

## Формирование базы верифицированных синхронных записей 12-канальных ЭКГ-сигналов высокого разрешения и внутрисердечных электрограмм

### Аннотация

Приводится описание верифицированной базы синхронных записей ЭКГ высокого разрешения и внутрисердечных электрограмм для различных опасных нарушений ритма сердца с использованием сертифицированных средств регистрации электрофизиологических сигналов HR ECG. Разработанная база записей сформирована с использованием частоты дискретизации сигналов 1,0 кГц, аналого-цифрового преобразования с разрешением 24 бит, структурирована по типу, продолжительности записи (от 2 до 30 с) и локализации нарушений ритма сердца. Область применения разработанной базы записей – разработка и экспериментальная апробация методов и алгоритмов обработки и анализа сигналов HR ECG, микропотенциалов сердца, методов диагностики опасных нарушений ритма сердца и прогнозирования риска обострения заболевания.

### Введение

База верифицированных записей ЭКГ-сигналов является важным инструментом при разработке и тестировании алгоритмов обработки и анализа ЭКГ-сигналов, диагностики нарушений ритма сердца. В практической деятельности специалистов широкое применение получили базы верифицированных записей ЭКГ-сигналов Массачусетского технологического института (MIT) [1] и Национального института метрологии Германии (PTB) [2]. С медицинской точки зрения, эти базы записей отражают различные нарушения ритма сердца. Они содержат верифицированные записи для различных видов экстрасистолии, тахикардии, брадикардии, ишемической болезни сердца. С технической точки зрения, особенность базы записей ЭКГ-сигналов MIT состоит в том, что сигналы оцифрованы с использованием аналого-цифровых преобразователей (АЦП) с частотой дискретизации 250...360 Гц и с амплитудным разрешением до 16 бит. База записей ЭКГ-сигналов PTB выполнена с применением АЦП с частотой дискретизации 1,0 кГц и амплитудным разрешением 16 бит. В последнее десятилетие в связи с развитием технологии ЭКГ высокого разрешения (HR ECG) и ее использованием для изучения микропотенциалов сердца, являющихся предиктором целого ряда опасных нарушений ритма сердца [3]-[5], возникла острая необходимость в установлении взаимосвязи между структурно-морфологическими нарушениями миокарда сердца и пространственно-временными характеристиками микропотенциалов сердца.

В настоящее время во многих странах для регистрации ЭКГ-сигналов вне клинических условий широко используют HR ECG-мониторы, которые программно обеспечивают выделение и анализ характеристик микропотенциалов сердца. Однако отсутствие базы верифицированных записей HR ECG при различных структурно-морфологических изменениях миокарда сердца сдерживает изучение влияния нарушений распространения потенциала возбуждения на распределение эндокардиальных и эпикардиальных потенциалов, поверхностных ЭКГ-сигналов, анализ электрических потенциалов сердца для ранней диагностики и прогнозирования нарушений ритма сердца.

Для решения этой проблемы целесообразно было бы использовать записи внутрисердечных электрограмм, которые обладают большой информативностью. Для успешного извлечения полезной информации принципиально важно синхронизировать записи 12-канальных ЭКГ-сигналов и внутрисердечных электрограмм, так как форма и время появления электрических потенциалов непосредственно в зоне нарушений автоматизма или проводимости (структурно-морфологических изменений миокарда) относительно поверхностного электрокардиографического сигнала важны в электрофизиологической диагностике и подходах к инвазивному лечению аритмий.

### Цель и задачи исследования

Цель работы – формирование базы верифицированных синхронных записей 12-канальных ЭКГ-сигналов и внутрисердечных электрограмм.

Для достижения цели исследования авторами были решены следующие задачи:

- 1) обоснование медико-технических требований к базе верифицированных синхронных записей 12-канальных ЭКГ-сигналов и внутрисердечных электрограмм;
- 2) отбор пациентов для формирования верифицированных записей ЭКГ-сигналов и внутрисердечных электрограмм;
- 3) регистрация, предварительная обработка и структуризация записей, формирование базы синхронных записей;
- 4) экспериментальная апробация базы записей с использованием средств диагностики нарушений функций сердца.

