

Система удаленного мониторинга сердечного ритма для выявления эпизодов фибрилляции предсердий

Аннотация

Рассматриваются метод и система для удаленного on-line мониторинга сердечного ритма пациента и формирования сигнала тревожной сигнализации при выявлении эпизодов фибрилляции предсердий. Предлагаются структура системы, алгоритмы и решающее правило для выявления эпизодов, алгоритмы формирования сигналов тревожной сигнализации пациента и врача, обсуждаются результаты апробации системы с использованием базы верифицированных записей электрокардиографических сигналов.

Актуальность

Фибрилляция предсердий (ФП) относится к числу нарушений сердечного ритма, развитие которых приводит к серьезным заболеваниям сердечно-сосудистой системы. Болезнь охватывает различные возрастные группы, она увеличивает риски инсульта и смерти. Поэтому проблемы своевременной диагностики и повышения эффективности лечения ФП относятся к числу актуальных проблем кардиологии.

Методы диагностики ФП в настоящее время хорошо отработаны и широко используются в клинической практике. Это прежде всего длительное холтеровское мониторирование сердечной деятельности, выявление эпизодов ФП, скрупулезные кардиологические исследования пациента в клинических условиях, результаты которых используются для разработки тактики лечения и медицинского сопровождения пациента. Однако остается часть пациентов, которые в силу разных причин вынуждены вести активный образ жизни, находиться вне стен лечебного учреждения и в случае развития эпизода ФП будут нуждаться в получении экстренной медицинской помощи. Речь идет не только о пациентах с пароксизмальной (временной) формой ФП, оперативная информация от которых об увеличении частоты и продолжительности нарушений может быть использована врачом для разработки тактики лечения, но и о пациентах с персистирующей (постоянной) формой ФП для оказания им экстренной медицинской помощи.

Цель проведенного исследования – разработка носимой системы для удаленного on-line выявления эпизодов ФП, тревожной сигнализации врача и поддержки принятия решения врачом по медицинскому сопровождению пациента.

Для достижения поставленной цели решены следующие задачи:

1. Разработка метода и носимой системы для удаленного on-line мониторинга деятельности сердца в условиях активной жизнедеятельности пациента, выявления эпизодов ФП и оперативного информирования врача.
2. Разработка алгоритмов выявления эпизодов ФП при регистрации электрокардиографического сигнала (ЭКС) в условиях активной жизнедеятельности пациента, оценки частоты и продолжительности эпизодов ФП.
3. Разработка алгоритмов поддержки принятия решений врачом по удаленному медицинскому сопровождению пациента при выявлении эпизодов ФП.
4. Апробация разработанных методов и носимой системы для удаленного on-line выявления эпизодов ФП и медицинского сопровождения пациента.

Решение поставленных задач

Задача № 1. Система удаленного мониторинга деятельности сердца решает комплекс задач, направленных на съем и регистрацию ЭКС, обработку и анализ информации, принятие решения, поэтому она должна иметь многоуровневую струк-

