. P. 1387–1408. <https://doi.org/10.1152/physrev.00043.2023>.

11. Kunda D., Phiri H. Comparative Study of NoSQL and Relational Database // *Zambia ICT Journal*. 2017. Vol. 1, N 1. P. 1–4. <https://doi.org/10.33260/zictjournal.v1i1.8>.
12. *MongoDB in Action* / K. Banker, P. Bakum, S. Verch, D. Garrett, T. Hawkins. 2nd ed. Shelter Island; New York: Manning Publications, 2016. 480 p.
13. Thakker F., Patel R. Cloud-based Lead-I ECG Feature Extraction and One-Class SVM Classification with MongoDB Storage for Accurate Detection of Tachycardia, SR, and ST Depression // *International Journal of Computer Applications*. 2025. Vol. 187, N 63. P. 19–25. <https://doi.org/10.5120/ijca2025926038>.
14. Application of Modern Methods of Determining Characteristic Points of an Electrocardiogram for Ultra-high Resolution Electrocardiosignals / K. V. Zaichenko, A. A. Afanasenko, E. A. Denisova [et al.] // 2024 X International Conference on Information Technology and Nanotechnology (ITNT). IEEE, 2024. P. 1–4. <https://doi.org/10.1109/ITNT60778.2024.10582322>.
15. Zaichenko K. V., Afanasenko A. S., Shevyakov D. O. Application of synchronous capture for ultra-high resolution electrocardiography // *Biomedical Engineering*. 2024. Vol. 57. P. 350–352. <https://doi.org/10.1007/s10527-023-10332-5>.

References

1. Knuuti J., Wijns W., Achenbach S., et al. 2019 ESC Guidelines for the diagnosis and management of chronic coronary syndromes. *European Heart Journal*. 2020;41(3):407-477. <https://doi.org/10.1093/eurheartj/ehz425>.
2. Qiu S., Liu T., Zhan Z., Li X., Liu X., Xin X., et al. Revisiting the diagnostic and prognostic significance of high-frequency QRS analysis in cardiovascular diseases: a comprehensive review. *Postgraduate Medical Journal*. 2024;100(1189):785-795. <https://doi.org/10.1093/postmj/qgae064>.
3. Berbari E.J. High-resolution electrocardiography. *Critical Reviews in Biomedical Engineering*. 1988;16(1):67-103. PMID: 3293914.
4. Schlegel T.T., Kulecz W.B., Feiveson A.H., et al. Accuracy of advanced versus strictly conventional 12-lead ECG for detection and screening of coronary artery disease, left ventricular hypertrophy and left ventricular systolic dysfunction. *BMC Cardiovascular Disorders*. 2010;10:28. <https://doi.org/10.1186/1471-2261-10-28>.
5. Amit G., Granot Y., Abboud S. Quantifying QRS changes during myocardial ischemia: Insights from high frequency electrocardiography. *Journal of Electrocardiology*. 2014;47(4):505-511. <https://doi.org/10.1016/j.jelectrocard.2014.03.006>.
6. Zaichenko K.V., Kordyukova A.A., Sonin D.L., Galagudza M.M. Ultra-High-Resolution Electrocardiography Enables Earlier Detection of Transmural and Subendocardial Myocardial Ischemia Compared to Conventional Electrocardiography. *Diagnostics*. 2023;13(17):2795. <https://doi.org/10.3390/diagnostics13172795>.
7. Wilkinson M.D., Dumontier M., Aalbersberg I.J., et al. The FAIR Guiding Principles for scientific data management and stewardship. *Scientific Data*. 2016;6(1):1–9. <https://doi.org/10.1038/sdata.2016.18>.
8. He J., Baxter S.L., Xu J., Xu J., Zhou X., Zhang K. The practical implementation of artificial intelligence technologies in medicine. *Nature Medicine*. 2019;25(1):30-36. <https://doi.org/10.1038/s41591-018-0307-0>.

