

МОБИЛЬНОЕ УСТРОЙСТВО ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ СЕРДЕЧНО СОСУДИСТОЙ СИСТЕМЫ ЧЕЛОВЕКА

MOBILE DEVICE FOR DIAGNOSTICS OF HUMAN CARDIOVASCULAR SYSTEM

V. Sokol'sky
I. Petrova
I. Kitiashvili

Annotation

In this article the integrated set of measured values and computational informative parameters for the mobile diagnostic devices used for monitoring and diagnostics of cardiovascular system of the person is brought. Methods of definition of current values of controllable parameters are examined, their merits and demerits are revealed. For most effective estimation of a condition of cardiovascular system of the person (definition of parameters of central and peripheral hemodynamics, control parameters of transport of oxygen) it is necessary to use the complex method including volumetric compression oscillometry, electrocardiography, blood pressure measurement by pulse wave together with a method of an estimation of requirement of an organism of the patient in oxygen. Modular scheme of the mobile diagnostic device were presented. The scheme includes the set of modules which defined a balance between degree of importance of controllable parameters and complexity in its realization. All modules have built-in batteries, equipped with non-contact charging system that supports wireless communication channel, and boxed in waterproof, ergonomic case. Results of testing of separate blocks of mobile diagnostic device were described in the article.

Keywords: mobile diagnostic device (MDD), cardiovascular system (CVS), hemodynamic parameters, cardiac index, oxygen delivery index.

Сокольский Виталий Михайлович
К.т.н., ООО "Системы, технологии
и сервис", г. Астрахань

Петрова Ирина Юрьевна
Д.т.н., ГАОУ АО ВО "Астраханский
государственный архитектурно-
строительный университет"

Китиашвили Ираклий Зурабович
Д.м.н., ГБОУ ВО "Астраханский
государственный медицинский
университет"

Аннотация

В статье проведен систематизированный выбор измеряемых величин и расчетных информативных параметров для мобильных диагностических устройств, используемых для мониторинга и диагностики сердечно-сосудистой системы человека. Рассмотрены методы определения текущих значений контролируемых параметров, выявлены их достоинства и недостатки. Показано, что для наиболее эффективной оценки состояния ССС пациента (определения параметров центральной и периферической гемодинамики, контроля параметры транспорта кислорода) следует использовать комплексный метод, включающий объемную компрессионную осциллометрию, электрокардиографию, анализ пульсовой волны совместно с методом оценки потребности организма пациента в кислороде. Представлена функциональная схема мобильного диагностического устройства, в которой определен набор модулей при соблюдении баланса между степенью важности контролируемого параметра и сложности в его реализации. Приведены результаты испытаний отдельных модулей МДУ.

Ключевые слова:

Мобильное диагностическое устройство (МДУ), сердечно-сосудистая система (ССС), гемодинамические параметры, сердечный индекс, индекс доставки кислорода.

Введение

Современные технологии позволяют дистанционно контролировать комплекс основных гемодинамических параметров пациента. Данные получаемые от пациента находящегося дома, в привычной обстановке, при минимальной стрессовой нагрузке являются наиболее информативными и позволяют более точно скорректировать курс лечения.

В статье [1] рассмотрены перспективы создания дистанционных систем мониторинирования состояния сердечной деятельности пациента и внедрения их в России, по-

казана актуальность этой проблемы.

В связи с тем, что мобильные диагностические устройства (МДУ) предназначены для широкого распространения среди населения, для использования в домашних условиях, важным показателем таких устройств является соблюдение баланса между степенью важности контролируемого параметра и сложности в его реализации. Это определяет соотношение цена/качество идентификации состояния сердечно-сосудистой системы (ССС) человека. Обоснование выбора модулей МДУ для анализа достаточного и полного набора показателей гемодинамики для мониторинирования ССС является важной задачей.

1. Набор измеряемых и расчетных параметров МДУ

Полное представление о состоянии системы кровообращения пациента, можно получить, зная параметры не только периферической, но и центральной гемодинамики. Сердечный индекс (СИ) – основной параметр, характеризующий состояние центральной гемодинамики. Его контроль в реальном времени – ключевая задача при оценке текущего состояния пациента. В настоящее время функция измерения СИ реализована только в специализированных кардиологических прикроватных мониторах и не встречается в МДУ.