### Методы исследований

Электрофизиологические исследования [6], [7] проводились у пациентов в ФГБУ «НМИЦ им. В.А. Алмазова» Минздрава России в соответствии с клиническими показаниями. Были отобраны пациенты с различными нарушениями ритма сердца (НРС), установленными на основе инструментальных исследований: различными формами экстрасистолии, фибрилляцией и трепетанием предсердий, желудочковыми тахикардиями. Акцент на нарушения ритма сердца был сделан ввиду того, что, по данным ВОЗ, каждый третий кардиологический больной страдает НРС, а нарушения ритма сердца часто становятся причиной внезапной смерти [8].

Электрофизиологические исследования проводились натощак в рентген-операционных. Регистрация и запись сигналов ЭКГ, внутрисердечных электрических потенциалов проводились при помощи системы «CardioLab» («GE healthcare», Нидерланды). Дискретизация записей внутрисердечных электрограмм осуществлялась с частотой 1,0 кГц, шаг дискретизации по амплитуде составлял 0,15 мкВ. Регистрация гемодинамических параметров проводилась с использованием монитора «DateX Ohmeda» (США). Для регистрации биполярных внутрисердечных электрограмм использовались следующие типы катетеров: дуодекаполярный катетер «Pentaray» («Biosense Webster», США) – для картирования потенциалов в желудочках сердца (межконтактное расстояние 1 мм); четырехполюсный диагностический электрод «Webster» («Biosense Webster», США) – для картирования потенциалов в желудочках сердца (межконтактное расстояние 5 мм); четырехполюсный аблационно-картирующий орошаемый катетер с окончанием 3,5 мм для картирования и абляции «NaviStar ThermoCool» или «ThermoCool SmartTouch» («Biosense Webster», США) – межэлектродное расстояние 2 мм; декаполярный электрод «Webster» («Biosense Webster», США) – для регистрации потенциалов в коронарном синусе (межэлектродное расстояние

2...5...2 мм); дуодекаполярный циркулярный электрод – для регистрации потенциалов мышечных муфт легочных вен и потенциалов предсердий «Lasso» («Biosense Webster», США) с межэлектродным расстоянием 1...2...1 мм [9]. Электрическая стимуляция с электродов проводилась программируемым стимулятором «MicroPace» («Micro Pace Ltd», Австралия).

## Решение задач исследования

### 1 Обоснование медико-технических требований к базе верифицированных синхронных записей 12-канальных ЭКГ-сигналов и внутрисердечных электрограмм

База верифицированных синхронных записей высокого разрешения (HR) 12-канальных ЭКГ-сигналов и внутрисердечных электрограмм создавалась для использования при разработке и тестировании методов, алгоритмов и программных средств обработки и анализа HR ECG-сигналов для задач диагностики нарушений ритма сердца, оценки их эффективности, оценки характеристик микропотенциалов сердца. К большинству систем мониторинга и выявления эпизодов нарушений ритма сердца сегодня предъявляются требования по выявлению коротких эпизодов фибрилляции предсердий и желудочков, видов тахиаритмий продолжительностью от 2 с. Очевидно, что при снижении длительности анализируемых фрагментов ЭКГ-сигналов менее 10 с начинают падать чувствительность, специфичность и точность методов диагностики нарушений функций сердца. Системы выявления нарушений ритма сердца должны успешно выявлять короткие эпизоды нарушений после продолжительного фрагмента нормального синусового ритма. Это означает, что база записей, наряду

с короткими фрагментами нарушений деятельности сердца не менее 2 с, должна содержать и длительные записи продолжительностью от 30 с до нескольких минут. Это требование обусловлено ограничениями на продолжительность регистрации внутрисердечных электрограмм при помощи катетеров, введенных через кровеносные сосуды. При решении задачи выявления поздних потенциалов желудочков (VLP) для снижения влияния временного усреднения на высокочастотные компоненты VLP-сигналов целесообразно использовать фрагменты HR ECG-сигналов до 10 кардиоциклов. Это означает, что и пиковые уровни peak-to-peak собственных шумов систем регистрации не должны превышать десятков нановольт. Так как в области низких частот входных цепей систем регистрации преобладают генерационно-рекомбинационные шумы активных элементов, входные каскады средств регистрации электрофизиологических сигналов должны быть малощумящими, собственные шумы входных каскадов peak-to-peak не должны превышать 10 нВ.