9. Ioannidis J.P.A, Khoury M.J. Evidence-based medicine and big genomic data. *Human Molecular Genetics*. 2018;27(R1):R2-R7. <https://doi.org/10.1093/hmg/ddy065>.
10. Cunha-Oliveira T., Ioannidis J.P.A, Oliveira P.J. Best practices for data management and sharing in experimental biomedical research. *Physiological Reviews*. 2024;104(3):1387-1408. <https://doi.org/10.1152/physrev.00043.2023>.
11. Kunda D., Phiri H. Comparative Study of NoSQL and Relational Database. *Zambia ICT Journal*. 2017;1(1):1-4. <https://doi.org/10.33260/zictjournal.v1i1.8>.
12. Banker K., Bakum P., Verch S., Garrett D., Hawkins T. MongoDB in Action. 2nd ed. Shelter Island, New York: Manning Publications; 2016. 480 p.
13. Thakker F., Patel R. Cloud-based Lead-I ECG Feature Extraction and One-Class SVM Classification with MongoDB Storage for Accurate Detection of Tachycardia, SR, and ST Depression. *International Journal of Computer Applications*. 2025;187(63):19-25. <https://doi.org/10.5120/ijca2025926038>
14. Zaichenko K.V., Afanasenko A.A., Denisova E.A., Shevakov D.O., Logachev E.P. Application of Modern Methods of Determining Characteristic Points of an Electrocardiogram for Ultra-high Resolution Electrocardiosignals. In: *2024 X International Conference on Information Technology and Nanotechnology (ITNT)*. IEEE; 2024. P. 1–4. <https://doi.org/10.1109/ITNT60778.2024.10582322>.
15. Zaichenko K.V., Afanasenko A.S., Shevyakov D.O. Application of synchronous capture for ultra-high resolution electrocardiography. *Biomedical Engineering*. 2024;57:350-352. <https://doi.org/10.1007/s10527-023-10332-5>.

Информация об авторах / Information about the Authors

Шевяков Даниил Олегович, младший научный сотрудник лаборатории радио и оптоэлектронных приборов ранней диагностики заболеваний человека, Институт аналитического приборостроения Российской академии наук, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, e-mail: sevakovdaniil@gmail.com, ORCID: 0000-0001-5609-4091

Daniil O. Shevyakov, Research Assistant at the Laboratory of Radio and Optoelectronic Devices for Early Diagnosis of Human Diseases, Institute of Analytical Instrumentation of the Russian Academy of Sciences, Saint Petersburg, Russian Federation, e-mail: sevakovdaniil@gmail.com, ORCID: 0000-0001-5609-4091

Денисова Елена Артемовна, младший научный сотрудник лаборатории радио и оптоэлектронных приборов ранней диагностики заболеваний человека, Институт аналитического приборостроения Российской академии наук, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, e-mail: tiranderel@yandex.ru, ORCID: 0000-0003-0329-2881

Elena A. Denisova, Research Assistant at the Laboratory of Radio and Optoelectronic Devices for Early Diagnosis of Human Diseases, Institute of Analytical Instrumentation of the Russian Academy of Sciences, Saint Petersburg, Russian Federation, e-mail: tiranderel@yandex.ru, ORCID: 0000-0003-0329-2881

Кордюкова Анна Алексеевна, младший научный сотрудник лаборатории радио и оптоэлектронных приборов ранней диагностики заболеваний человека, Институт аналитического приборостроения Российской академии наук, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, e-mail: annygm00@mail.ru, ORCID: 0000-0002-6099-4276

Anna A. Kordyukova, Research Assistant at the Laboratory of Radio and Optoelectronic Devices for Early Diagnosis of Human Diseases, Institute of Analytical Instrumentation of the Russian Academy of Sciences, Saint Petersburg, Russian Federation, e-mail: annygm00@mail.ru, ORCID: 0000-0002-6099-4276

Афанасенко Арсений Сергеевич, кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник лаборатории радио и оптоэлектронных приборов ранней диагностики заболеваний человека, Институт аналитического приборостроения Российской академии наук, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, e-mail: ar.afanasenko@gmail.com, ORCID: 0009-0001-0859-9252

Arseniy S. Afanasenko, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, Senior Researcher at the Laboratory of Radio and Optoelectronic Devices for Early Diagnosis of Human Diseases, Institute of Analytical Instrumentation of the Russian Academy of Sciences, Saint Petersburg, Russian Federation, e-mail: ar.afanasenko@gmail.com, ORCID: 0009-0001-0859-9252

Гуревич Борис Симхович, доктор технических наук, главный научный сотрудник лаборатории радио и оптоэлектронных приборов ранней диагностики заболеваний человека, Институт аналитического приборостроения Российской академии наук, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, e-mail: bgurevich48@gmail.com, ORCID: 0000-0002-7520-7087

Boris S. Gurevich, Dr. Sci. (Engineering), Chief Researcher at the Laboratory of Radio and Optoelectronic Devices for Early Diagnosis of Human Diseases, Institute of Analytical Instrumentation of the Russian Academy of Sciences, Saint Petersburg, Russian Federation, e-mail: bgurevich48@gmail.com, ORCID: 0000-0002-7520-7087