

*Махонин В.Е.,
студент магистратуры*

*Satbayev University
Казахстан, г. Алматы*

*Алимбаев Ч.А.,
магистр технических наук*

*докторант PhD
Satbayev University*

Казахстан, г. Алматы

*Ожикенов К.А.,
кандидат технических наук, доцент*

*Заведующий кафедры
Satbayev University*

Казахстан, г. Алматы

*Бодин О.Н.,
доктор технических наук, профессор*

*Профессор
Пензенский государственный университет*

Россия, г. Пенза

Научный руководитель: Ожикенов Касымбек Адильбекович

ПОРТАТИВНЫЙ МОБИЛЬНЫЙ КАРДИОАНАЛИЗАТОР ДЛЯ ДИСТАНЦИОННОГО МОНИТОРИНГА ЭКГ

Аннотация: В статье рассматривается портативный мобильный кардиоанализатор для оценки состояния сердца в условиях свободной активности пациента, включающий регистратор ЭКГ с внешними электродами, беспроводной передатчик для работы в сетях сотовой связи и вычислительный модуль. В качестве вычислительного модуля используется

микроконтроллер с разработанным для него программным обеспечением. Рассмотрены характеристики ближайших аналогов. Отличительными особенностями предлагаемого портативного кардиоанализатора для оценки состояния сердца в условиях свободной активности пациента являются: определение критического состояния сердца пациента в реальном масштабе времени на основе защищённых патентами способов неинвазивной кардиодиагностики и автоматический вызов службы скорой помощи при критическом состоянии сердца пациента.

Ключевые слова: *неинвазивная кардиодиагностика, портативный мобильный кардиоанализатор, дистанционный мониторинг ЭКГ, программирование микроконтроллеров, устранение дрейфа изолинии электрокардосигнала.*

Annotation: *The paper discusses a portable mobile cardioanalyser for assessing the heart condition in a patient's free activity, including an ECS recorder with external electrodes, a wireless transmitter for operation in cellular networks and a computing module. The computing module is a microcontroller with software developed for it. The characteristics of the nearest analogues are considered. Distinctive features of the proposed portable cardioassay for assessing the heart condition under conditions of patient's free activity are determination of the patient's critical heart condition in real time based on patent-protected methods of non-invasive cardiodiagnostics and automatic call of an ambulance service in case of patient 's critical heart condition.*

Keywords: *non-invasive cardiodiagnostics, portable mobile cardioassay, remote ECG monitoring, microcontrollers programming, elimination of drift of isoline of electrocardiosignal.*

Приоритетной задачей современного отечественного здравоохранения является предупреждение и профилактика сердечно-сосудистых заболеваний. Регистрация электрокардосигнала (ЭКС) с помощью мобильного устройства в течении продолжительного времени при обычном образе жизни (свободной

активности) пациента называют амбулаторным мониторингом ЭКГ [2]. Одно из наиболее известных в мире аналитических агентств Frost & Sullivan в своем отчете [5] отмечает постоянный и динамичный рост рынка амбулаторного мониторинга ЭКГ за счет технического и технологического совершенствования аппаратуры. Амбулаторный мониторинг в условиях свободной активности позволяет выявить критические состояния сердца пациента, связанные с нарушениями деятельности сердечно-сосудистой системы. Такие критические состояния возникают при физических и эмоциональных нагрузках, стрессах, зачастую в условиях профессиональной деятельности, и обычно не диагностируются при кратковременном ЭКГ-исследовании в состоянии покоя. Для решения задач амбулаторного мониторинга и выявления критических состояний в условиях свободной активности пациентов предназначены специальные телеметрические системы электрокардиографической диагностики, анализирующие ЭКС в реальном времени. Преимущество таких систем по сравнению с системами Холтеровского мониторинга, обеспечивающими отсроченный анализ ЭКС, доказано в ряде исследований [4, 6, 18].

В настоящее время электронное здравоохранение (*eHealth*) открывает уникальную возможность для развития общественного здравоохранения. Технологии *eHealth* представляют собой высокотехнологичную продукцию, системы и сервисы:

- медицинские информационные сети;
- электронные медицинские карты;
- телемедицинские сервисы;
- персональные портативные системы связи и мониторинга пациента;
- медицинские порталы и другие ИКТ-сервисы для профилактики, диагностики, лечения, мониторинга и поддержания здорового образа жизни, которые предназначены как для медицинских работников и администрации медицинских учреждений, так и для пациентов.