Для оценки текущего состояния пациента, и своевременного выявления начальных проявлений гемодинамических и кислородотранспортных нарушений целесообразно контролировать индекс доставки кислорода.

Авторами проведен анализ основных параметров, позволяющих оценить текущее состояние пациента с позиций периферической и центральной гемодинамики, транспорта кислорода. Все параметры разделены на 2 группы: "измеряемые" и "расчетные". Расчетные параметры вычисляются в МДУ на основе проведенных измерений.

К измеряемым параметрам отнесены: артериальное давление диастолическое, конечное систолическое давление, боковое артериальное давление, среднее артериальное давление, частота пульса, частота сердечных сокращений и дыхательных движений.

К расчетным параметрам отнесены: артериальное давление систолическое, ударное и пульсовое, удельное и общее периферическое сопротивление сосудов, ударный объем, ударный индекс, диаметр аорты, фракция выброса левого желудочка, конечно диастолический и систолический радиусы и объемы, ударный объем, скорость и время распространения пульсовой волны, сатурация кислорода, сердечный выброс (минутный объем), сердечный индекс, содержание гемоглобина в крови, содержание O₂ в артериальной крови, индекс доставки кислорода.

Расчетные параметры могут быть получены, используя следующие методы: метод объемной компрессионной осциллометрии, метод анализа пульсовой волны, электрокардиографический метод (анализ ЭКГ). Для оценки транспорта кислорода используются дополнительно данные пульсоксиметрии. В результате получаем достаточный материал для комплексной оценки состояния ССС пациента.

2. Методы для расчета параметров периферической и центральной гемодинамики.

Рассмотрены наиболее перспективные неинвазивные методики, позволяющие производить расчеты параметров периферической и центральной гемодинамики.

Электрокардиографический метод позволяет определить основные функциональные характеристики кардиогемодинамики левого желудочка сердца на основе моделирования трансформации параметров электрокардиосигнала (ЭКС). Экспериментальные исследования пространства ЭКС с позиции антенно-волновой теории показали зависимость его временных параметров и механической деятельности сердца, а также возможность оценки функциональных объемов левого желудочка по ЭКГ [2].

Метод объемной компрессионной осциллометрии (ОКО) – косвенный, неинвазивный метод определения уровней артериального давления (АД) у человека путем регистрации объемных артериальных осциллограмм. ОКО состоит из отдельных пульсовых волн (ПВ) крупной артерии, зарегистрированных в процессе повышения давления в пережимной манжете с линейной амплитудной характеристикой по всему тракту преобразования и усиления. Анализируя ПВ можно измерять диастолическое, среднее, боковое систолическое и конечное систолическое давление в магистральном артериальном сосуде и на основании полученных данных произвести расчет целого ряда гемодинамических параметров, включая и сердечный индекс (СИ) [3]. При измерении давления, осциллометрическим способом, нет необходимости нагнетать давление в манжете до систолического, достаточно поднять давление в манжете до среднего артериального, а систолическое давление рассчитать [4]. Недостаток метода – чувствительность к вибрациям, возникающим при движении пациента. При мониторинговании в условиях с ожидаемой физической нагрузкой, для обеспечения бифункционального (АД + ЭКГ) мониторингования, авторами [5] использовался аускультативный метод измерения давления (вместо фонендоскопа используется микрофон). При этом метод остается чувствительным к внешнему шуму. Поэтому в МДУ используется акселерометр для измерения давления, когда человек находится в покое.

Из других методов, позволяющих произвести оценку АД без применения компрессионной манжеты, следует отметить метод измерения АД по времени распространения пульсовой волны (ПВ). При его использовании не требуется создавать никаких механических воздействий. Скорость распространения ПВ можно определять по разности моментов появления характерных пиков электрокардиосигнала и сигнала фотодатчика, который вместе с

осветителем крепится на пальце, запястье или мочке уха пациента. Сигнал периферического пульса, в частности лучевой артерии, содержит в себе информацию о многих физиологических процессах, протекающих в организме, и в первую очередь о ССС [6]. Скорость распространения ПВ представляет собой индекс артериальной жесткости сосудистой стенки. Чем выше скорость, тем выше жесткость, и ниже возможности растяжимости стенки сосуда. Известны работы, которые показывают взаимосвязь частоты возникновения сердечно сосудистых заболеваний и скорости ПВ [7,8].