### 2 Отбор пациентов для формирования верифицированных записей ЭКГ-сигналов и внутрисердечных электрограмм

Для формирования базы верифицированных записей 12-канальных HR ECG и внутрисердечных электрограмм было привлечено 64 пациента, у которых по результатам предварительной электрокардиографической диагностики и/или электрофизиологического исследования были диагностированы предсердные или желудочковые тахиаритмии, а также структурно-морфологические изменения миокарда на основании визуализирующих методов исследований (эхокардиография, магнитно-резонансная томография, коронарография и др.).

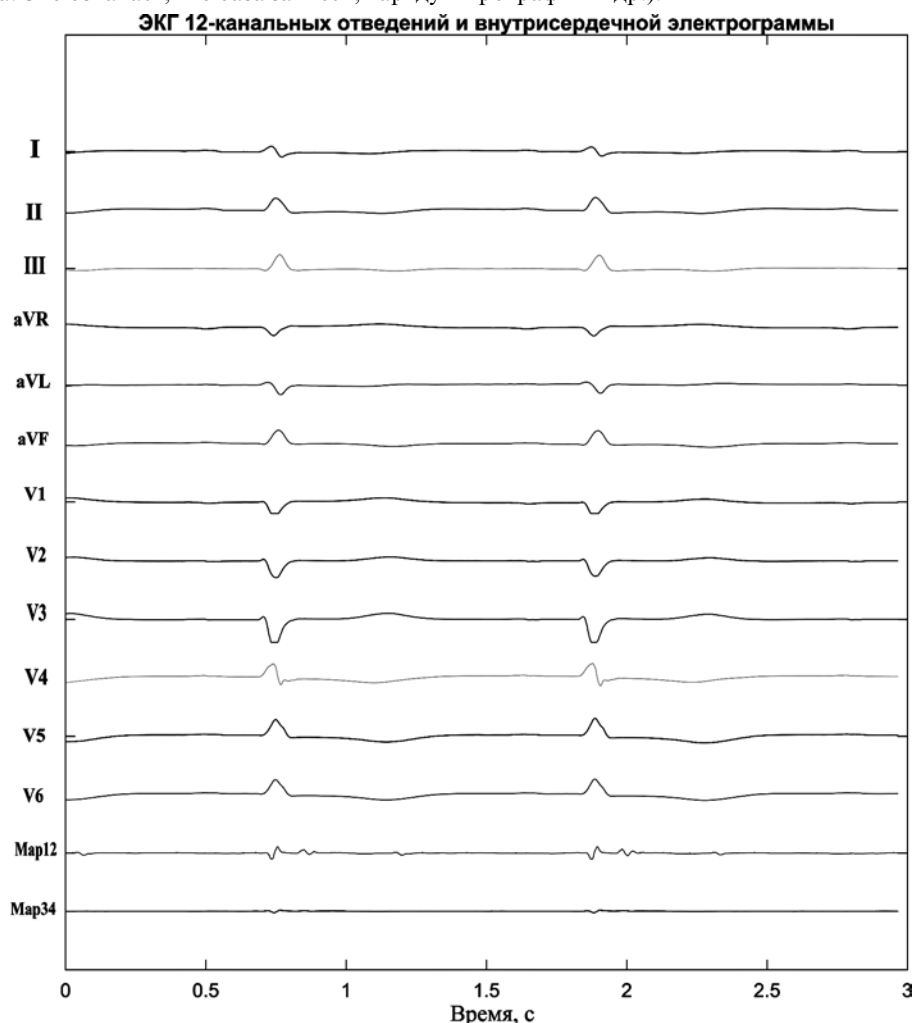


Рис. 1. Пример синхронной записи HR ECG 12-канальных отведений и внутрисердечной электрограммы

На записях сигналов, полученных от пациентов, были отмечены эпизоды нарушений ритма и эпизоды нормального синусового ритма. Все записи верифицировались сертифицированным специалистом-кардиологом. Внутрисердечные биполярные потенциалы со специфическими характеристиками (низкоамплитудные, т. е.  $< 1,5$  мВ для желудочковых и  $< 0,5$  мВ для предсердных; фрагментированные, расщепленные, поздние потенциалы) маркировались на записях отдельно.

