



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-1-28-33>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 616-71

ИССЛЕДОВАНИЕ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОДОВ, ПРЕДНАЗНАЧЕННЫХ ДЛЯ ДЛИТЕЛЬНОЙ РЕГИСТРАЦИИ ЭЛЕКТРОКАРДИОГРАММЫ

М. Е. ВЕРИГА, Е. В. ЛЕМЕШКО, С. Н. ВАСЮКЕВИЧ

Институт физиологии Национальной академии наук Беларуси (г. Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2025
Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2025

Аннотация. Электрокардиография – важный диагностический метод, позволяющий оценить электрическую активность сердца. Его использование позволяет диагностировать сердечно-сосудистые заболевания на ранних стадиях, предотвращая их прогрессирование и развитие осложнений. Однако не все патологии могут быть выявлены при краткосрочном исследовании. В случае подозрения на наличие таких заболеваний применяют метод длительной регистрации электрокардиограммы. Качество ее записи при длительной регистрации во многом зависит от используемых электродов. Сегодня самые распространенные – электроды с хлорсеребряным покрытием, показывающие хорошие результаты в течение непродолжительного времени. Однако их использование более 24 часов приводит к искажению сигнала и раздражению кожного покрова пациента из-за обезвоживания и деградации поверхности. В статье приведены результаты исследований материалов, предназначенных для изготовления сухих электродов, их свойств и влияния на показатели, получаемые при обследовании.

Ключевые слова: электрокардиография, электроды, датчики регистрации электрокардиографии, электропроводность, биологическая инертность, композитные материалы, сухие электроды.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Благодарность. Авторы выражают благодарность кандидату медицинских наук, доценту, ведущему научному сотруднику лаборатории физиологии питания и спорта Института физиологии Национальной академии наук Беларуси Эдуарду Степановичу Кашицкому за многолетний совместный труд на благо отечественной науки.

Для цитирования. Верига, М. Е. Исследование материалов для изготовления электродов, предназначенных для длительной регистрации электрокардиограммы / М. Е. Верига, Е. В. Лемешко, С. Н. Васюкевич // Доклады БГУИР. 2025. Т. 23, № 1. С. 28–33. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-1-28-33>.

STUDY OF MATERIALS FOR MANUFACTURING ELECTRODES DESIGNED FOR LONG-TERM REGISTRATION OF ELECTROCARDIOGRAM

MARIA E. VERIGA, YEGOR V. LEMESHKO, SERGEY N. VASYUKEVICH

Institute of Physiology of the National Academy of Sciences of Belarus (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. Electrocardiography is an important diagnostic method that allows assessing the electrical activity of the heart. Its use allows diagnosing cardiovascular diseases at early stages, preventing their progression and development of complications. However, not all pathologies can be detected during a short-term study. If the presence of such diseases is suspected, a method of long-term recording of the electrocardiogram is used. The quality of its recording during long-term recording largely depends on the electrodes used. Today, the most common are electrodes with silver chloride coating, showing good results for a short time. However, their use for more than

24 hours leads to signal distortion and irritation of the patient's skin due to dehydration and surface degradation. The article presents the results of studies of materials intended for the manufacture of dry electrodes, their properties and influence on the indicators obtained during the examination.

Keywords: electrocardiography, electrodes, electrocardiography recording sensors, electrical conductivity, biological inertness, composite materials, dry electrodes.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

Gratitude. The authors express their gratitude to the Candidate of Medical Sciences, Associate Professor, Leading Researcher of the Laboratory of Physiology of Nutrition and Sport of the Institute of Physiology of the National Academy of Sciences of Belarus Eduard Stepanovich Kashitsky for many years of joint work for the benefit of domestic science.

For citation. Veriga M. E., Lemeshko Ye. V., Vasyukevich S. N. (2025) Study of Materials for Manufacturing Electrodes Designed for Long-Term Registration of Electrocardiogram. *Doklady BGUIR*. 23 (1), 28–33. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-1-28-33> (in Russian).

Введение

Болезни сердечно-сосудистой системы остаются одной из главных причин высокой смертности во всем мире. В борьбе с ними применяются различные диагностические методы, одним из которых является электрокардиография (ЭКГ). ЭКГ – метод исследования, который позволяет регистрировать электрическую активность сердца. Принцип работы ЭКГ основан на том, что сердце генерирует электрические импульсы, которые распространяются по его мышечной ткани и вызывают сокращения. При проведении ЭКГ на кожу пациента накладываются электроды, фиксирующие эти импульсы. Записанные данные отображаются в виде графика – электрокардиограммы.