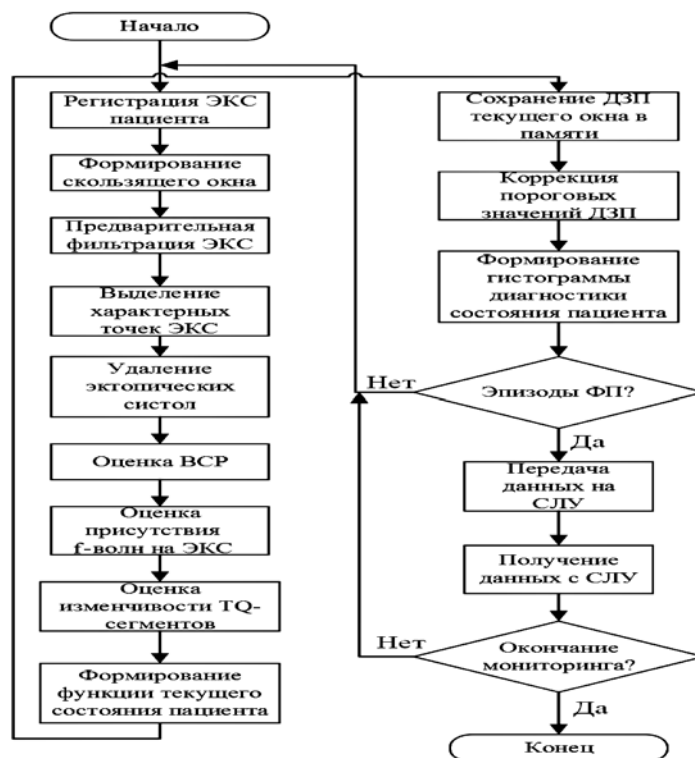


Рис. 1. Алгоритм выявления эпизодов ФП при регистрации ЭКС

туру, в которой каждый уровень обеспечивает эффективное решение конкретной задачи [1].

Первый уровень системы представлен носимым устройством пациента, который решает задачу съема и длительной непрерывной регистрации ЭКС в условиях активной жизнедеятельности пациента, проявления миографических помех и двигательных артефактов. Далее ЭКС передается через канал Bluetooth на второй уровень.

Второй уровень системы представлен смартфоном пациента, который решает задачу обработки ЭКС, оценки диагностически значимых показателей (ДЗП), характеризующих состояние пациента, оценки текущего состояния пациента, анализа ДЗП для формирования сигнала тревоги при эпизодах ФП, оповещения пациента о критических состояниях, передачи биомедицинской информации по каналу WLAN на сервер лечебного учреждения (СЛУ). Для решения этих задач второй уровень системы должен иметь высокопроизводительный процессор.

На третьем уровне системы осуществляется анализ динамики развития ФП с использованием облачных технологий СЛУ. Здесь осуществляются оценка частоты наступления эпизодов ФП у пациента, определение гистограммы распределения эпизодов ФП «частота – продолжительность», выявление трендов в развитии ФП, формирование сигнала тревоги для оперативного оповещения лечащего врача о выявлении эпизодов ФП у пациента.

Четвертый уровень системы представлен смартфоном врача, который получает при наступлении у пациента эпизодов ФП показатели его текущего состояния, гистограмму распределения «частота – продолжительность» эпизодов ФП, информацию о динамике изменения ДЗП, типовые решения, рекомендуемые врачом для оказания медицинской помощи. Лечащий врач на основе анализа получаемой информации принимает решение об оказании требуемой медицинской помощи.

Задача № 2. При наступлении ФП наблюдаются хаотичная активность предсердия, нерегулярность деятельности сердца, увеличение вариабельности сердечного ритма (ВСР), дисперсия изменения частоты сердечных сокращений, появление низкоамплитудных f-волн с частотой от 3 до 12 Гц, пропадание R-зубцов ЭКС. Известно, что при ФП f-волны лучше регистрируются в отведениях II, III, V1, V2, aVF. Это обусловило выбор грудного отведения для регистрации ЭКС.

На первом этапе обработки ЭКС осуществляется предварительная фильтрация сигнала (рис. 1). Здесь используются медианные фильтры для устранения дрейфа изолинии. Сигнал далее сглаживается с помощью фильтра Савицкого-Голея и нормируется для дальнейшей обработки.

На втором этапе выделяются характерные точки ЭКС. Для выделения R-зубцов QRS-комплексов был применен алгоритм Пан-Томпкина [2]. Этот алгоритм, рассчитанный на работу в реальном масштабе времени, состоит из этапов: низкочастотной фильтрации, дифференцирования, возведения в квадрат, интегрирования сигналов, адаптивной пороговой процедуры и процедуры поиска. Точки Q, S, начало и конец QRS-комплекса определяются с помощью окна шириной 120 мс относительно R-зубцов, так как он определяет участок кардиоцикла ЭКС, на котором ожидается появление этих зубцов. Конец T-волны обнаруживается алгоритмом Zhang [3], при котором используется скользящее окно с интегрированием.