Укрепление здравоохранения с помощью *eHealth* позволит повысить уровень жизни и качество медико-санитарной помощи [3].

Несмотря на то, что в медицинских учреждениях электрокардиографическое исследование (ЭКГ покоя) является одной из самых распространённых процедур, регистрация ЭКС во внебольничных условиях сопряжена с рядом трудностей. Эти трудности, прежде всего, связаны с устойчивым представлением о необходимости выполнения регистрации ЭКС специально обученным медицинским персоналом и отсутствием у пациента в момент возникновения критического состояния необходимой аппаратуры для регистрации, обработки и передачи ЭКС [1].

Существует целый ряд типичных клинических ситуаций, при которых применение мобильных телеметрических систем ЭКГ-диагностики оказывается эффективным. В первую очередь речь идет о различных нарушениях сердечного ритма, остром коронарном синдроме, хронической сердечной недостаточности, приступах стенокардии [1].

Данная работа посвящена созданию портативной мобильной системы диагностики состояния сердца в рамках концепции *eHealth*. Именно такие системы позволяют в реальном времени выявить жизнеугрожающие состояния, которые можно обнаружить только при продолжительном исследовании ЭКС в условиях свободной активности пациента, при выполнении профессиональных обязанностей, при воздействии физических и эмоциональных нагрузок.

Благодаря развитию телеметрических систем ЭКГ-диагностики в ряде стран в продаже появились портативные устройства, позволяющие регистрировать и передавать ЭКС по различным каналам связи в специальные центры, где пациент может получить необходимую консультацию. Подобные технологии в последние годы стремительно развиваются и имеют оборот более миллиарда долларов в год [7]. Наиболее близкими к предлагаемой портативной мобильной системе диагностики состояния сердца в условиях свободной активности пациента известными аналогами являются:

– *AliveCor Mobile ECG* [8];

– *eMotion ECG Mobile* [9].

Рассмотрим их особенности. Пульсометр *AliveCor Mobile ECG* – это устройство, используемое для измерения частоты сердечных сокращений (ЧСС) и сердечного ритма. Прибор предназначен для быстрой и точной проверки работы сердца и записи ЭКС.

Пульсометр *AliveCor Mobile ECG* предназначен для использования лицензированными медицинскими работниками и определенной группой пациентов для записи, отображения, хранения и передачи данных ЭКС.

Пульсометр *AliveCor Mobile ECG* привязывается к любому устройству на платформе *iOS* или *Android*. Он включается автоматически и сообщается с приложением на мобильном телефоне по беспроводной связи.

Для проведения ЭКС исследования прибор держат в ладони, а электроды накладывают на фаланги пальцев обеих рук (нижняя часть телефона должна находиться справа). Датчики прибора фиксируют прикосновение кожи и, при подсоединении, он производит обратный отсчет для начала записи ЭКС. При записи ЭКС прибор также отображает ЧСС.

Пульсометр *AliveCor Mobile ECG* сообщает пользователям ценную информацию о работе их сердца и является помощником для ранней диагностики аритмии.

eMotion ECG Mobile – это система дистанционного мониторинга ЭКГ. Непрерывный мониторинг в режиме реального времени можно проводить и дома и на работе. С системой *eMotion ECG Mobile* обеспечивается безопасность пациента и более эффективное использование ресурсов.

Данные ЭКС передаются от датчика ЭКС на мобильный телефон через *Bluetooth*. В свою очередь, телефон передает данные по мобильной сети на сервер, который и хранит данные. Данные могут быть обработаны двумя способами: с помощью веб-браузера для анализа целей или с режимом мониторинга на компьютере в реальном времени. В веб-браузере специалист может исследовать и анализировать тщательно сохраненные данные ЭКС. Отчет о результатах анализа может быть отправлен на электронную почту пациента

сразу же после его проведения. Режим мониторинга позволяет контролировать несколько пациентов одновременно. ЧСС пациента можно увидеть в режиме просмотра, а сигнальные оповещения укажут на проблемы, выявленные у пациентов или на устройстве, и помогут предпринять действия. При этом, используя манометр и весы с *Bluetooth*, в этот же режим мониторинга можно добавить также информацию о кровяном давлении и весе пациента.

Кроме рассмотренных наиболее близких аналогов, известны *MobilECG* [10] и *Beurer ME 90/80* [11]. В таблице 1 приведены основные характеристики известных аналогов.

Таблица 1.