В текущей версии базы данных зарегистрированы записи, полученные от 64 пациентов – от 3 записей на пациента. База данных содержит основную клиническую информацию о пациентах, детали их операций и аннотации медицинских экспертов к зарегистрированным записям. У каждого пациента имелась запись синусового ритма для сравнения и оценки. Демонстрация целевых типов аритмий осуществляется при помощи выборочных записей из базы данных. Персональные данные пациентов не содержатся в базе и не могут быть идентифицированы косвенным путем. Все пациенты подписывали форму согласия на предоставление медицинских данных для научных исследований. Ввиду ретроспективного характера набора данных, отсутствия влияния на тактику ведения пациентов, отсутствия регистрации персональных данных пациентов разрешение этического комитета на данное исследование не требовалось.

На рис. 1 представлен пример синхронных записей HR ECG 12-канальных отведений и внутрисердечных электрограмм. На рис. 2 представлены синхронные записи ЭКГ высокого разрешения первого отведения и внутрисердечной электрограммы желудочка сердца, содержащей поздний потенциал желудочка (VLP), обусловленный задержкой деполяризации миокарда. Появление позднего потенциала желудочка на внутрисердечной электрограмме (нижняя диаграмма рис. 2) обусловлено структурно-морфологическими нарушениями миокарда.

### 3 Регистрация, предварительная обработка и формирование верифицированной базы записей

По результатам проведенных электрофизиологических исследований была сформирована база верифицированных записей. Она состоит из коротких 2-секундных фрагментов синхронных записей HR ECG 12-канальных сигналов и внутрисердечных электрограмм, зарегистрированных в зоне структурно-морфологических нарушений миокарда и нарушений передачи потенциала возбуждения, и продолжительных фрагментов от 30 с, включающих в себя последовательность нормального синусового ритма и эпизодов нарушений ритма сердца. Эти записи структурированы по видам предсердных и желудочковых нарушений ритма. База записей включает в себя различные виды тахикардий, экстрасистолии, а также записи HR ECG, содержащие поздние потенциалы желудочков. База синхронных записей сформирована в Excel и включает в себя следующую информацию обо всех зарегистрированных записях: информацию о пациентах (идентификационный номер ID, возраст и пол); медицинский диагноз пациента, включающий в себя информацию об основном сердечно-сосудистом заболевании; базовый ритм кардиостимуляции и основной тип аритмии, обнаруженный во время операции; информацию о нескольких записях, которые выполнены для каждого пациента, включая их идентификационные номера, продолжительность и подробное описание записываемых событий и характеристик сигналов, а также информацию об операции и дате ее проведения.

Полученные в процессе электрофизиологических исследований синхронные записи HR ECG-сигналов и внутрисердечных электрограмм были подвергнуты фильтрации на предмет подавления сетевой помехи, а также шумов средств регистрации сигналов с использованием цифровых фильтров (режек-