На основе данных полученных по результатам измерения АД, ЧСС, ЧД, производят расчеты коэффициентов и индексов, характеризующих системное кровообращение.

Рассмотренные выше методики еще совсем недавно считались труднореализуемыми из-за потребности в значительной вычислительной мощности, вследствие чего были доступны только в дорогостоящем стационарном оборудовании. Появление дешевых 32-разрядных микроконтроллеров, соединивших в себе низкую стоимость, высочайшую производительность, при минимальном энергопотреблении позволяет реализовать сложные алгоритмы вычисления, работающие в реальном времени. Новые материалы, эффективные источники питания,

миниатюрные датчики и новые способы крепления их на тело пациента обуславливают уменьшение размеров МДУ при расширении функционала.

3. Мобильное диагностическое устройство (МДУ)

МДУ представляет собой аппаратно- программный комплекс, включающий несколько диагностических модулей: холтеровский монитор артериального давления и ЭКГ, пульсоксиметр, биохимический анализатор крови и мочи, термометр.

Для создания эффективного мобильного диагностического устройства (МДУ) необходимо определить набор контролируемых параметров при соблюдении баланса между степенью важности контролируемого параметра и сложности в его реализации, а также выбрать методики и методы расчета, используемые для определения текущего значения контролируемого параметра.

Авторами разработана модульная функциональная схема МДУ (Рис 1). Основные модули системы (8-13). Кардиологический модуль (10) и модуль измерения давления (8) дополнительно имеют память, необходимую для записи трендов суточного холтеровского мониторинга ЭКГ и давления.

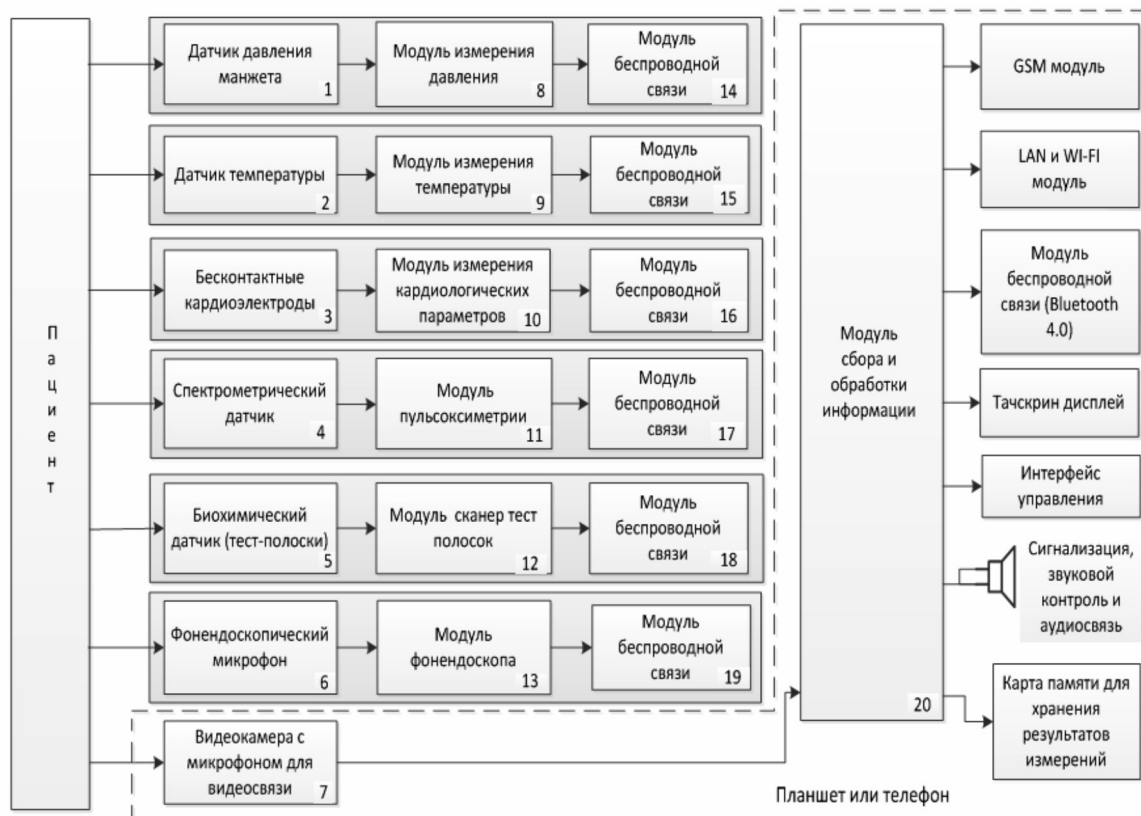


Рисунок 1. Функциональная схема МДУ.