Название	Кол-во отведен ий	Время автономной работы	Режимы работы	Стоимость (руб.)
MobilECG	1-12	* 120 ч., ** 24 ч.	Сессионный мониторинг, непрерывный мониторинг *, мониторинг с передачей данных по радиоканалу**	9000
Beurer ME 90/80	1	8,5 ч.	Сессионный мониторинг	8190
AliveCor Mobile ECG	1	250 ч.	Сессионный мониторинг, непрерывный мониторинг	5100
eMotion ECG	2-6	* 27 часов	Сессионный мониторинг, мониторинг с передачей данных по радиоканалу*	250000

Как следует из анализа таблицы 1, недостатками известных аналогов являются отсутствие возможности:

- экспресс-анализа ЭКС и, как следствие, невозможность определения критического состояния сердца пациента в реальном масштабе времени и условиях свободной активности пациента. Известными аналогами осуществляется только регистрация ЭКС и передача его по радиоканалу на сервер компьютерной диагностической системы;
- вызова службы скорой помощи при критическом состоянии сердца пациента.

Устройство портативного мобильного кардиоанализатора

Предлагаемая авторами портативная система диагностики состояния сердца в условиях свободной активности пациента состоит из регистратора ЭКС с внешними электродами и модуля для работы с мобильными сетями. На рисунке 1 представлена структурная схема портативного кардиоанализатора.

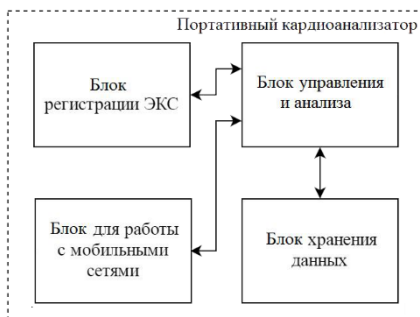


Рисунок 1. Структурная схема портативного кардиоанализатора

Как показано на рисунке 1, мобильный кардиоанализатор содержит блок регистрации ЭКС, блок управления и анализа, блок хранения данных, а также блок для работы с мобильными сетями.

В составе блока регистрации ЭКС беспроводного кардиоанализатора используется микросхема АЦП *ADS1298* [12]. Выбор данной микросхемы обусловлен большим количеством каналов и низким энергопотреблением, что позволяет проводить регистрацию большего количества реальных отведений ЭКС в течение длительного промежутка времени.

Для связи портативного мобильного кардиоанализатора с удаленным сервером, а также со службой скорой медицинской помощи, необходим канал до 24 кбит/с, поэтому в качестве приемопередатчика используется модуль, способный использовать все транспортные уровни сотовых сетей, доступные для пользователей: голосовые вызовы, *SMS*, *USSD*-запросы, передачу данных (*GSM/GPRS*). Всем вышеперечисленным требованиям соответствует модуль *SIM868* [13] фирмы *Simcom*, поддерживающий обмен данными в сетях сотовой связи *GSM/GPRS* по стандарту 2G, multi-slot Class 12 (85,6 кбит/с), прием данных местоположения и сигналов точного времени со спутников навигационных систем (*GNSS*). Для связи с другими устройствами в *SIM868* используется порт *Serial Port Interface (SPI)*.

В качестве блока хранения данных выступает сменный твердотельный накопитель формата *microSD* с объемом памяти до 32 гигабайт. Данные накопители отличает высокая скорость чтения и записи, а также низкое энергопотребление и широкая распространенность.

Блок управления и анализа представляет собой сверхнизкопотребляющий 32-разрядный микроконтроллер (МК) *STM32L* [14] семейства *ARM* на базе ядра *Cortex-M3*, соединенный с периферией через порты *SPI*, *UART*, *I²C*. МК данного семейства хорошо зарекомендовали себя в портативных устройствах за счет своего низкого энергопотребления и высокой производительности в данном сегменте МК.

Технические характеристики разрабатываемого портативного кардиоанализатора приведены в таблице 2.

Таблица 2.

Характеристика	Значение
Кол-во каналов	До 10
Частота дискретизации	500 Гц
Питание	Однополярное, 3.7 В
Работа с беспроводными сетями	<i>GSM/GRPS/EDGE</i> : 850/900/1800/1900 МГц

Программное обеспечение портативного кардиоанализатора

Разработанное авторами программное обеспечение для портативного кардиоанализатора представляет собой совокупность модулей, которые позволяют в реальном времени выявить жизнеугрожающие состояния сердца пациента. На рисунке 2 представлена схема алгоритма работы портативного кардиоанализатора в составе компьютерной диагностической системы [17].