На ЭКС пациента часто встречаются эктопические систолы, такие как экстрасистолы и преждевременные предсердные комплексы. Поэтому для последующей обработки ЭКС нужно обнаружить эти комплексы и удалить их с использованием метода P. Langley [4]. По каждому скользящему окну вычисляется среднее значение \overline{RR} -интервалов. Эктопические систолы обнаруживаются, когда $RR(k) \leq 0,8\overline{RR}$ и экстрасистолы, преждевременные предсердные комплексы и артефакты определяются, если выполняются следующие условия:

$$\begin{cases} 0,9\overline{RR} \leq RR(k+1) \leq 1,1\overline{RR}; \\ RR(k+1) - \overline{RR} > 0,3[\overline{RR} - RR(k)]; \\ 0,9\overline{RR} \leq RR(k) + RR(k+1) \leq 1,1\overline{RR}. \end{cases}$$

На третьем этапе осуществляется оценка ВСР, для чего вычисляются следующие характеристики: размах ВСР dRR , среднее значение частоты сердечного ритма $RRmean$ и дисперсия ВСР $disRR$:

$$\begin{cases} dRR = RR \max - RR \min; \\ RRmean = \sum RR / N_B; \\ disRR = \sqrt{\sum (RR - RRmean)^2 / (N_B - 1)}. \end{cases}$$

Выбираем значения порогов $Thr1$ и $Thr2$ для изменения соответственно dRR и $disRR$, N_B – общее количество кардиоциклов после удаления эктопических систол. Событие рассматривается как аритмия (пароксизмальная суправентрикулярная тахикардия), если $RRmean$ достаточно малое при малых отклонениях dRR и $disRR$.

Для оценки присутствия f-волн на ЭКС осуществляется синхронизация TQ-сегментов, вычисляется евклидово расстояние между рассматриваемым TQ-сегментом и усредненным TQ-сегментом по следующей формуле:

$$De = \frac{\|TQ_j - \overline{TQ}\|}{\|TQ_j\|}.$$

При нарастании ФП увеличивается изменчивость TQ-сегмента относительно усредненного значения. Задаем некоторый порог $D\phi$, при котором $De \geq D\phi$, и вычисляем $VarDe$. Признаком нарастания ФП является выполнение условия

$$VarDe = \frac{N_{De \geq D\phi}}{N_B} \geq 0,5.$$

При наступлении ФП увеличиваются размах ВСР S_1 , дисперсия ВСР S_2 и значение евклидова расстояния S_3 , что отражает появление хаотичных f-волн на TQ-сегментах ЭКС. Факт появления эпизодов ФП определяется на основе логической функции текущего состояния пациента $F_{TS} = S_1 \wedge S_2 \wedge S_3$.

На четвертом этапе осуществляются сохранение ДЗП текущего окна в памяти и коррекция пороговых значений ДЗП.

Для определения гистограммы распределения ФП «частота – продолжительность» учитывается диапазон продолжительности $[T_{MIN}, T_{MAX}]$ наблюдавшихся эпизодов ФП, подсчитывается суммарное количество N_c эпизодов ФП, например за сутки, а также количество N_j эпизодов ФП, наблюдавшихся в j-м интервале продолжительности эпизодов ФП $[T_j, T_{j+1}]$, где $T_j = j(T_{MAX} - T_{MIN}) / M$, $j=1, M$, M – количество интервалов наблюдения.

На следующем этапе гистограмма распределения «частота – продолжительность» и ДЗП для эпизодов ФП передаются на СЛУ для мониторинга динамики нарушений сердечного ритма пациента.

Для оценки эффективности разработанного алгоритма выявления эпизодов ФП были использованы база данных MIT-BIH AF Database и клиническая база данных Федерального исследовательского центра им. В.А. Алмазова. Клиническая база данных содержала 40 эпизодов ФП по трем отведениям, которые регистрировались в течение ~ 70 ч (63 420 000 отсчетов) с частотой дискретизации $Fd1 = 250$ Гц; MIT-BIH база данных включала в себя 25 записей (два ЭКС по каждой записи) с частотой дискретизации $Fd2 = 250$ Гц. Для выявления эпизодов ФП использовалось скользящее окно продолжительностью 10 с.

Задача № 3. Для поддержки принятия решений врача по удаленному медицинскому сопровождению пациента при ФП предлагается алгоритм, представленный на рис. 2. При запуске системы тревожной сигнализации смартфон врача находится изначально в режиме ожидания сигнала тревоги.

Сигнал тревоги о выявлении эпизода ФП формируется смартфоном пациента, далее он поступает на СЛУ и передается на смартфон врача. Наряду с сигналом тревоги врач получает диагностически значимые показатели (значения ВСР, дисперсия ВСР, отклонение продолжительности TQ-сегмента относительно среднего значения, преобладающая частота f-волн,

продолжительность эпизода ФП), гистограмму распределения «частота – продолжительность» за интересующий промежуток времени мониторинга состояния пациента, динамические характеристики, отражающие изменение частоты и продолжительности наблюдавшихся эпизодов ФП. Врачу предъявляется также список типовых решений (рекомендаций), соответствующих текущему состоянию пациента, для оказания медицинской помощи. После ознакомления с представленной информацией врач принимает решение об оказании конкретной помощи пациенту. Решение врача передается на СЛУ и, если необходимо, на смартфон пациента для оказания ему информационной помощи. При частом повторении сигналов тревоги, что говорит об отрицательной динамике состояния здоровья пациента, врачом принимается решение о госпитализации пациента.

Задача № 4. Для проверки работоспособности системы и предложенных алгоритмов была проведена реализация элементов многоуровневой системы.

Носимое устройство пациента реализовано на усилителе биопотенциалов AD8232, характеризующемся высокой чувствительностью, микроконтроллере STM32F407VG, содержащем 12-разрядный аналого-цифровой преобразователь, контроллере Bluetooth BC417, обеспечивающем надежную передачу сигналов на смартфон пациента до 15 м.

Для реализации разработанного алгоритма на смартфоне/планшете используется Android NDK, который поддерживает использование языка высокого уровня C / C++. Для выявления коротких эпизодов, которые часто встречаются при ФП, используются скользящее окно продолжительностью 10 с и импульсы дискретизации с частотой 250 Гц. Скользящее окно сдвигается дискретно на величину шага в 300 отсчетов. На рис. 3 и 4 представлены результаты оценки ВСП и изменчивости TQ-сегментов ЭКС для состояния нормы и ФП соответственно, полученные для сигнала 08215 из базы MIT-BIH AF Database.

Предложенные методы и алгоритмы выявления эпизодов ФП были протестированы на выборке 1000 фрагментов различных записей ЭКС пациентов для состояния нормы и ФП. Показатели чувствительности Se , специфичности Sp и точности Acc классификации составили соответственно 93, 95 и 94 %.

Выводы

1. В целях обеспечения высокой достоверности выявления эпизодов ФП в условиях активной жизнедеятельности пациента диагностическое правило должно учитывать несколько признаков проявления нарушений сердечного ритма: увеличение ВСП, увеличение дисперсии ВСП, отсутствие P-зубца, появление f-волн, увеличение вариабельности TQ-сегмента.

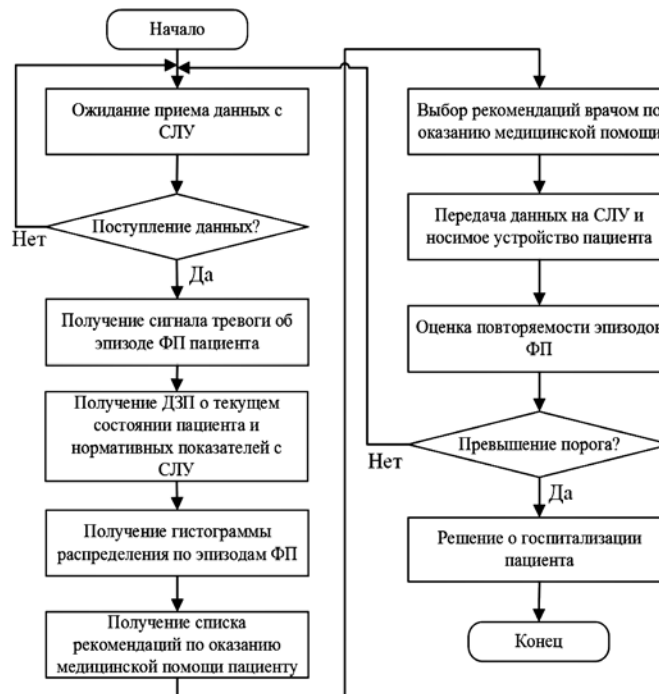


Рис. 2. Алгоритм поддержки принятия решений врачом при ФП

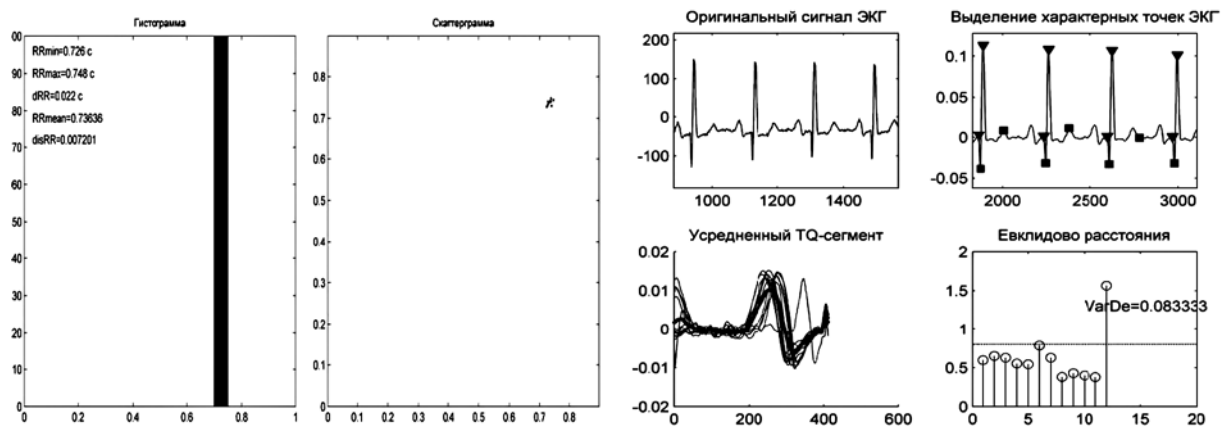


Рис. 3. ВСП и изменчивость TQ-сегментов в норме

2. Обработка ЭКС и выявление ФП должны осуществляться на втором уровне системы – смартфоне пациента. ДЗП, характеризующие ФП, а также частота и продолжительность эпизодов должны передаваться на третий уровень системы – СЛУ только при выявлении эпизодов патологии. Наряду с сигналом тревоги лечащий врач должен получать значения ДЗП, информацию об их динамике, гистограмму распределения «частота – продолжительность» эпизодов ФП.

3. Экспериментальная апробация разработанной системы показала возможность использования предложенных методов и алгоритмов обработки, анализа и тревожной сигнализации для задач удаленного непрерывного on-line мониторинга состояния пациентов с нарушениями сердечного ритма и информирования врача об эпизодах ФП пациента с целью оказания необходимой медицинской помощи.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 16-07-00599 «Модели, методы и система интеллектуального телемедицинского мониторинга состояния здоровья человека и прогнозирования обострения заболеваний».

Список литературы:

1. Юлдашев З.М., Пустозеров Е.А., Анисимов А.А. Многоуровневая интеллектуальная система удаленного мониторинга состояния здоровья людей с хроническими заболеваниями // Биотехносфера. 2016. № 5 (47). С. 2-8.

2. Pan J., Tompkins W.J. A real-time QRS detection algorithm // IEEE Trans. Biomed. Eng. 1985. Vol. 32. PP. 230-236.
3. Zhang Q., Manriquez A.I., Medigue C., Papelier Y., Sorine M. An algorithm for robust and efficient location of T-wave ends in electrocardiograms // IEEE Trans. Biomed. Eng. 2006. Vol. 53. № 12. PP. 2544-2552.
4. Langley P., Bernardo D., Allen J., Bowers E., Smith F.E., Vecchiotti S., Murray A. Can paroxysmal atrial fibrillation be predicted? // Computers in Cardiology. 2001. Vol. 28. PP. 121-124.

Чонг Туен Нгуен,
аспирант,

Зафар Мухамедович Юлдашев,
д-р техн. наук, профессор,

Елена Владимировна Садыкова,
канд. техн. наук, доцент,

кафедра биотехнических систем,
Санкт-Петербургский государственный
электротехнический университет «ЛЭТИ»

им. В.И. Ульянова (Ленина),

г. С.-Петербург,

e-mail: yuld@mail.ru

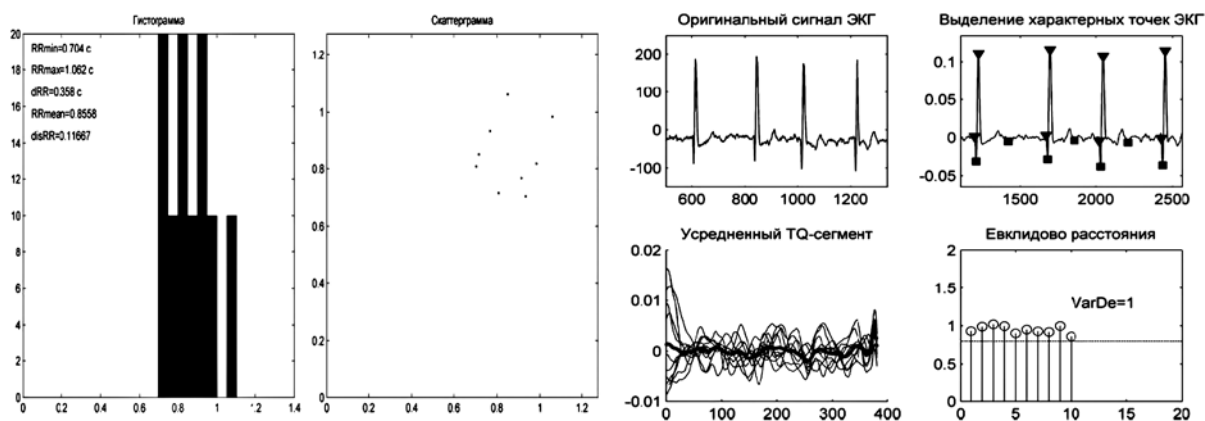


Рис. 4. ВСР и изменчивость TQ-сегментов при ФП

В.А. Рябый, В.П. Савинов, В.Г. Якунин, Ю.А. Пирогов, И.А. Родин

Высокоресурсный плазматрон для применения в медицине

Аннотация

Рассматриваемая работа посвящена изучению свойств плазматрона нового типа с высоким ресурсом работы и сверхчистой плазменной струей методами эмиссионной спектроскопии, тепловидения и химического барботирования. Представлены результаты измерений концентрации химических радикалов NO и NO₂, а также распределения температуры газа вблизи струи плазмы, характеризующие возможности применения данного плазматрона в медицине.

Введение

До конца прошлого века существовали большие проблемы в лечении ран различного происхождения: послеоперационных ран в общей хирургии, онкологии, травматологии и др. К этому времени было установлено, что универсальным регулятором разнообразных биологических и физиологических процессов является оксид азота (NO), который продуцируется в организмах живых существ, включая человека [1]. В случае медленно заживающих ран продуцирование NO снижается и необходим дополнительный подвод NO. Новое медицинское направление (NO-терапия) потребовало создания генераторов

NO. Эффективным методом генерации NO является его синтез с использованием газоразрядной плазмы и атмосферного воздуха [2], [3]. Применялся диэлектрический барьерный разряд для исследования роли химически активных радикалов, теплоты и УФ-излучения в организации бактерицидных процессов [4], [5]. Для аналогичных целей использовался источник плазмы с создаваемой ВЧ-полем плазменной струей, состоявший из керамического сопла с игольчатым электродом под ВЧ-потенциалом на оси и заземленным кольцевым электродом на выходе сопла [6]. Разработаны электрохирургические плазменные аппараты с возбуждением ВЧ-тлеющего разряда в объеме электролита вокруг металлического электрода