ЭКГ позволяет оценить ритм сердца, выявить нарушения проводимости, ишемию и другие патологии. Это безопасный и неинвазивный метод, который широко используют в клинической практике для диагностики сердечно-сосудистых заболеваний. Эффективной вариацией данного способа диагностики сердечно-сосудистой патологии является длительное дистанционное мониторирование электрокардиограммы [1]. При таком мониторировании электрические явления, возникающие в сердце, непрерывно регистрируют на протяжении 72 ч и более, причем пациент может находиться в привычных ему условиях во время проведения измерений.

Длительное мониторирование электрокардиограммы, широко известное как мониторирование по Холтеру, позволяет диагностировать скрытые сердечно-сосудистые патологии и обнаруживать различные типы нарушений сердечного ритма, такие как мерцательная аритмия, экстрасистолия и другие; определять эпизоды ишемии (недостатка кислорода) в миокарде, особенно во время физической активности или стресса; оценивать частоту сердечных сокращений в течение суток (синусовая тахикардия и брадикардия); выявлять блокады (например, АВ-блокаду), которые могут указывать на нарушения в электрической проводимости сердца; оценивать функцию сердца и фиксировать возможные признаки сердечной недостаточности; связывать симптомы (такие, например, как боль в груди) с изменениями на электрокардиограмме (эпизоды стенокардии); мониторировать изменения в состоянии пациентов, перенесших инфаркт миокарда, которые могут указывать на повторный инфаркт или другие осложнения [2]. Данные заболевания могут никак не проявить себя во время проведения процедуры снятия ЭКГ в условиях покоя, но вызывать серьезные нарушения жизнедеятельности организма, если не будут выявлены вовремя.

Для осуществления длительного мониторирования электрокардиограммы нужно решить следующие задачи: минимизировать влияние артефактов движения на сигнал, обеспечить приемлемый уровень комфорта при длительном использовании устройства мониторирования кардиосигнала и др. [1]. Чтобы решить данные задачи, критически важно выбрать материалы, используемые при изготовлении электродов для длительной регистрации электрокардиограммы.

Выбор материала электродов, предназначенных для длительной регистрации электрокардиограммы

В связи со спецификой физиологических исследований, с особенностями биологических объектов к конструкции и материалам электродов предъявляют ряд требований, в частности [1]:

- хорошая электропроводность;
- биологическая инертность (нетоксичность);
- высокая прочность, малые габариты и масса.

Живой ткани свойственна реакция на любое инородное тело, с которым она соприкасается, поэтому материал электрода должен быть биологически инертным (нетоксичным). Также электрод должен иметь минимально возможные размеры, поскольку тканевая реакция выражена тем сильнее, чем больше площадь соприкосновения. Кроме того, с увеличением площади электрода возрастают помехи от соседних участков ткани. С другой стороны, от электрода ожидают высокую электропроводность и прочность, что является препятствием к уменьшению его размера [1].

Материал датчика должен обладать низким импедансом (поскольку такой импеданс обеспечивает лучшее качество сигнала), высокой скоростью реакции, чтобы быстро реагировать на изменения в электрической активности сердца. Кроме того, материал должен быть стабильным, т. е. сохранять свои свойства в течение времени. Чтобы электроды не повреждались при работе мышц человека, оставались закрепленными на коже удобно и надежно, они сами и провода, связывающие их с устройством регистрации сигнала, должны быть мягкими и гибкими. Изложенные требования необходимо учитывать при разработке электродов для длительного мониторинга электрокардиограммы.

В настоящее время в ряде стран проводятся работы по созданию эпидермальной электроники и электродов для регистрации электрофизиологических сигналов, которые создаются на основе тонких упругих диэлектрических и проводящих пленок [3]. Внешний вид таких электродов похож на татуировку, гибкость и эластичность сопоставимы с физико-механическими свойствами кожи человека, что позволяет фиксировать их на теле пациента без клея за счет сил Ван-дер-Ваальса. В качестве диэлектрической основы электродов рассматриваются полиимид, парилен и другие, проводящий слой предполагается изготавливать из одного или нескольких слоев монографена, обладающего отменными электропроводящими свойствами [4].