Рисунок 2. Схема алгоритма работы портативного кардиоанализатора в составе компьютерной диагностической системы

Как следует из анализа рисунка 2, предлагаемый портативный мобильный кардиоанализатор устраняет недостатки известных аналогов и обеспечивает:

- экспресс-анализ ЭКС и, как следствие, возможность определения критического состояния сердца пациента в реальном масштабе времени и условиях свободной активности пациента;
- вызов службы скорой помощи при критическом состоянии сердца пациента.

Реализация алгоритма работы портативного мобильного кардиоанализатора представляет собой программу для 32-разрядного МК *STM32L* семейства *ARM* на базе ядра *Cortex-M3*, которая обладает следующими функциями:

1. Настройка АЦП.
2. Регистрация ЭКС.
3. Запись ЭКС в файл.
4. Предварительная обработка ЭКС.
5. Анализ ЭКС.
6. Передача ЭКС на сервер.
7. Определение местоположения пациента.
8. Вызов скорой медицинской помощи.

Рассмотрим реализацию этих функций. Для связи с АЦП используется протокол *SPI*. При этом каждый пин (*CS*, *MOSI*, *MISO*, *SCLK*) ведомого устройства (АЦП) соединен с соответствующими пинами (*SS*, *MISO*, *MOSI*, *SCLK*) ведущего устройства (МК).

Для настройки АЦП в соответствии с указанными в таблице 2 требованиями необходимо последовательно отправить значения для 4-х конфигурационных регистров *CONFIG1-4* и 8-ми *CH1-8SET* [12] в режиме обратной передачи с помощью соединения по последовательному протоколу *SPI*. Результатом описанной настройки является работа АЦП в режиме непрерывной выборки с частотой 500 Гц. При этом с каждым тактом АЦП через протокол *SPI* отправляет МК 96 бит данных, содержащих Статусный регистр (24 бита) и данные о трех стандартных отведениях по Небу [15] (72 бита). Таким образом, обеспечивается регистрация ЭКС в соответствии с Европейским стандартом *ISO 11073-91064:2009* [16].

Регистрация ЭКС производится непрерывно по стандартным отведениям по Небу, обеспечивая суточный и двухсуточный мониторинг состояния сердца в условиях свободной активности пациента, определяя при этом критические состояния сердца, такие как обширная экстрасистолия, тахи- и брадикардия,

кардиогенный шок, атриовентрикулярная блокада II и III степени, инфаркт миокарда.

В процессе регистрации ЭКС данные с АЦП записываются в оперативную MRAM память с целью устранения дрейфа изолинии ЭКС и проведения анализа ЭКС в реальном масштабе времени. Для того, чтобы не переполнять MRAM память постоянной записью большого объема информации, данные, которые уже были проанализированы, выгружаются на сменный накопитель формата *microSD* в виде текстового файла. Это позволяет использовать небольшой объем (4Mbit) одной микросхемы MRAM памяти, избегая использования дополнительных микросхем оперативной памяти.

При предварительной обработке на зарегистрированном ЭКС осуществляется устранение дрейфа изолинии. На рисунках 3 и 4 представлены соответственно схема алгоритма устранения дрейфа изолинии ЭКС в портативном кардиоанализаторе и ЭКС с дрейфом изолинии.

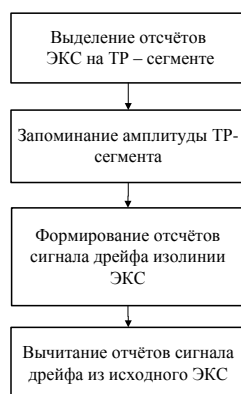


Рисунок 3. Схема алгоритма устранения дрейфа изолинии ЭКС в портативном кардиоанализаторе

Дрейф изолинии (*Baseline Wander, Base Line Drift*) представляет собой низкочастотные колебания с частотой менее 1 Гц и обусловлен влиянием на ЭКС аддитивных НЧ помех. Наибольшее влияние дрейф изолинии оказывает на анализ низкочастотных участков ЭКС, особенно ST сегментов (см. рисунок 4). Кроме того, непостоянство изолинии влияет на точность измерения амплитудных параметров зубцов, так как именно от изолинии ведется отсчет их амплитуды.