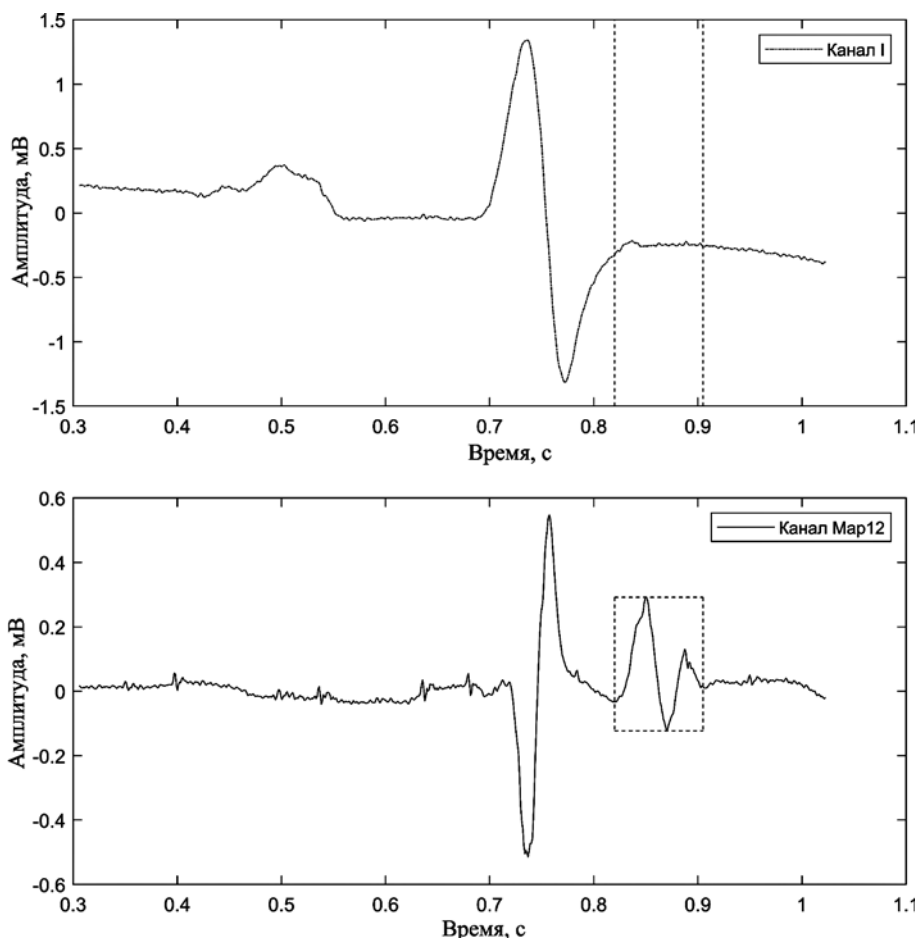


Рис. 2. Пример синхронной записи ЭКГ-сигнала первого отведения и внутрисердечной электрограммы, содержащей поздний потенциал желудочка

торный фильтр для подавления сетевой помехи и полосовой фильтр 4-го порядка в диапазоне частот от 0,5 до 400 Гц).

#### **4 Экспериментальная апробация базы записей с использованием средств диагностики нарушений функций сердца**

Верифицированная база синхронных записей 12-канальных HR ECG-сигналов и внутрисердечных электрограмм была протестирована с использованием программных средств обработки и анализа ЭКГ-сигналов высокого разрешения сертифицированных кардиомониторов КТ-07-3/12Р и КТ-07-АД-3/12Р серии «Кардиотехника-07» фирмы ООО ТД «Инкарт». База записей использовалась для выявления фибрилляции и трепетаний предсердий, оценки поздних потенциалов желудочков, различных видов экстрасистолии и тахикармий.

#### **Выводы**

Разработана база верифицированных синхронных записей ЭКГ высокого разрешения с использованием 12-канальных отведений и внутрисердечных ЭКГ. Верификация записей структурно-морфологических и функциональных нарушений сердца обеспечивалась специалистами высшей квалификации НИО аритмологии ФГБУ «НМИЦ им. В.А. Алмазова» Минздрава России на основе предварительного отбора пациентов по результатам инструментального обследования с использованием электрофизиологических и визуализирующих методов исследований (ЭКГ высокого разрешения, эхокардиография, магнитно-резонансная томография, коронарография). Регистрация и запись сигналов ЭКГ, внутрисердечных электрических потенциалов проводились системой «CardioLab» («GE healthcare», Нидерланды). Для всех сигналов частота дискретизации составляла 1,0 кГц, амплитудное разрешение для HR ECG – 24 бит, для канала регистрации внутрисердечных электрограмм шаг дискретизации составлял 0,15 мкВ.

База записей структурирована по типу, продолжительности и локализации нарушений, включает в себя записи продолжительностью 2 с и от 30 с. Использование разработанной верифицированной базы синхронных записей ЭКГ высокого разрешения и внутрисердечных электрограмм имеет большую ценность для специалистов в области разработки новых алгоритмов диагностики опасных нарушений ритма сердца на коротких интервалах времени, прогнозирования рисков осложнения нарушений сердца, сертификации технических и программных средств диагностики нарушений сердца, использования в качестве единой базы для сравнительной оценки эффективности (чувствительности, специфичности и точности диагностики) инструментальных и программных средств диагностики нарушений сердца с использованием технологии HR ECG.

*Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ), исследовательские проекты 18-29-02036 и 19-29-01009.*

#### *Список литературы:*

1. PhysioNet Databases / <https://physionet.org/about/database/> (27.06.2021).
2. PTB Diagnostic ECG Database / <https://physionet.org/content/ptbdb/> (10.05.2021).
3. Желудочковые нарушения ритма. Желудочковая тахикардия и внезапная сердечная смерть / Клинические рекомендации. МЗ РФ. 2020. 145 с.
4. Шляхто Е.В., Арутюнов Г.П., Беленков Ю.Н., Бойцов С.А., Ардашев А.В. и др. Национальные рекомендации по определению риска и профилактике внезапной сердечной смерти. – М.: Издательский дом «Медпрактика», 2018. 247 с.
5. Mellor G., Raju H., de Noronha S.V. et al. Clinical Characteristics and Circumstances of Death in the Sudden Arrhythmic Death Syndrome // Circulation: Arrhythmia and Electrophysiology. 2014. Vol. 7. Iss. 6. PP. 1078-1083.

6. Yuldashev Z., Nemirko A., Manilo L., Mikhaylov E., Lebedev D., Anisimov A. Processing of Synchronous Recordings of Surface ECG and Intracardiac Potentials for Diagnostics of Dangerous Heart Rate Disturbances / Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBEREIT). Yekaterinburg, 25-26 April, 2019.
7. Yuldashev Z.M., Nemirko A.P., Mikhaylov E.N., Lebedev D.S., Anisimov A.A., Skorobogatova A.I., Ripka D.S. Prediction of local abnormal ventricular myocardial electrical activation on surface ECG in patients with structural heart disease / Proceedings of the 13th International Conference on Biomedical Electronics and Devices, BIODEVICES 2020; Valletta, Malta, 24-26 February 2020. PP. 395-401.
8. Ревивили А.Ш., Неминуций Н.М., Баталов Р.Е. и др. Всероссийские клинические рекомендации по контролю над риском внезапной остановки сердца и внезапной сердечной смерти, профилактике и оказанию первой помощи // Вестник аритмологии. 2017. Т. 89. С. 3-104.
9. Симонова К.А., Михайлов Е.Н., Татарский Р.Б., Каменев А.В., Панин Д.В., Орианская В.С., Лебедева В.К., Гарькина С.В., Вандер М.А., Лебедев Д.С. Эпикардиальный аритмогенный субстрат у пациентов с постинфарктными желудочковыми тахикардиями: пилотное исследование // Вестник аритмологии. 2019. № 26 (1). С. 38-46.

*Зафар Мухамедович Юлдашев,  
д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой,  
Солиман Ханади,  
магистр техники и технологии, аспирант,  
Дарина Станиславовна Рипка,  
инженер,  
Анатолий Павлович Немирко,  
д-р техн. наук, профессор,  
Людмила Алексеевна Манило,  
д-р техн. наук, профессор,  
кафедра «Биотехнические системы»,  
ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский  
государственный электротехнический университет  
им. В.И. Ульянова (Ленина)»,  
Дмитрий Сергеевич Лебедев,  
д-р мед. наук, профессор РАН,  
руководитель НИО аритмологии,  
гл. научный сотрудник, профессор,  
кафедра сердечно-сосудистой хирургии,  
Институт сердца и сосудов,  
ФГБУ «Национальный медицинский  
исследовательский институт  
им. В.А. Алмазова» Минздрава России,  
Евгений Николаевич Михайлов,  
д-р мед. наук, зам. директора по научной работе,  
Институт сердца и сосудов,  
руководитель НИЛ нейромодуляции  
НИО аритмологии,  
профессор,  
кафедра сердечно-сосудистой хирургии,  
ФГБУ «Национальный медицинский  
исследовательский институт  
им. В.А. Алмазова» Минздрава России,  
Ксения Александровна Симонова,  
врач-кардиолог, мл. научный сотрудник,  
НИЛ нейромодуляции НИО аритмологии,  
ФГБУ «Национальный медицинский  
исследовательский институт  
им. В.А. Алмазова» Минздрава России,  
г. С.-Петербург,  
e-mail: zmyuldashev@etu.ru*