Основные материалы электродов, предназначенных для длительной регистрации электрокардиограммы

Для электропроводящего слоя электрода часто используют золото, серебро или нержавеющей сталь, поскольку они обладают хорошей электрической проводимостью и устойчивостью к коррозии, что важно при длительном использовании. Для создания более гибких и легких электродов часто применяют полимеры, такие как полианилин, полиимид, полипиррол. Данные материалы также могут быть использованы в комбинации с другими для улучшения контактных свойств. Улучшить контакт между кожей и электродом можно с помощью специальных проводящих гелей или паст, которые помогают снизить сопротивление и обеспечивают более точные измерения.

При изоляции проводов и создании защитных оболочек электродов используется силикон, поскольку он обладает высокой термостойкостью и устойчивостью к воздействию влаги. Также применяют термопластичные эластомеры, которые обеспечивают гибкость и комфорт при ношении датчиков на коже. Актуальной является разработка беспроводных электродов для мониторинга электрокардиограммы, обеспечивающих свободу движений и решающих проблемы использования проводных датчиков (громоздкость конструкции, возникновение наводок и искажений сигналов) с применением беспроводных технологий передачи данных, таких как Bluetooth, NFC, Wi-Fi и других протоколов [5].

Разрабатывая корпус датчиков, целесообразно использовать легкие, прочные и биосовместимые пластики, такие как ABS или поликарбонат. Они защищают внутренние компоненты электродов от внешних воздействий. В некоторых случаях корпуса могут быть выполнены из легких металлических сплавов для повышения прочности и защиты от радиации. В последнее время активно проводятся исследования текстильных датчиков, которые можно внедрить в одежду пациентов [6]. Эти датчики используют электропроводящие волокна, что позволяет сделать мониторинг ЭКГ-сигнала более комфортным и непрерывным. Однако данная технология еще нуждается в доработке. Так, некоторые производители рекомендуют смачивать текстильные электроды во время использования, что может вызывать дискомфорт у пациентов.

Методика исследования материалов электродов, предназначенных для длительной регистрации электрокардиограммы

Для того чтобы исследовать характеристики электродов в условиях, приближенных к реальным (на теле человека), были изготовлены 24 полуэлемента (12 пар) образцов электродов из различных материалов (ткани на основе углерода, углеродных нитей, пленок из полиимиды с серебряным напылением различной толщины, полимерной пленки с напылением алюминия и пары контрольных электродов на основе полимерного материала, как аналога стандартного хлорсеребряного электрода). На рис. 1 приведены фотографии разработанных образцов электродов. Для функционального тестирования в сопоставимых условиях 24-х полуэлементов (12 пар) образцов электродов, изготовленных из различных материалов, была создана структурная схема испытательного стенда (рис. 2).

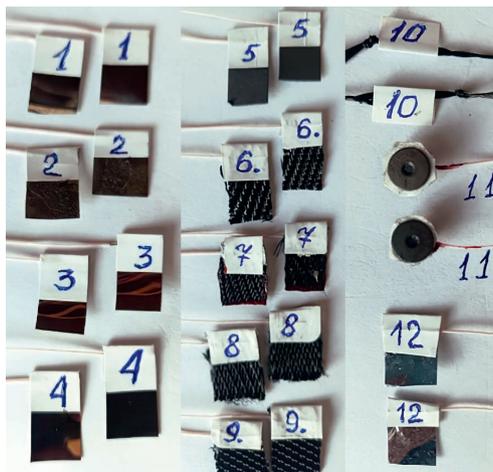


Рис. 1. 24 полуэлемента (12 пар) образцов электродов из различных материалов
Fig. 1. 24 half-elements (12 pairs) of sample electrodes made of different materials

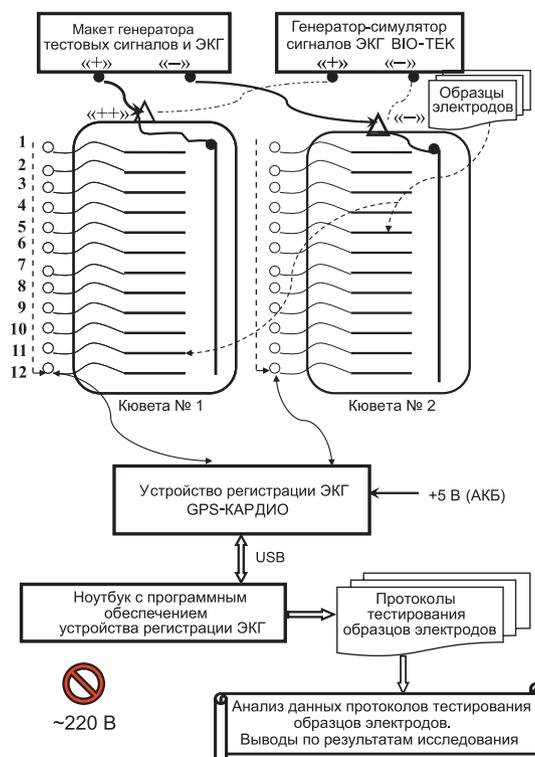


Рис. 2. Структурная схема испытательного стенда образцов ЭКГ-электродов
в сопоставимых условиях применения