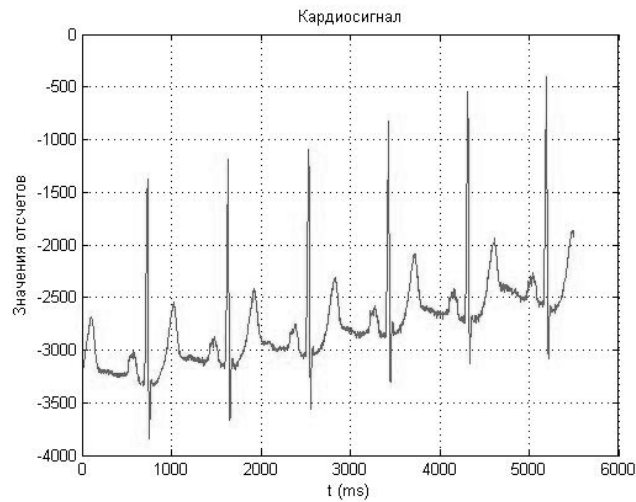


Рисунок 4. ЭКС с дрейфом изолинии

Для устранения дрейфа изолинии ЭКС в портативном кардиоанализаторе в каждом цикле сердечных сокращений на TP–сегменте выделяют и запоминают значения отсчетов ЭКС. Далее выделяют участки монотонности ЭКС, и формируют значения отсчетов сигнала дрейфа изолинии на каждом участке монотонности ЭКС путем сортировки по возрастанию (для монотонно возрастающего участка) или убыванию (для монотонно убывающего участка) значений их отсчетов. Полученный сигнал дрейфа изолинии вычитают из исходного ЭКС. Результат устранения дрейфа изолинии ЭКС в портативном кардиоанализаторе приведен на рисунке 5.

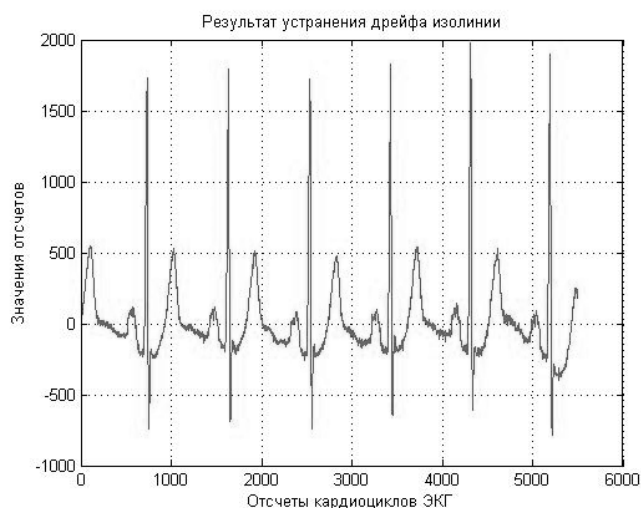


Рисунок 5. Результат устранения дрейфа изолинии ЭКС в портативном кардиоанализаторе

Как следует из анализа рисунка 5, дрейф изолинии ЭКС значительно снижается.

Для определения критического состояния сердца пациента в реальном масштабе времени и условиях свободной активности пациента выполняют экспресс-анализ ЭКС [17]. Если в ходе экспресс-анализа ЭКС обнаружено критическое состояние сердца пациента, устройство передает результаты анализа ЭКС вместе с исходными данными (участком ЭКС с подозрением на патологию) на удаленный сервер для подтверждения диагноза. Данную диагностику вправе выполнять только высококвалифицированный медицинский персонал (например, врач-кардиолог). Если диагноз подтверждается, удаленный сервер отправляет на устройство соответствующее подтверждение, при наличии которого осуществляется вызов скорой медицинской помощи к текущему местоположению пациента. Если же диагноз не подтверждается, устройство продолжает штатную работу.

Благодаря использованию модуля *SIM868* возможно осуществление вызова скорой медицинской помощи с использованием каналов сотовой связи к текущему местоположению пациента, определяемому с помощью систем глобального позиционирования GNSS (выбор спутников GPS/ГЛОНАСС/Galileo/Beidou обусловлен доступностью спутников в конкретном месте).

Заключение

Разработанный портативный мобильный кардиоанализатор представляет собой законченное полнофункциональное устройство для регистрации и анализа ЭКС в условиях свободной активности пациента, обеспечивающее работу с удаленными службами, такими как удаленные сервера медицинских учреждений и службой скорой медицинской помощи.

Данный портативный кардиоанализатор расширяет функциональные возможности известных аналогов и обеспечивает:

– экспресс-анализ ЭКС и, как следствие, возможность определения критического состояния сердца пациента в реальном масштабе времени и условиях свободной активности пациента;

– вызов службы скорой помощи при критическом состоянии сердца пациента.