Модуль измерения кардиологических параметров построен по классическому принципу с тремя типами электродов R, L, F, и дополнительными двумя электродами V1, V2. Получаемых данных достаточно для решения поставленных диагностических задач: получение трендов HR, RR, ST, QT, распознавание комплексов QRST на ЭКГ записи, выявление нарушений ритма, его вариабельности (BCP), маркировка аномалий и артефактов. Отличительные особенности конструкции кардиомодуля это работа совместно с фонокардиографом и использование бесконтактных кардиоэлектродов (EPIC фирмы Plessey Semiconductors PS25255) установленных в кардиопояс. Для выделения периодических изменений в работе сердца, используются методики, подробно описанные [9,10,11]. При наличии у пациента кардиостимулятора, производится оценка качества его работы, включая статистические данные о безответной стимуляции. Проблема подбора оптимальных параметров стимуляции, выбор методики их расчета крайне актуальна, т.к. статистические данные свидетельствуют, что до 30% кардиостимуляторов из-за неправильной настройки или по иным техническим причинам не только не улучшают состояния пациентов, но даже приводят к ухудшениям, таким как фибрилляция желудочков сердца.

Анализ различных видов контактных и бесконтактных электродов приведен в [12]. Электроды встраиваются в специальный пояс или жилет, который одевается на тело пациента. На одежде может быть предусмотрена возможность установки фонедоскопического микрофона (модуль 6), посредством которого прослушиваются шумы сердца и легких (модуль 13). Обычно в ходе проведения холтеровского мониторинга пациенту предлагается вести дневник, где он должен записывать текущий вид деятельности (испытываемую им нагрузку) и время. В данном МДУ встроен емкостной датчик, который включает аудиозапись при касании руки. По истечении 24 часов кардиомодулем будет подан звуковой сигнал, сигнализирующий о завершении мониторинга.

Особенностью реализации модуля измерения давления (8) является применение осциллометрического способа измерения давления. Данный способ позволяет нагнетать в манжету давление до среднего артериального, а не до систолического, систолическое давление рассчитывается. Это позволяет повысить комфортность измерения, сократить время релаксации сосудов, а также обеспечить большую точность измерений и возможность расчета целого спектра гемодинамических параметров. Для определения скорости пульсовой волны, сатурации кислорода, пульса и гемоглобина используется модуль (11). В качестве модуля сбора и обработки информации (20) используется планшет или смартфон, периферийные устройства (модули 7, 21–27) используются для коммуникации с врачом или родными пациента, а также для организации обработки данных с помощью облачных

сервисов. Пациенту достаточно оказаться в зоне действия Bluetooth модуля МДУ, данные автоматически будут загружены в МДУ обработаны и переданы в облако. При отсутствии канала связи с интернетом встроенная карта памяти (27) позволяет длительное время хранить результаты выполненных измерений.

4. Дополнительные параметры, измеряемые в МДУ.

Для постановки диагноза данных гемодинамики и транспорта кислорода недостаточно, требуются данные биохимических анализов. В МДУ контроль биохимических показателей мочи и крови можно реализовать двумя способами:

- ◆ использование тест полосок (например: по моче "Multicheck uro" 11 параметров, для глюкозы в крови "Accu-Chek"). Результаты считываются фотометрическим сканером тест – полосок, который может быть встроен в смартфон [13];
- ◆ использование новых биосенсоров [14,15] и молекулярных диагностических устройств (lab-on-a-chip technologies). [16].

5. Результаты лабораторных испытаний МДУ

Авторами проводились лабораторные испытания модуля давления (рис.2), кардиологического модуля и пояса с установленными датчиками EPIC (рис.3,5), модуля измерения сатурации кислорода и анализа пульсовой волны (рис.4). Для тестирования использовался генератор сигналов пациента RIGEL UNI-SIM (Великобритания), который предназначен для формирования и воспроизведения электрических сигналов специальной формы при проведении проверок и калибровок приборов функциональной диагностики, мониторов пациента, обеспечивающих измерение биоэлектрических потенциалов сердца, температуры тела, сигналов дыхания, частоты пульса (ЧП), пульсоксиметрии, а также воспроизведения избыточного давления в компрессионной манжете манометра артериального давления (АД).

Однако, параметры регистрации сигналов ЭКГ в значительной степени определены характеристиками используемых датчиков EPIC PS25255, поэтому проводить калибровку и поверку ЭКГ с помощью генератора сигналов пациента RIGEL UNI-SIM традиционным способом (подключив соответствующие выходы генератора ко входам ЭКГ модуля) не представляется возможным.

Для решения данной проблемы были разработаны емкостные переходники, при этом диапазон регистрируемых сигналов канала ЭКГ составил от 0,02 до 5 мВ.

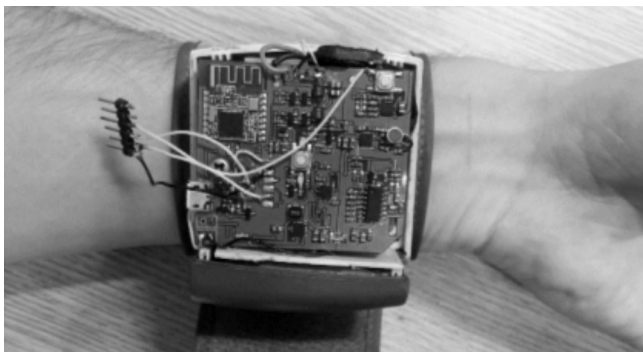


Рисунок 2. Фотография модуля измерения давления и температуры.



Рисунок 3. Фотография кардиологического пояса с установленными датчиками EPIC на пациенте (вид спереди).



Рисунок 4. Фотография модуля измерения сатурации кислорода и анализа пульсовой волны.



Рисунок 5. Датчики EPIC PS25251, PS25255 в корпусе QFN используемые в кардиологическом поясе.

Чувствительность канала ЭКГ устанавливается программно из ряда 2,5, 5, 10, 20, 40, 80 мВ/мВ. Отклонение установленной чувствительности от номинальной не превышает $\pm 10\%$. Входной импеданс канала ЭКГ не менее 20 ГОм; входная емкость 15 пФ; полоса пропускания ЭКГ на уровне минус 3 дБ (0,05 – 80) Гц. Постоянная времени каналов ЭКГ не менее 3,2с; нелинейность амплитудной характеристики канала ЭКГ не более 2%; измерение ЧСС в диапазоне от 20 до 250 уд/мин; погрешность измерения ЧСС составила ± 2 уд/мин

Относительная погрешность измерения артериального давления в покое составила $\pm 4\%$. Относительная погрешность измерения сатурации кислорода (SpO_2) в диапазоне 80 – 99% не более $\pm 2\%$; в диапазоне 50 – 79% не более $\pm 4\%$; в диапазоне 0 – 49% не нормируется.

Диапазон измерения частоты пульса 20 – 250 уд/мин. Диапазон определения индекса перфузии 0,05–10%. Пределы абсолютной погрешности измерения частоты пульса: в диапазоне 20 – 99 уд/мин. ± 2 уд/мин; в диапазоне 100– 250 уд/мин. ± 3 уд/мин.

6. Заключение

Проведен системный анализ параметров, характеризующих ССС человека, выявлен необходимый набор измеряемых параметров и информативное множество всевозможных рассчитываемых параметров на основе измеренных.

Показано, что для наиболее эффективной оценки состояния ССС пациента (определения параметров центральной и периферической гемодинамики, контроля параметры транспорта кислорода) следует использовать комплексный метод, включающий объемную компрессионную осциллометрию, электрокардиографию, анализ пульсовой волны совместно с методом оценки потребности организма пациента в кислороде.

Наиболее оптимальным вариантом является модульное исполнение устройства. МДУ может состоять из шести модулей: модуль измерения давления, модуль измерения температуры, кардиологический модуль, модуль пульсоксиметрии, модуль бесконтактной зарядки и кейс для хранения модулей. Все используемые в МДУ модули,

должны иметь встроенные аккумуляторы, оснащены системой бесконтактной зарядки, поддерживать беспроводной канал связи и облачные технологии, иметь влагоза-

щищенный эргономичный корпус. Дополнительно можно использовать современные биохимические датчики для контроля параметров капиллярной крови и мочи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Морозов, В.В. Телемедицина в кардиологии: новые перспективы / Морозов, В.В. Серяпина, Ю.В., Кравченко, Ю.Л., Тарков, С.М., Бессмельцев, В.П., Катаонов, Д.Н., Слугев, В.А. // *Фундаментальные исследования*. – 2013. – №7. с.589–593
2. Сафонов, М. Ю. Компьютерный электрокардиографический метод диагностики функционального состояния центральной гемодинамики // *Прикладные информационные аспекты медицины*. – 2009. – т.12 № 2. – с.25–28.
3. Giomarelli, P., Biagioli, B., Scolletta, S. Cardiac output monitoring by pressure recording analytical method in cardiac surgery. // *Eur J Cardiothorac Surg*. – 2004. – 26(3) – p.515–520, DOI:10.1016 / j.ejcts.2004.05.025
4. Ursino M, Cristalli C: A mathematical study of some biomechanical factors affecting the oscillometric blood pressure measurement. // *IEEE Trans Biomed Eng*. – 1996. – 43. p.761–778. DOI: 10.1109/10.508540
5. Тихоненко, В.М., Два метода измерения АД при суточном мониторинговании. / Тихоненко, В.М., Рогоза, А.Н., Гориева, Ш.Б., Павлова, Т.С.// *Функциональная диагностика* – 2007. № 1. с.52–57.
6. Миронова. Т.Ф., Миронов. В.А. Клинический анализ волновой структуры синусового ритма сердца (Введение в ритмокардиографию и атлас ритмокардиограмм). // Челябинск. – 1998, с. 162.
7. Meaume, S., Rudnichi, A., Lynch, A., et al. Aortic pulse wave velocity: an independent marker of cardiovascular risk. // *Hypertension*. – 2001. – 19. p.871–877.
8. Blacher J, et al. Aortic pulse wave velocity as a marker of cardiovascular risk in hypertensive patients. // *Hypertension*. – 1999 – 33. p.1111–1117
9. Dubin, D. *Rapid Interpretation of EKG's*. // (6th edition) COVER Publ. Co. Tampa, FL.368 pp. ISBN 0–912912–06–5.
10. Garcia T.B. and Miller G.T. *Arrhythmia Recognition: The Art of Interpretation*. // Jones & Bartlett Publ. Sudbury, MA. – 2004. – 633 pp. ISBN 0–7637–2246–4.
11. Thaler, M.S. *The Only EKG Book You'll Ever Need*. // Lippincott Williams & Wilkins. Philadelphia, PA. – 2003 – 317 pp. ISBN 0–7817–3921–7.
12. Amita Murthy, K. V. Padmaja *Developing Trends in Cardiac Monitoring Systems* // *International Journal of Advanced Research in Computer and Communication Engineering* – 2014. – v.3, – Issue 1. pp.5252–5256
13. Ali K. Yetisen, et al. A smartphone algorithm with inter-phone repeatability for the analysis of colorimetric tests. // *Sensors and Actuators B: Chemical*. – 2014; v.196. p.156. DOI: 10.1016/j.snb.2014.01.077
14. Петрова И.Ю., Зарипова В.М., Лежнина Ю.А., Соколовский В.М., Митченко И.А. Энергоинформационные модели биосенсоров // *Вестник АГТУ. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика*. 2015. №3.
15. Petrova, V. Zaripova, Y. Lezhnina, I. and V. Sokolskiy *Modeling of the Physical Principle of the Processes that is Occurring in Bioselective Elements*, *International Journal of Monitoring and Surveillance Technologies Research (IJMSTR)*3(4), pp.43–61 DOI: 10.4018/IJMSTR.2015100103
16. Erickson, D., O'Dell D., Jian L. *Smartphone technology can be transformative to the deployment of lab-on-chip diagnostics* // *Lab Chip*. – 2014. DOI:10.1039/C4LC00142G

© В.М. Соколовский, И.Ю. Петрова, И.З. Китиашвили, (Irapet1949@gmail.com), Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»,