Fig. 2. Structural diagram of the test bench for ECG-electrode samples under comparable application conditions

В рамках исследования к образцам электродов подключали генератор-симулятор сигналов ЭКГ с одной стороны и устройство регистрации электрокардиограммы с другой. Сигнал, получаемый таким образом, поступал на ноутбук с установленным программным обеспечением устройства регистрации электрокардиограммы. Результаты фиксировали в протоколе исследования, которые впоследствии анализировали по трем параметрам: форма сигнала, амплитуда сигнала и шумы сигнала на уровне изолинии электрокардиограммы.

Результаты исследований и их обсуждение

Все образцы электродов с серебряным напылением показали идентичные результаты. С ростом толщины напыления наблюдали увеличение случаев отслоения напыления от подложки. При изготовлении данных образцов для соединения проводов отведения с электродом применяли технологию пайки, однако для массового производства будет целесообразным использование более экологичных технологий.

Подложка электродов, выполненная на основе вспененного полимерного материала с наночастицами серебра, обладала недостаточной прочностью. Она разрушалась в ходе выполнения исследования, что вызывало изменение формы и амплитуды кардиосигнала.

Образцы электродов, изготовленные из углеродной ткани, были соединены с проводами отведений при помощи электропроводящего клея. В ходе тестирования выяснили, что электропроводящее соединение таким клеем обладает низкой прочностью в условиях повышенной влажности и воздействия солей. Кроме того, рыхлая структура ткани затрудняет использование электродов в динамике. При статических испытаниях характеристики образцов электродов из углеродной ткани были на уровне контрольных (стандартных) электродов.

Образец электрода из углеродной нити показал результаты, сопоставимые как с другими опытными образцами, так и со стандартным электродом. Углеродная нить, кроме того, может выполнять функцию провода отведений при условии нанесения диэлектрического защитного слоя. Поэтому целесообразно создавать более сложные электродные системы на основе электродов, изготовленных из углеродной нити. Следует отметить, что нецелесообразно использовать композитные материалы из-за проблематичности обеспечения соединения электрод-провод отведения, так как клеи растворяют полимерную основу, изменяя ее физико-химические свойства, а соединение пайкой припоем для данного случая недопустимо.

Заключение

Исследование материалов для электродов, предназначенных для длительной регистрации электрокардиограммы, представляет собой важный шаг в развитии кардиомониторинга и диагностики сердечно-сосудистых заболеваний. Выбор оптимальных материалов, обладающих высокой проводимостью, биосовместимостью и устойчивостью к внешним воздействиям, играет ключевую роль в обеспечении точности и надежности получаемых данных. Современные достижения в этой предметной области открывают новые горизонты для создания более эффективных и комфортных электродов. Дальнейшие исследования и разработки материалов для электродов нового поколения будут способствовать улучшению диагностики кардиологических заболеваний, что, в свою очередь, повысит качество жизни пациентов и снизит риски, связанные с развитием сердечно-сосудистых заболеваний и их осложнений.

Список литературы

1. Верига, М. Е. Современное состояние электродов для длительного мониторинга кардиосигнала / М. Е. Верига, Е. В. Лемешко // Подготовка научных кадров: опыт, проблемы, перспективы: сб. науч. тр. V Респуб. науч.-практ. конф. с междунар. участием, г. Минск, 8 дек. 2023 г. Минск: Ун-т Нац. акад. наук Беларуси, 2023. С. 201–204.
2. Cori, A. Clinical Implications of Long-Term ECG Monitoring: From Loop Recorder to Devices Remote Control / A. Cori, R. De Lucia // *Minerva Cardioangiologica*. 2017. No 66.
3. Лемешко, Е. В. Разработка электродов нового поколения для регистрации биоэлектрических потенциалов сердца / Е. В. Лемешко, С. Н. Васюкевич, С. В. Губкин // Доклады БГУИР. 2023. Т. 21, № 1. С. 43–50. <https://doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-1-43-50>.

4. Chest-Scale Self-Compensated Epidermal Electronics for Standard 6-Precordial-Lead ECG / L. Yin [et al.] // *Flex Electron*. 2022. Vol. 6, No 29. <https://doi.org/10.1038/s41528-022-00159-7>.
5. Мур, К. Упрощение процессов медицинских измерений с использованием беспроводных датчиков / К. Мур, И. Чудовский // *Беспроводные технологии*. 2006. № 2. С. 53–56.
6. Paradiso, R. Textile Electrodes and Integrated Smart Textile for Reliable Biomonitoring / R. Paradiso, M. Paceli // *Engineering in Medicine and Biology Society*. 2011. No 32. P. 74–77.

References

1. Veriga M. E., Lemeshko E. V. (2023) Modern State of Electrodes for Long-Term Monitoring of the Cardiac Signal. *Training of Scientific Personnel: Experience, Problems, Prospects, Collection of Scientific Papers of the V Republican Scientific and Practical Conference with International Participation, Minsk, Dec. 8*. Minsk, University of the National Academy of Sciences of Belarus. 201–204 (in Russian).
2. Cori A., De Lucia R. (2017) Clinical Implications of Long-Term ECG Monitoring: From Loop Recorder to Devices Remote Control. *Minerva Cardioangiologica*. (66).
3. Lemeshko Y. V., Vasukevich S. N., Gubkin S. V. (2023) Development of New Generation Electrodes for Registration of Heart Bioelectric Potentials. *Doklady BSUIR*. 21 (1), 43–50. <https://doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-1-43-50> (in Russian).
4. Yin L., Wang Y., Zhan J., Bai Y., Hou Ch., Wu J., et al. (2022) Chest-Scale Self-Compensated Epidermal Electronics for Standard 6-Precordial-Lead ECG. *Flex Electron*. 6 (29). <https://doi.org/10.1038/s41528-022-00159-7>.
5. Moore K., Chudovsky I. (2006) Simplification of the Medical Measurement Processes with the Use of Wireless Sensors. *Wireless Technologies*. (2), 53–56 (in Russian).
6. Paradiso R., Paceli M. (2011) Textile Electrodes and Integrated Smart Textile for Reliable Biomonitoring. *Engineering in Medicine and Biology Society*. (32), 74–77.

Вклад авторов

Верига М. Е. подготовила рукопись статьи.

Лемешко Е. В. осуществил постановку задачи для проведения исследования, принял участие в подготовке рукописи статьи.

Васюкевич С. Н. изготовил и испытал образцы электродов, построил графики.

Authors' contribution

Veriga M. E. prepared the manuscript of the article.

Lemeshko Ye. V. formulated the problem for study, took part in the preparation of the manuscript of the article.

Vasyukevich S. N. made and tested electrode samples, plotted graphs.

Сведения об авторах

Верига М. Е., мл. науч. сотр. лаборатории медико-биологических технологий и медицинской реабилитации, Институт физиологии Национальной академии наук Беларуси (ИФ НАН Беларуси)

Лемешко Е. В., канд. мед. наук, доц., зав. лабораторией медико-биологических технологий и медицинской реабилитации, ИФ НАН Беларуси

Васюкевич С. Н., ст. науч. сотр. лаборатории медико-биологических технологий и медицинской реабилитации, ИФ НАН Беларуси

Адрес для корреспонденции

220072, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. Академическая, 28
Институт физиологии
Национальной академии наук Беларуси
Тел.: +375 29 156-53-00
E-mail: mariaveriga21@yandex.by
Верига Мария Евгеньевна

Information about the authors

Veriga M. E., Junior Researcher at the Laboratory of Medical and Biological Technologies and Medical Rehabilitation, Institute of Physiology of the National Academy of Sciences of Belarus (IF NAS of Belarus)

Lemeshko Ye. V., Cand. of Sci., Associate Professor, Head of the Laboratory of Medical and Biological Technologies and Medical Rehabilitation, IF NAS of Belarus

Vasyukevich S. N., Senior Researcher at the Laboratory of Medical and Biological Technologies and Medical Rehabilitation, IF NAS of Belarus

Address for correspondence

220072, Republic of Belarus,
Minsk, Academicheskaya St., 28
Institute of Physiology
of the National Academy of Sciences of Belarus
Tel.: +375 29 156-53-00
E-mail: mariaveriga21@yandex.by
Veriga Maria Evgenyevna