Аппаратное и программное обеспечение портативного кардиоанализатора реализовано с использованием современных сред программирования на современной элементной базе.

Проведенное моделирование показало эффективность устранения дрейфа изолинии ЭКС в портативном кардиоанализаторе.

Проведенное исследование показало необходимость совершенствования методов и средств неинвазивной кардиодиагностики в рамках концепции *eHealth* для повышения уровня жизни и качества медико-санитарной помощи. Отличительными особенностями разработанного портативного мобильного кардиоанализатора для оценки состояния сердца в условиях свободной активности пациента являются: определение критического состояния сердца пациента в реальном масштабе времени на основе защищённых патентами способов неинвазивной кардиодиагностики и автоматический вызов службы скорой помощи при критическом состоянии сердца пациента.

Использованные источники:

1. Земцовский Э. В., Конобасов А. М., Трешкур Т. В. и др. Новые возможности телеметрической ЭКГ-диагностики. Сайт АО «МИКАРД-ЛАНА». [Электронный ресурс]. URL: <http://www.micard.ru/o-firme/stati/novye-vozmozhnosti-telemetriceskoj-ekg-diagnostiki>
2. Назаренко Г. И., Гулиев Я. И. Медицинские информационные системы: теория и практика. М.: Физматлит, 2005. 320 с.
3. Чайковский И.А. Возможности электрокардиографии 4-го поколения в функциональной диагностике наиболее распространенных заболеваний сердца. Кардиология: от науки к практике. 2012, № 1. С. 80-87.

4. Ярцева Е. С. Обработка электрокардиосигнала вейвлет-методом. Таганрог: ТРТУ. 2000. С. 12-16.
5. Afonso VX, Tompkins WJ., Nguyen TQ., Luo S. ECG Beat Detection Using Filter Banks. IEEE Transactions On Biomedical Engineering, Vol. 46, №. 2, February 1999, pp. 192-202.
6. mHealth – «мобильное» здравоохранение в современном мире. Блог компании Medgadgets. [Электронный ресурс]. URL: <http://habrahabr.ru/company/medgadgets/blog/227159/> (дата обращения: 23.06.2014).
7. Mobile health market report 2013-2017 the commercialization of mhealth applications (vol. 3). [Электронный ресурс]. URL: <https://research2guidance.com/wp-content/uploads/2015/08/Mobile-Health-Market-Report-2013-2017-Preview.pdf>
8. AliveCor Kardia Mobile ECG for iPhone and Android. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.alivetec.com/pages/alivecor-heart-monitor/>
9. eMotion ECG Mobile - real time ECG measuring. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.megaemg.com/wp-content/uploads/2013/01/800734-1.0-eMotion-ECG-brochure.pdf>
10. MobilECG – open source electrocardio-graphy URL: <http://mobilecg.hu/device.html>
11. Beurer - Mobile ECG device – ME-90. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.beurer.com/web/gb/products/medical/ecg-and-pulse-oximeter/mobile-ecg-device/me-90-bluetooth.php>
12. A. Kuzmin, M. Safronov, O. Bodin, M. Petrovsky, A. Sergeenkov. Device and Software for Mobile Heart Monitoring. Proceedings of the 19th Conference of Open Innovations Association FRUCT. Publisher: FRUCT Oy, Helsinki, Finland. 2016, pp. 121-127.
13. SIM868 module is a complete Quad-Band GSM/GPRS module which combines GNSS technology for satellite navigation. [Электронный ресурс]. URL: <https://simcom.ee/modules/gsm-gprs-gnss/sim868/>

14. STM32L1 series of ultra-low-power MCUs. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.st.com/en/microcontrollers-microprocessors/stm32l1-series.html>
15. Орлов В.Н., Руководство по электрокардиографии. М.: Мед. информ. агентство (МИА), 2012. 560 с.
16. Health informatics - Standard communication protocol - Part 91064: Computer-assisted electrocardiography, ISO 11073-91064, 2009
17. Патент 2567271 РФ. Способ экспресс-оценки электрической стабильности сердца / О.Н. Бодин, А.Г. Иванчуков, Л.Ю. Кривоногов, М.А. Петровский, Ф.К. Рахматуллоев // Заявл. 16.07.2013; Опубл. 10.04.2015. Бюл. №10.
18. Волкова Н.А., Алгоритм диагностики состояния сердечно-сосудистой системы по результатам многократных измерений артериального давления и пульса / Н.А. Волкова // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки.